Państwowy Instytut Geologiczny
Państwowy Instytut Badawczy
państwowa służba geologiczna

EFEKT RZECZOWY Z REALIZACJI PRZEDSIĘWZIĘCIA
Z ZAKRESU PAŃSTWOWEJ SŁUŻBY GEOLOGICZNEJ
za okres: od 1 stycznia 2022 r. do 31 grudnia 2023 r.

„Ocena stopnia szczelności oraz charakterystyka geologiczna i geomechaniczna wybranych struktur na potrzeby podziemnego magazynowania i składowania substancji na obszarze Niżu Polskiego”

w ramach umowy dotacji nr 2532/2022/Wn-07/FG-go-dn/D z dnia 25.02.2022 r

Nadzorujący:
Minister Klimatu i Środowiska
ul. Wawelska 52/54, 00–922 Warszawa

Dotujący:
Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej
ul. Konstruktorska 3A, 02–673 Warszawa

NARODOWY FUNDUSZ OCHRONY ŚRODOWISKA i GOSPODARKI WODNEJ

Wykonawca:
Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Rakowiecka 4, 00–975 Warszawa

PSG PAŃSTWOWA SŁUŻBA GEOLOGICZNA

Osoba sporządzająca raport:

Adam Wójcicki

……

Kierownik komórki organizacyjnej:

Marcin Szuflicki

……

Dyrektor/Dyrektor pionu:

……

Warszawa, wrzesień 2024 r.

Zespół wykonawców
Państwowego Instytutu Geologicznego – Państwowego Instytutu Badawczego

Wójcicki Adam, Adamuszek Marta, Leszczyński Krzysztof, Adamczak-Biały Teresa, Bagiński Mateusz, Becker Anna, Bobek Kinga, Chełmiński Jacek, Chodak Emilia, Cudnik Beata, Czapowski Grzegorz, Dąbrowski Marcin, Feldman-Olszewska Anna, Głuszyński Andrzej, Godlewska Sylwia, Grabowski Jacek, Grabowski Łukasz, Grochot Piotr, Hodbod Marta, Jarosiński Marek, Kaczmarzyk Joanna, Kaczorowski Zbigniew, Karpiński Marcin, Kijewska Sylwia, Kleczyński Piotr, Kozłowska Aleksandra, Kuberska Marta, Kutyła-Olesiuk Anna, Lampart Piotr, Mosiądz Natalia, Nasiłowski Rafał, Nowacki Łukasz, Nowak-Koszla Edyta, Olkowicz Marcin, Pasternak Marcin, Peryt Tadeusz, Pieńkowski Grzegorz, Razowska-Jaworek Lidia, Rosowiecka Olga, Roszkowska-Remin Joanna, Rozkosz Katarzyna, Rzeźnik Mateusz, Sieradz Dominika, Składowska Marta, Skowroński Leszek, Słotwiński Michał, Sobień Katarzyna, Suszka Grzegorz, Sztyrak Tadeusz, Tomaszczyk Marta, Ulatowska Adrianna, Wargacka Joanna, Wierzbowski Hubert, Zacharski Jarosław

Zespół wykonawców zewnętrznych

Kooperacja

1. GK Processing Sp. z o.o. 32-083 Balice, ul. Przemysłowa 17 –

Zaawansowany reprocessing danych sejsmicznych,

2. Instytut Nafty i Gazu - Państwowy Instytut Badawczy 31-503 Kraków, ul. Lubicz 25 A –

Wykonanie badań petrofizycznych w 40 próbkach skat kredowych i analiza mikroszczelinowatości w 20 szlifach wraz z opracowaniem wyników i ich interpretacją,

3. Instytut Nauk Geologicznych PAN, Ośrodek Badawczy w Krakowie, 31-002 Kraków, ul Senacka 1 –

Wykonanie analizy rentgenowskiej (XRD) w 12 próbkach skał drobnoklastycznych.

OCENA STOPNIA SZCZELNOŚCI ORAZ CHARAKTERYSTYKA GEOLOGICZNA I GEOMECHANICZNA WYBRANYCH STRUKTUR NA POTRZEBY PODZIEMNEGO MAGAZYNOWANIA I SKŁADOWANIA SUBSTANCJI NA OBSZARZE NIŻU POLSKIEGO

Sprawozdanie końcowe

TOM I

Warszawa 2024

Spis treści

Wstęp 8

1. Analiza dostępnych materiałów archiwalnych na potrzeby realizacji przedsięwzięcia 11

1.1 Kwerendy dotyczące zagadnień magazynowania i składowania substancji oraz analiza opracowań archiwalnych 11

1.2 Charakterystyka rozpatrywanych substancji a ich magazynowanie (składowanie) 37

1.2.1 Charakterystyka wybranych substancji 37

1.2.2 Główne wyzwania związane z magazynowaniem wybranych substancji 40

2. Opracowanie modeli numerycznych do badań geomechanicznych związanych ze stabilnością i szczelnością kawern w złożach pokładowych soli cechsztyńskich 43

3. Określenie kryteriów oceny stabilności i szczelności kawern oraz opracowanie wskazówek dla wyboru lokalizacji nowych magazynów w kawernach solnych 47

4. Wykonanie nowych analiz laboratoryjnych i profilowań rdzeni dla struktur solankowych w utworach kredy 49

4.1 Wstęp 49

4.2 Litologia i stratygrafia, oraz sedymentologia wybranych fragmentów rdzeni w kredzie górnej (z albem górnym) 50

4.2.1 Miąższość sekwencji węglanowej i węglanowo-krzemionkowej górnej kredy 67

4.2.2 Stratygrafia i litologia z elementami sedymentologii 67

4.3 Profilowanie strukturalne rdzeni z interwałów kredowych 87

4.3.1 Używane skróty i symbole 87

4.3.2 Obserwacje tektoniczne w otworach wiertniczych 89

4.3.3 Podsumowanie 102

4.4 Profilowania podatności magnetycznej skał (ręcznym podatnościomierzem) oraz promieniowania gamma (spektrometrem polowym) na rdzeniach 105

4.4.1 Metodyka badań 105

4.4.2 Wyniki profilowań 111

4.4.3 Wnioski i rekomendacje 118

4.5. Charakterystyka petrograficzna i petrofizyczna osadów kredy górnej (z albem górnym) 120

4.5.1 Metodyka 123

4.5.2 Wyniki badań 124

4.6 Podsumowanie 137

5. Opracowanie kryteriów wyboru optymalnych lokalizacji magazynów/składowisk w strukturach solankowych i ranking przydatności struktur 141

5.1 Kryteria wyboru struktur solankowych 141

5.1.1 Kryteria wyboru - podsumowanie 146

5.2 Kryteria rankingu struktur solankowych 148
5.2.1 Charakterystyka kryteriów rankingu struktur solankowych 148
5.3 Analiza struktur, ranking i wybór struktur do dalszych analiz 151
5.3.1 Analiza danych dla struktur solankowych 151
5.3.2 Ranking i wybór struktur solankowych do dalszych prac 152
5.4 Analiza danych hydrogeologicznych i hydrogeochemicznych na obszarach występowania struktur solankowych w Polsce centralnej 170
5.4.1 Warunki hydrogeologiczne w nadkładzie potencjalnego kompleksu magazynowania/składowania 170
5.4.2 Analiza danych hydrogeochemicznych dla kolektorów 191
5.4.3 Mineralizacja i rozkład ciśnień w obrębie wód podziemnych 243
6. Reprocessing danych sejsmicznych z obszaru trzech struktur solankowych 258
6.1 Struktura Budziszewice-Zaosie 259
6.1.1 Cel prac 259
6.1.2 Zakres prac 260
6.1.3 Lokalizacja rejonu prac 262
6.1.4. Ocena jakości danych źródłowych 263
6.1.5 Sekwencja przetwarzania 265
6.1.6 Wnioski 274
6.2 Struktura Bielsk-Bodzanów 277
6.2.1 Cel prac 277
6.2.2 Zakres prac 278
6.2.3 Lokalizacja rejonu prac 279
6.2.4 Ocena jakości danych źródłowych 280
6.2.5 Sekwencja przetwarzania 282
6.2.6 Wnioski 290
6.3 Struktura Konary 293
6.3.1 Cel prac 293
6.3.2 Zakres prac 294
6.3.3 Lokalizacja rejonu prac 295
6.3.4 Ocena jakości danych źródłowych 296
6.3.5 Sekwencja przetwarzania 298
6.3.6 Wnioski 306
7. Interpretacja geologiczno-geofizyczna struktur solankowych 309
7.1 Interpretacja danych sejsmicznych 312

7.1.1 Struktura Budziszewice-Zaosie 313
7.1.2 Struktura Konary 322
7.1.3 Struktura Bielsk 332
7.2 Archiwalne mapy strukturalne i zagospodarowanie terenu 341
7.2.1 Archiwalne mapy strukturalne 341
7.2.2 Zagospodarowanie terenu 348
7.3 Mapy grawimetryczne i ich interpretacja geologiczna 355
7.3.1 Dostępne dane grawimetryczne 355
7.3.1 Interpretacja transformowanych map grawimetrycznych 363
7.4 Ewolucja tektoniczna strefy Pabianic 368
7.4.1 Strefa Pabianic na przekroju sejsmicznym PGI176310 368
7.4.2 Interpretacja strukturalna danych otworowych 369
7.4.3 Współczesna aktywność głównej strefy uskokowej 372
7.5 Analiza strukturalna i geomechaniczna otworu Kaszewy-1 pod kątem przydatności antykliny Wojszyc do składowania CO_2 (ew. magazynowania innych substancji) 374
7.5.1 Cel przeprowadzonych badań 374
7.5.2 Dane i metodyka badań 374
7.5.3 Profil strukturalny otworu Kaszewy-1 374
7.5.4 Interpretacja obserwacji strukturalnych na rdzeniu wiertniczym i w XRMI 381
7.5.5 Ewolucja tektoniczna brachyantykliny Wojszyc 386
7.5.6 Model geomechaniczny 1D otworu Kaszewy-1 391
7.5.7 Wnioski strukturalno-geomechaniczne dotyczące uszczelnienia i kolektorów 396
7.6 Przekroje sejsmiczno-grawimetryczne przez strukturę Wojszyce 403
7.7 Przekroje sejsmiczno-grawimetryczne przez struktury Budziszewice-Zaosie, Konary i Bielsk-Bodzanów 411
7.7.1 Struktura Budziszewice-Zaosie 413
7.7.2 Struktura Konary 418
7.7.3 Struktura Bielsk-Bodzanów 424
7.8 Podsumowanie 430
8. Przygotowanie wytycznych do opracowania projektów robót geologicznych dla lokalizacji kawern w oraz rozpoznania wybranych struktur solankowych 441
8.1 Podstawy prawne 443
8.2 Przykłady przedsięwzięć w zakresie rozpoznawania obszarów lokalizacji kawern solnych i struktur solankowych na świecie 446
8.2.1 Struktury solne 446

8.2.2 Struktury solankowe 447
8.3 Rozpoznanie wytypowanych obszarów lokalizacji kawern solnych 451
8.3.1 Propozycje uzupełniających badań geologicznych i geofizycznych 453
8.4 Rozpoznanie wytypowanych struktur solankowych 456
8.4.2 Propozycje uzupełniających badań geologicznych i geofizycznych 463
8.5 Podsumowanie 471
9. Koordynacja prac, wymiana doświadczeń i prezentacja wyników 472
9.1 Koordynacja prac 472
9.2 Wymiana doświadczeń i prezentacja wyników 472
10. Prace realizowane przez podwykonawców 475
11. Podsumowanie 476
11.1 Magazyny substancji na świecie (rozdział 1.1) 476
11.2 Magazynowanie substancji w kawernach w pokładach soli cechsztyńskich wyniesienia Łeby (Tom II oraz rozdziały 2 i 3) 476
11.3 Analizy regionalnego uszczelnienia kredowego struktur solankowych w Polsce centralnej (rozdział 4) 479
11.4 Kryteria wyboru i rankingu struktur solankowych oraz wybór struktur na ich podstawie (rozdziały 5.1 – 5.3) 481
11.5 Analiza danych hydrogeologicznych i hydrogeochemicznych na obszarach występowania struktur solankowych w Polsce centralnej (rozdział 5.4) 483
11.6 Reprocessing danych sejsmicznych dla trzech struktur solankowych rozpoznanych sejsmiką z ubiegłego wieku (rozdział 6) 484
11.7 Interpretacja geologiczno-geofizyczna struktur solankowych (rozdział 7) 485
11.8 Przygotowanie wytycznych do opracowania projektów robót geologicznych dla lokalizacji kawern w oraz rozpoznania wybranych struktur solankowych (rozdział 8) 496
11.9 Wnioski i rekomendacje 501
11.9.1 Kawerny w pokładach soli 501
11.9.2 Struktury solankowe 503
LITERATURA 508
Dodatek A Informacja z przygotowania publikacji 519
Publikacje o zasięgu krajowym 519
Publikacje o zasięgu międzynarodowym 519

Wstęp

(Adam Wójcicki, Marta Adamuszek)

Przedsięwzięcie „Ocena stopnia szczelności oraz charakterystyka geologiczna i geomechaniczna wybranych struktur na potrzeby podziemnego magazynowania i składowania substancji na obszarze Niżu Polskiego" zostało wykonane w ramach zadań Państwowej Służby Geologicznej na zamówienie Ministerstwa Klimatu i Środowiska, a jego realizacja została sfinansowana ze środków Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej – umowa nr 2532/2022/Wn-07/FG-go-dn/D z dnia 25.02.2022 r.

Cele przedsięwzięcia obejmowały zasadniczo dwa zagadnienia:

- Ocena szczelności i geologiczna charakterystyka struktur solankowych w utworach mezozoiku na obszarze Niżu Polskiego, wybranych na potrzeby lokalizacji magazynów/składowisk substancji;

- Ocena stabilności i szczelności kawern solnych (na przykładzie złóż pokładowych wyniesienia Łeby) wybranych na potrzeby lokalizacji magazynów/składowisk substancji.

Cele te były realizowane w oparciu o analizy dostępnych danych geologiczno-geofizycznych oraz opracowań archiwalnych i publikacji, wyniki nowych (i archiwalnych) badań laboratoryjnych i profilowań rdzeni oraz określone kryteria bezpieczeństwa (dla struktur solankowych i kawern solnych) i wykonane na ich podstawie rankingi i lokalizowanie rozpatrywanych obiektów. Typowane w ten sposób obiekty były rozpatrywane jako potencjalne magazyny (strategiczne i szczytowe) gazu ziemnego, wodoru, mieszanin wodoru i gazu ziemnego, ew. sprężonego powietrza oraz składowiska dwutlenku węgla.

Do oceny przydatności i bezpieczeństwa podziemnych struktur solankowych wytypowanych do magazynowania/składowania substancji dokonano rozpoznania ich wewnętrznej budowy geologicznej oraz otoczenia w przedziale głębokościowym obejmującym kompleks utworów mezozoicznych przy wykorzystaniu kompleksu metod i programów geofizycznych oraz wyników analiz laboratoryjnych na próbkach rdzeni skał (w szczególności skał nadkładu uszczelniającego występujących bezpośrednio ponad formacją zbiornikową). Objęło to m.in. szczegółową i kompleksową analizę węglanowej i węglanowo-krzemionkowej sekwencji górnokredowej w centralnej części Niżu Polskiego (w tym mikroszczelinowatości i podatności na spękanie), jako regionalnego uszczelnienia dla potencjalnych podziemnych magazynów/składowisk substancji w utworach piaskowcowych kredy dolnej (formacja mogileńska) oraz określenie jej parametrów. W przypadku (lepiej rozpoznanych) utworów jury podstawą do analiz były dostępne archiwalne dokumentacje i archiwalne dane geologiczno-geofizyczne oraz publikacje. Prace te miały w szczególności na celu uzupełnienie brakującej wiedzy na temat jakości uszczelnienia struktur geologicznych – potencjalnych magazynów/składowisk substancji.

W przypadku kawern solnych w pokładowych złożach soli cechsztyńskich przedmiotem prac było w szczególności wykonanie modeli i opracowanie kryteriów oceny czynników warunkujących stabilność i szczelność kawern solnych, w tym parametrów geomechanicznych górotworu oraz parametrów geometrycznych kawern. Wyniki badań mogą być przydatne w procesie decyzyjnym doboru lokalizacji przez inwestora oraz podczas analizy technicznych aspektów budowy kawern

solnych w rejonie wyniesienia Łeby, a także pozwolą na lepsze zrozumienie zagrożeń związanych z użytkowaniem takich magazynów.

Ponadto celem ogólnym było opracowanie wytycznych i kryteriów wspomagających proces decyzyjny inwestora przy wyborze lokalizacji i budowie nowych magazynów/składowisk substancji w obrębie kawern solnych oraz struktur solankowych. W przypadku rekomendowanych (i innych analogicznych) struktur, obejmuje to, m.in., wytyczne na potrzeby efektywnego zaprojektowania kosztownych uzupełniających badań geologicznych i geofizycznych potrzebnych do szczegółowego rozpoznania tychże struktur pod kątem lokalizacji podziemnych magazynów/składowisk substancji.

Zakres prac zrealizowanych w tym okresie przez Wykonawcę zasadniczo odniesiono poniżej do poszczególnych zagadnień (podzadań) określonych w Karcie Informacyjnej zadania i Harmonogramie Rzeczowo-Finansowym Umowy, tzn. przyjęto tytuły rozdziałów niniejszego opracowania analogiczne jak tytuły podzadań zakresu rzeczowego Karty Informacyjnej zadania.

Jednakże z uwagi na wykonany zakres prac, szerszy niż wynikałoby to z zapisów Karty informacyjnej zadania dla podzadań 2 i 3 Karty, lecz wiążący się z problematyką wykorzystania kawern w pokładach soli do magazynowania substancji, wyniki wykonanych w ramach niniejszego przedsięwzięcia prac dotyczących podzadania 2 i 3 Karty informacyjnej ujęto w osobnym raporcie (**Tom II – problematyka magazynowania substancji w kawernach w pokładach soli cechsztyńskich**). Natomiast w rozdziałach 2 i 3 niniejszego sprawozdania dokonano krótkiego omówienia tych prac oraz podsumowania ich wyników w odniesieniu do zakresu i celów podzadań 2 i 3 Karty informacyjnej zadania.

Do niniejszego sprawozdania (raportu końcowego), obejmującego sprawozdania z podzadań, załączono na płycie DVD sprawozdania podwykonawców z prac kooperacyjnych wraz z wytworzonymi w ramach tych prac danymi, które to materiały zostały wykorzystane na potrzeby opracowania niniejszego sprawozdania, zaś na końcu niniejszego sprawozdania załączono (Dodatek A) informację z przygotowania 3 publikacji o zasięgu międzynarodowym oraz 1 o zasięgu krajowym. Po akceptacji niniejszego sprawozdania (raportu końcowego) przez Zamawiającego (Ministerstwo Klimatu i Środowiska) opracowanie to zostanie zamieszczone na stronie https://skladowanie.pgi.gov.pl/twiki/bin/view/Magazyny/WebHome. Obok niniejszego sprawozdania i sprawozdań podwykonawców (wraz z wytworzonymi przez nich danymi) na płycie DVD zamieszczono bazę informacji geologicznych, która obejmowała archiwalne i nowe informacje z otworów, w tym wyniki analiz laboratoryjnych i profilowań rdzeni, wykorzystanych dla zagadnień magazynowania i składowania, w tym dla wybranych 4 struktur solankowych oraz 3 obiektów w pokładach solnych, przy czym dla omawianych struktur solankowych i obiektów w pokładach soli zamieszczono tam ponadto sporządzone dla nich (po 2, w sumie 4) warstwy informacyjne charakteryzujące zasięgi i podstawowe parametry tychże struktur/obiektów oraz zasięgi obszarów proponowanych dla nich prac rozpoznawczych.

Należy przy tym nadmienić, że w rozdziale **8 Tomu II** wykorzystano informacje pochodzące z bieżącego dokumentowania przebiegu prac geologicznych na koncesji „Zatoka Pucka", do których prawo posiada KGHM Polska Miedź S.A. i stąd zgodnie z art. 82 ust. 8 Prawa Geologicznego i Górniczego (Dz.U. 2023 poz. 633 z późn. zm.) ta część niniejszego opracowania jest objęta zakazem udostępniania dopóki nie zostanie zatwierdzona przez organ koncesyjny odnośna dokumentacja.

Ponadto w zamieszczonych na DVD materiałach będących wynikiem prac podwykonawców znajdują się informacje geologiczne, do których prawa posiada przedsiębiorca. Są to dotyczące profili sejsmicznych z lat 1989-1992, do których prawa posiada PGNiG Grupa Orlen, dane cyfrowe stanowiące wyniki reprocessingu oraz dokumentacja z wykonanych prac obejmująca załączniki graficzne (katalog /Reprocessing danych sejsmicznych/Etap II). Informacje te mogą być udostępniane jedynie za zgodą przedsiębiorcy.

1. Analiza dostępnych materiałów archiwalnych na potrzeby realizacji przedsięwzięcia

1.1 Kwerendy dotyczące zagadnień magazynowania i składowania substancji oraz analiza opracowań archiwalnych

(Adam Wójcicki, Marta Adamuszek, Jarosław Zacharski)

Podzadanie rozpoczęło się od sporządzenia kwerendy obejmującej w pierwszej kolejności aktualnie funkcjonujące, budowane i planowane podziemne magazyny i składowiska substancji w Polsce, w strukturach geologicznych. Zinwentaryzowano podstawowe informacje (parametry geologiczne i operacyjne, w miarę dostępności informacji) dotyczące aktualnie funkcjonujących, budowanych i planowanych w Polsce magazynów substancji w kawernach solnych, sczerpanych złożach gazu ziemnego i strukturach solankowych. Zinwentaryzowano (Tabela 1-1). takie informacje dla 7 magazynów gazu wysokometanowego (sczerpane złoża gazu ziemnego i kawerny solne) i 2 gazu zaazotowanego (sczerpane złoża węglowodorów), a także 1 magazynu ropy naftowej i paliw (kawerny solne), oraz planowanych (względnie zarzuconych) magazynów i składowisk – 4 magazynów gazu w kawernach solnych, 1 w sczerpanym złożu gazu, 1 w strukturze solankowej oraz 1 składowiska CO_2 w strukturze solankowej). W sumie daje to 10 magazynów funkcjonujących (ew. w trakcie rozbudowy) oraz 7 magazynów/składowisk planowanych, względnie zarzuconych (Fig. 1-1).

Ponadto zebrano podstawowe informacje na temat magazynów gazu w Europie i na świecie (Tabela 1-2). Wynika stąd, że najliczniej są reprezentowane na świecie magazyny w strukturach naftowych, następnie magazyny w kawernach solnych, a najmniej liczne są magazyny w aquiferach. Natomiast w Europie tendencja jest analogiczna, z tym, że magazynów w kawernach solnych jest relatywnie więcej oraz zdecydowanie przeważają one liczbą nad magazynami w aquiferach. Jednakże magazyny w kawernach zwykle charakteryzują się mniejszą pojemnością niż magazyny w sczerpanych złożach węglowodorów, zaś największą pojemność mają magazyny w aquiferach (Cornot-Gandolphe, 2019). Z drugiej strony magazyny w kawernach to najbardziej efektywne magazyny operacyjne (umożliwiające szybkie odzyskanie przeważającej części zatłoczonego gazu ziemnego), zaś magazyny w strukturach porowatych (struktury naftowe i aquifery) są bardziej odpowiednie na magazyny strategiczne, w szczególności, jeśli chodzi o aquifery i duże struktury naftowe. Warto przy tym zauważyć, że pojemność czynna wszystkich aktualnie funkcjonujących magazynów gazu ziemnego w Polsce jest poniżej 1% pojemności wszystkich magazynów gazu ziemnego na świecie.

Została przy tym także scharakteryzowana problematyka podziemnych magazynów substancji innych niż gaz ziemny w Europie i na świecie, a także składowania dwutlenku węgla na skalę przemysłową. Obejmowało to magazyny wodoru, mieszanin wodoru i gazu ziemnego oraz sprężonego powietrza, dla których zebrano podstawowe informacje dotyczące warunków geologiczno-złożowych i pojemności operacyjnej na podstawie dostępnej literatury (Tabela 1-3). W sumie jest na świecie 12 takich magazynów (Fig. 1-2) funkcjonujących obecnie, niegdyś i w budowie (z tego 7 w Europie), przy czym magazyny (praktycznie) czystego wodoru funkcjonują obecnie wyłącznie w kawernach solnych, podobnie jak magazyny sprężonego powietrza. Natomiast mieszaniny wodoru i gazu ziemnego, względnie gazu ziemnego i wodoru (z domieszkami), magazynuje się w sczerpanych złożach gazu ziemnego (lecz nie ropy naftowej) i strukturach solankowych. Ponadto zebrano

informacje na temat aktualnie lub niegdyś funkcjonujących projektów CCS w zakresie składowania dwutlenku węgla na skalę przemysłową (Tabela 1-4). Generalnie w ostatnich latach liczba funkcjonujących projektów na skalę przemysłową systematycznie rośnie, przy czym liczba ta zależy również od definicji „projektu na skalę przemysłową" – dla przykładu w roku 2022 funkcjonowały 23 projekty, w ramach których prowadzono wychwyt, transport i składowanie co najmniej 0,4 mln ton dwutlenku węgla na rok, a ponadto wymieniono dwa projekty prowadzone niegdyś w takiej skali, gdyż były one istotne dla rozwoju tej technologii. Naturalnie jest (i było) znacznie więcej projektów CCS o mniejszej skali. Najwięcej takich projektów zlokalizowanych jest Ameryce Północnej, w Europie funkcjonują obecnie dwa projekty norweskie i jeden chorwacki (Fig. 1-3). Najczęściej do składowania dwutlenku węgla na skalę przemysłową wykorzystywane są sczerpane złoża węglowodorów, w szczególności ropy naftowej (w tym do wspomagania wydobycia węglowodorów).

W ramach kolejnej kwerendy zinwentaryzowano i przeanalizowano (w szczególności) 21 opracowań archiwalnych dotyczących rozpoznania i typowania struktur solankowych na potrzeby składowania dwutlenku węgla i magazynowania gazu ziemnego na obszarze naszego kraju. Były to projekty robót geologicznych, dokumentacje geologiczne, dokumentacje i opracowania otworowe, raporty PIG-PIB i in. (Tabela 1-5). Niektóre z tych opracowań obok zagadnień dotyczących struktur solankowych poruszały także problematykę typowania struktur naftowych na magazyny i składowiska substancji (w przypadku których szereg kryteriów wyboru może być analogicznych do tych dla struktur solankowych). Informacje te posłużyły między innymi do zdefiniowania obszaru badań w Polsce centralnej gdzie występuje regionalne uszczelnienie węglanowo-krzemionkowe ponad strukturami solankowymi w utworach dolnej kredy, które mogłyby być odpowiednie do magazynowania i składowania substancji oraz do związanego z tym wyboru 11 otworów rdzeniowanych, z których próbki mogłyby być przydatne do realizacji zadania (następnie zweryfikowano ile takich próbek i z ilu otworów będzie przydatnych do badań laboratoryjnych uszczelnienia kredowego).

Jednocześnie zinwentaryzowano i przeanalizowano (w szczególności) 17 opracowań archiwalnych dotyczących zagadnień związanych z lokowaniem kawern do magazynowania substancji w pokładach soli cechsztyńskich (w tym nt. budowy geologicznej wyniesienia Łeby i parametrów budujących je skał) i wysadach solnych (Fig. 1-4). Były to dokumentacje geologiczne/dodatki, projekty robót geologicznych, raporty PIG-PIB i in., praca doktorska (Tabela 1-6). Posłużyły one również do oceny dostępności przydatnych do tego celu archiwalnych informacji i danych. Wszystkie te informacje posłużyły z kolei do określenia obszaru badań w rejonie wyniesienia Łeby oraz wstępnego wytypowania obszaru dla 3 lokalizacji kawern w pokładach soli, które mogłyby być odpowiednie do magazynowania substancji (w szczególności wodoru).

Zgromadzono, w katalogu roboczym niniejszego przedsięwzięcia i przeanalizowano blisko 200 publikacji krajowych i zagranicznych dotyczących zagadnień poruszanych w ramach niniejszego przedsięwzięcia – nie wszystkie zostały wymienione w spisie literatury, gdyż podano tam jedynie pozycje cytowane w ramach niniejszego opracowania.

Następnie w przypadku struktur solankowych przeanalizowano informacje zawarte w opracowaniu „Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO_2 wraz z ich programem monitorowania" (2008-2012/13; Wójcicki i in., 2013) dotyczące struktur w utworach jury i kredy, które mogłyby być odpowiednie do magazynowania/składowania substancji (w tym struktur

uznanych tam za nieprzydatne jako składowiska CO_2, które jednakże mogłyby być przydatne do magazynowania gazu ziemnego, wodoru, wodoru & gazu ziemnego, sprężonego powietrza). Zinwentaryzowano w sumie 47 takich struktur (niektóre z nich położone są w tej samej lokalizacji, lecz w obrębie różnych formacji geologicznych, np. kredy i jury albo jury i triasu; przy czym w utworach klastycznych jury często występuje kilka poziomów zbiornikowych i uszczelniających), które następnie były przedmiotem dalszych analiz w ramach kolejnych podzadań niniejszego przedsięwzięcia i rozdziałów niniejszego opracowania. Zinwentaryzowano i przeanalizowano nowe informacje na temat ww. struktur jakie doszły od roku 2013 do chwili obecnej, w szczególności, jeśli chodzi o dostępne dokumentacje geologiczne, w tym otworowe (wynikowe i hydrogeologiczne), w tym nowe (tzn. wytworzone po 2013 roku) informacje dotyczące parametrów hydrogeochemicznych i fizykochemicznych wód złożowych w obrębie struktur w utworach kredy i jury na obszarze Niżu Polskiego lub w ich bliskim sąsiedztwie. Informacje takie doszły w szczególności w związku z nowymi przedsięwzięciami geotermalnymi w obrębie lub bliskim sąsiedztwie rozpatrywanych struktur (np. struktury Turek, Sochaczew), przy czym obecna lub planowana eksploatacja formacji zbiornikowej w obrębie struktury dla potrzeb geotermii wykluczała jej wykorzystanie na potrzeby magazynowania/składowania substancji. W tym także zinwentaryzowano i przeanalizowano informacje geologiczno-geofizyczne (otwory, sejsmika) wytworzone w ramach przedsięwzięcia PGE Bełchatów (prace w rejonie struktur Wojszyce i Lutomiersk-Tuszyn) i korespondowano z PGE w sprawie udostępnienia danych, które nie były obecne w NAG. Następnie dokonano finalnej inwentaryzacji wszystkich tych materiałów dotyczących struktur solankowych, które zostały następnie wykorzystane (i w miarę możliwości cytowane) w kolejnych rozdziałach niniejszego opracowania. Z tego powodu oraz z uwagi na ich znaczną ilość (co dotyczy zwłaszcza dokumentacji otworowych i sejsmicznych oraz grawimetrycznych) nie są one wymienione wszystkie w niniejszym rozdziale, jedynie wybrane, najważniejsze opracowania zawiera Tabela 1-5.

Natomiast w przypadku struktur solnych zinwentaryzowano w rejonie wyniesienia Łeby (i jego bezpośredniego sąsiedztwa), w oparciu o bazę CBDG, informacje na temat profili i zdjęć sejsmicznych i otworów zlokalizowanych w tym rejonie, w tym z najnowszych otworów KGHM, odwierconych w ciągu ostatnich 5 lat. Występowano do PGNiG o zgodę/udostępnienie danych sejsmicznych, które nie były dostępne w NAG i pozyskano te dane. Dokonano ponadto finalnej inwentaryzacji dostępnych na potrzeby zadania materiałów archiwalnych z rejonu wyniesienia Łeby (dokumentacje geologiczne, dokumentacje geologiczno-inżynierskie, rdzenie oraz opracowania badań sejsmicznych i badań geomechanicznych), które zostały następnie wykorzystane (i cytowane) w kolejnych rozdziałach niniejszego opracowania. Z powyższego powodu oraz z uwagi na ich znaczną ilość nie są one wszystkie wymienione w niniejszym rozdziale, jedynie wybrane, najważniejsze opracowania zawiera Tabela 1-6.

W następnym podrozdziale zestawiono podstawowe informacje na temat rozpatrywanych substancji, tzn. będących przedmiotem magazynowania wodoru, gazu ziemnego i sprężonego powietrza oraz będącego przedmiotem składowania dwutlenku węgla.

Tabela 1-1 Kwerenda - Aktualnie funkcjonujące, budowane i planowane podziemne magazyny substancji – nośników energii oraz składowiska CO_2 w strukturach geologicznych w Polsce (BIP MKiŚ, 2024; BIP Urzędu Gminy Krośnice, 2022; Czapowski i Tarkowski, 2018; Gas Storage Poland, 2022; Gaz System S.A., 2022; IKS Solino, 2022; Jurczak i in., 2006; Kapuściński i Kołpaczyński, 2018; PGNiG, 2022; Pisiewicz, 2020; Radio Zachód, 2018; Tarkowski i Czapowski, 2018; Wójcicki i in., 2013; Zacharski i in., 2021; Zawisza i in., 2009; Zeljaś, 2020)

L.p.	Nazwa	Status	Operator	Rok uruchomienia	Pojemność (czynna dla magazynów)	Rodzaj (struktury/zbiornika)	Formacja geologiczna	Głębokość występowania zbiornika [p.p.t.]	Substancja
1	Bonikowo	czynny	PGNiG S.A.	2009	200 mln m3	Sczerpane złoże gazu	wapień cechsztyński	2261	Gaz ziemny zaazotowany
2	Brzeźnica	czynny	PGNiG S.A./GSP	1979	100 mln m3	Sczerpane złoże gazu	utwory miocenu	394	Gaz ziemny wysokometanowy
3	Bytom Odrzański	planowany/zarzucony?	n.d.(*Energo-Salt 2020 Sp. z o.o.?*)	n.d.	b.d.	Pokłady soli (kawerny) towarzyszące złożu rud miedzi	sole cechsztyńskie	ok. 1000?	Gaz ziemny wysokometanowy
4	Damasławek	planowany (bliskie rozpoczęcie budowy?)	*Gaz System S.A.?*	po 2032	ok. 820 mln m3	Wysad solny (kawerny)	sole cechsztyńskie	ok. 900?	Gaz ziemny wysokometanowy
5	Daszewo	czynny	PGNiG S.A.	2009	60 mln m3	Sczerpane złoże ropy	dolomit główny	2778	Gaz ziemny zaazotowany
6	Góra	czynny	ORLEN/IKS Solino S.A.	2002	6 mln m3	Wysad solny (kawerny)	sole cechsztyńskie	270	Ropa i paliwa
7	Henrykowice E	planowany/zarzucony	n.d. *(Zakład Projektowania i Usług Technicznych A. i M. Brzozowscy Sp. j.?)*	n.d.	ok. 100 mln m3	Sczerpane złoże gazu	wapień cechsztyński	1516	Gaz ziemny wysokometanowy
8	Husów	czynny	PGNiG S.A./GSP	1987	500 mln m3	Sczerpane złoże gazu/wyeksploatowane horyzonty	utwory miocenu	1275	Gaz ziemny wysokometanowy

9	Kosakowo	czynny (rozbudowa zakończona w 2021)	PGNiG S.A./GSP	2013	300 mln m3	Pokłady soli (kawerny)	sole cechsztyńskie	970	Gaz ziemny wysokometanowy (wodór w następnym etapie rozbudowy?)
10	Lubień Kujawski	planowany?	n.d.(IKS S.A./Orlen?)	b.d.	b.d.	Wysad solny (kawerny)	sole cechsztyńskie	ok. 500?	węglowodory ciekłe lub etylen?
11	Łanięta	planowany?	n.d.(IKS S.A./Orlen?)	b.d.	b.d.	Wysad solny (kawerny)	sole cechsztyńskie	ok. 400?	węglowodory ciekłe lub etylen?
12	Marianowo	planowany/zarzucony	n.d. *(UGS ENERGY S.A.?)*	n.d.	do 1500 mln m3	Formacje solankowe	utwory jury (oksford lub pliensbach)	1245,5 lub 1435	Gaz ziemny wysokometanowy
13	Mogilno	czynny(planowana rozbudowa?)	PGNiG S.A./GSP	1997	585 mln m3	Wysad solny (kawerny)	sole cechsztyńskie	600	Gaz ziemny wysokometanowy (wodór w kolejnym etapie rozbudowy?)
14	Strachocina	czynny	PGNiG S.A./GSP	1982	360 mln m3	Sczerpane złoże gazu	utwory kredy górnej płaszczowin karpackich	847	Gaz ziemny wysokometanowy
15	Swarzów	czynny	PGNiG S.A./GSP	1979	90 mln m3	Sczerpane złoże gazu	utwory miocenu	670	Gaz ziemny wysokometanowy
16	Wierzchowice	czynny	PGNiG S.A./GSP	1995	1300 mln m3	Sczerpane złoże gazu	wapień cechsztyński i czerwony spągowiec	1550	Gaz ziemny wysokometanowy
17	Wojszyce	planowany/zarzucony	n.d. *(PGE GiEK S.A.?)*	n.d.	do 1356 mln ton	Formacje solankowe	utwory jury (Jaa-Jh)	900	Dwutlenek węgla

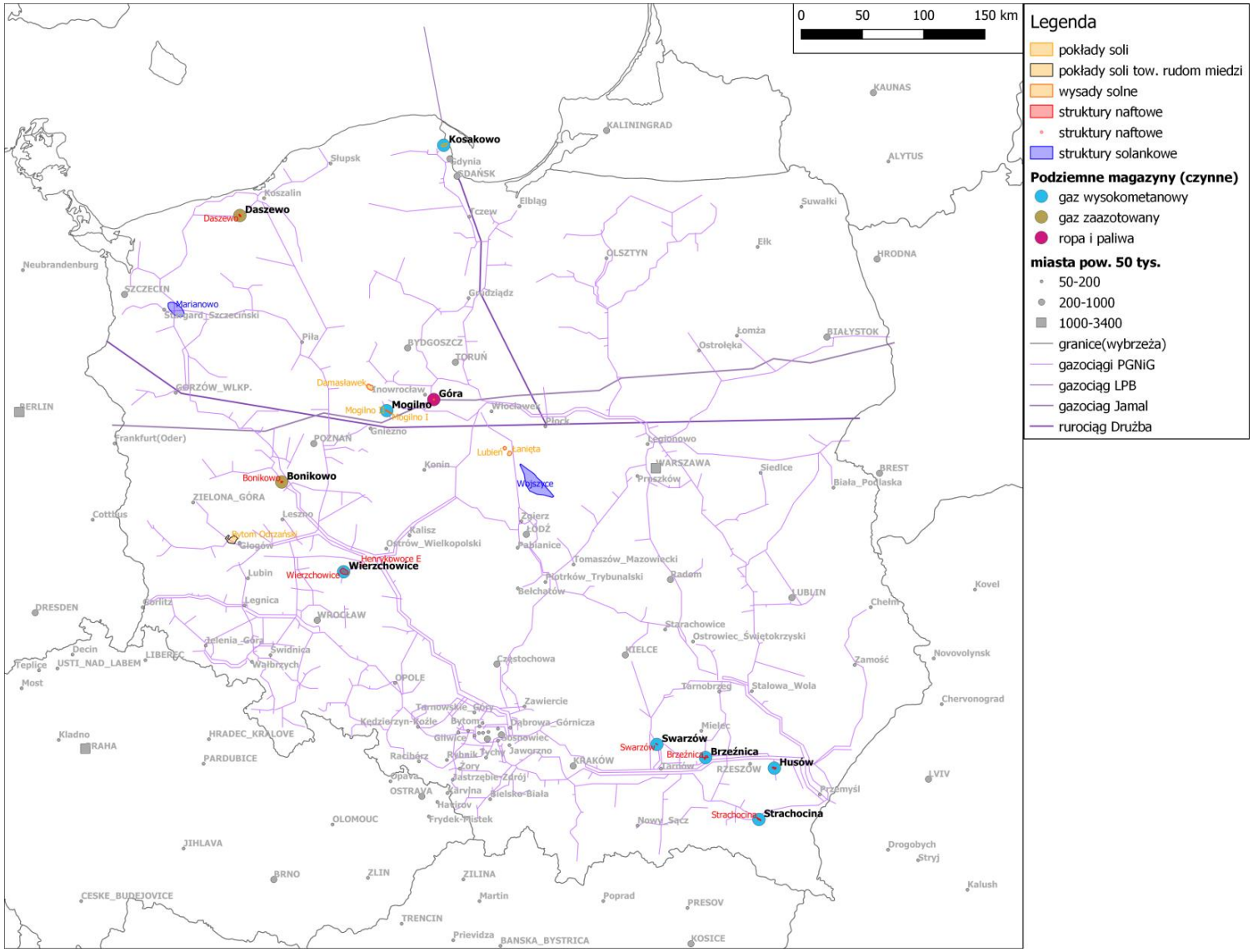

0 50 100 150 km
Legenda
pokłady soli
pokłady soli tow. rudom miedzi
wysady solne
struktury naftowe
struktury naftowe
struktury solankowe
Podziemne magazyny (czynne)
gaz wysokometanowy
gaz zaazotowany
ropa i paliwa
miasta pow. 50 tys.
50-200
200-1000
1000-3400
granice(wybrzeża)
gazociągi PGNiG
gazociąg LPB
gazociag Jamal
rurociąg Drużba
Kosakowo
Daszewo
Marianowo
Mogilno
Góra
Bonikowo
Wierzchowice
Swarzów
Brzeźnica
Husów
Strachocina
Lanięta
Wolsztyn
Damasławek
Mogilno I
Henrykowice E
Wierzchowice E
Bytom Odrzański
Daszewo
Strachocina
KALININGRAD
KAUNAS
ALYTUS
SZCZECIN
BERLIN
POZNAN
BYDGOSZCZ
TORUN
OLSZTYN
BIALYSTOK
WARSZAWA
LODZ
WROCLAW
OPOLE
KATOWICE
KRAKOW
RZESZOW
LUBLIN
KIELCE
OSTRAVA
OLOMOUC
BRNO
ZILINA
PRESOV
KOSICE
BANSKA_BYSTRICA
TRENCIN
DRESDEN
PRAHA
LIBEREC
HRADEC_KRALOVE
PARDUBICE
JIHLAVA
CESKE_BUDEJOVICE
Frankfurt(Oder)
Neubrandenburg
Cottbus
Görlitz
Most
Teplice
USTI_NAD_LABEM
Decin
Kladno
Przemyśl
Nowy_Sącz
Tarnobrzeg
Stalowa_Wola
Zamość
Chervonograd
Novovolynsk
Kovel
Chełm
Biała_Podlaska
Siedlce
Pruszków
Radom
Piotrków_Trybunalski
Tomaszów_Mazowiecki
Pabianice
Zgierz
Kalisz
Ostrów_Wielkopolski
Konin
Włocławek
Płock
Grudziądz
Toruń
Inowrocław
Piła
Leszno
Gniezno
Legionowo
Ostrołęka
Łomża
Ełk
Suwałki
Elbląg
Malbork
Słupsk
Koszalin
Gdynia
GDAŃSK
Starachowice
Ostrowiec_Świętokrzyski
Częstochowa
Zawiercie
Dąbrowa_Górnicza
Bytom
Gliwice
Jaworzno
Tarnowskie_Góry
Kędzierzyn-Koźle
Racibórz
Rybnik
Żory
Jastrzębie-Zdrój
Karvina
Bielsko-Biała
Frydek-Mistek
Hlucin
Mielec
Tarnów
Drogobych
Stryj
Kalush
Martin
Poprad
Prievidza
Zielona_Góra
Głogów
Lubin
Legnica
Jelenia_Góra
Świdnica
Wałbrzych
Bełchatów
Sochaczew
Żyrardów
Grodzisk_Mazowiecki
Otwock
Siedlce
Biała_Podlaska
Brest
Lomża
Ostrołęka
Ełk
Suwałki
Olsztyn
Hrodna
Kaunas
Alytus
Kaliningrad
Elbląg
Malbork
Tczew
Gdynia
Słupsk
Koszalin
Szczecin
Gorzów_Wlkp.
Poznań
Bydgoszcz
Toruń
Włocławek
Płock
Grudziądz
Inowrocław
Piła
Leszno
Gniezno
Konin
Kalisz
Ostrów_Wielkopolski
Zgierz
Łódź
Pabianice
Tomaszów_Mazowiecki
Piotrków_Trybunalski
Radom

Tabela 1-2 Kwerenda – Podziemne magazyny gazu funkcjonujące na świecie (Cornot-Gandolphe, 2019)

Region/ Kraj	Liczba magazynów				Pojemność czynna (mld m3)			Maks. moc odbioru (mln m3/d)		
	Kawerny	Strukt. naftowe	Aquifery	Razem	Kawerny	Ośrodki porowate	Razem	Kawerny	Ośrodki porowate	Razem
AMERYKA PÓŁNOCNA	**44**	**350**	**45**	**439**	**14,5**	**149,0**	**163,5**	**1039**	**2716**	**3755**
KANADA	6	47	-	53	0,5	27,3	27,8	18	362	380
STANY ZJEDNOCZONE	38	303	45	386	13,9	121,8	135,7	1021	2354	3375
AMERYKA POŁUDNIOWA I ŚRODKOWA	**-**	**1**	-	**1**	-	**0,1**	**0,1**	-	**2**	**2**
ARGENTYNA	-	1	-	1	-	0,1	0,1	-	2	2
EUROPA	**48**	**85**	**22**	**155**	**19,6**	**120,3**	**139,8**	**806**	**1553**	**2358**
AUSTRIA	-	8	-	8	-	8,2	8,2	-	93	93
BELGIA	-	-	1	1	-	0,7	0,7	-	15	15
BUŁGARIA	-	1	-	1	-	0,6	0,6	-	4	4
CHORWACJA	-	1	-	1	-	0,6	0,6	-	6	6
CZECHY	1	7	1	9	-	3,8	3,8	-	67	67
DANIA	1	-	1	2	0,4	0,4	0,8	13	13	25
FRANCJA	3	-	10	13	1,1	10,6	11,7	56	167	224
HISZPANIA	-	3	1	4	-	2,9	2,9	-	28	28

HOLANDIA	1	4	-	5	0,3	12,1	12,4	44	234	278
ŁOTWA	-	-	1	1	-	2,3	2,3	-	30	30
NIEMCY	31	11	5	47	15,2	9,1	24,3	530	146	676
POLSKA	2	7		9	0,7	2,5	3,2	28	24	52
PORTUGALIA	1	-	-	1	0,2	-	0,2	7	-	7
RUMUNIA	-	7	-	7	-	3,1	3,1	-	33	33
SERBIA	-	1	-	1	-	0,5	0,5	-	5	5
SŁOWACJA	-	3	-	3	-	3,6	3,6	-	44	44
SZWECJA	1	-	-	1	0,0	-	0,0	1	-	1
TURCJA	1	1	-	2	0,6	2,8	3,4	20	25	45
UKRAINA	-	11	2	13	-	32,2	32,2	-	265	265
WĘGRY	-	5	-	5	-	6,1	6,1	-	76	76
WIELKA BRYTANIA	6	2	-	8	1,0	0,4	1,3	107	9	116
WŁOCHY	-	13	-	13	-	17,9	17,9	-	269	269
WNP	**4**	**21**	**10**	**35**	**0,9**	**87,6**	**88,5**	**31**	**913**	**944**
ARMENIA	1	-	-	1	0,2	-	0,2	6	-	6
AZERBEJDŻAN	-	2	-	2	-	3,3	3,3	-	13	13
BIAŁORUŚ	1	1	1	3	0,5	1,0	1,5	20	11	31
KAZACHSTAN	-	1	2	3	-	4,7	4,7	-	34	34
KIRGISTAN	-	1	-	1	-	0,1	0,1	-	1	1

ROSJA	2	14	7	23	0,3	74,6	74,8	5	808	812
UZBEKISTAN	-	2	-	2	-	4,0	4,0	-	47	47
BLISKI WSCHÓD	**-**	**3**	-	**3**	**-**	**9,3**	**9,3**	**-**	**34**	**34**
DUBAJ (ZEA)	-	1	-	1	-	3,3	3,3	-	4	4
IRAN	-	2	-	2	-	6,0	6,0	-	30	30
AZJA-OCEANIA	**3**	**26**	-	**29**	**0,7**	**19,1**	**19,8**	**23**	**164**	**187**
AUSTRALIA	-	8	-	8	-	7,2	7,2	-	27	27
CHINY	3	11	-	14	0,7	11,0	11,7	23	133	156
JAPONIA		5	-	5	-	0,7	0,7	-		
NOWA ZELANDIA	-	1	-	1	-	0,3	0,3	-	2	2
TAJWAN	-	1	-	1	-	b.d.	b.d.	-	b.d.	b.d.
ŚWIAT	**99**	**486**	**77**	**662**	**35,7**	**385,4**	**421,1**	**1899**	**5382**	**7280**

Tabela 1-3 Kwerenda – Podziemne magazyny wodoru (z ew. domieszkami) i sprężonego powietrza na świecie funkcjonujące (obecnie i niegdyś) oraz w budowie (Crotogino, 2001; Letcher, 2020; Mindat, 2022; Sambo et al., 2022; Zivar et al., 2021)

L.p.	Nazwa	Kraj	Rok uruchomienia	Pojemność (czynna dla magazynów)	Rodzaj (struktury/zbiornika)	Formacja geologiczna	Głębokość występowania zbiornika [p.p.t.]	Substancja
1	Beynes	FRANCJA	1955-74 magazyn gazu miejskiego, potem gazu ziemnego	330 mln m3	Formacje solankowe	piaskowce jury	430 (strop)	Wodór (ok. 50%), Gaz ziemny (ok. 50%)
2	Clemens	STANY ZJEDNOCZONE	1983	0,580 mln m3	Wysad solny (kawerny)	Sole jurajskie (Louann)	850 (strop)	Wodór (95%)
3	Diadema	ARGENTYNA	2010 (2001 magazyn gazu)	b.d.	Sczerpane złoże gazu	piaskowce glaukonitowe K/Tr (Salamanca, Bianco Verde)	815 (strop)	Wodór (10%), Gaz ziemny (90%)
4	Huntorf	NIEMCY	1978	0,310 mln m3	Wysad solny (2 kawerny)	Sole cechsztyńskie	650 (strop)	Sprężone powietrze
5	McIntosh	STANY ZJEDNOCZONE	1991	0,532 mln m3	Wysad solny (kawerny)	Sole jurajskie (Louann)	450 (strop)	Sprężone powietrze
6	Ketzin	NIEMCY	1960-1985 magazyn gazu miejskiego, do 2000 - gazu ziemnego	b.d.	Formacje solankowe	piaskowce jury (hettang/synemur)	250 (strop)	Wodór (ok. 62%), Gaz ziemny (ok. 38%)
7	Kiel	NIEMCY	1971-1990-te magazyn gazu miejskiego, obecnie gazu ziemnego	0,032 mln m3	Wysad solny (kawerna)	Sole cechsztyńskie	1305 (strop)	Wodór (60%)
8	Lobodice	CZECHY	1965-1990	b.d. (pierwszy	Formacje solankowe	Piaskowce	430	Wodór (ok.

			magazyn gazu miejskiego, od 1995 gazu ziemnego	magazyn miał ok. 100 mln m3; nowy zajmuje fragment tego)		miocenu (baden)		50%), Gaz ziemny (ok. 50%)
9	Moss Bluff	STANY ZJEDNOCZONE	2007	0,566 mln m3	Wysad solny (kawerny)	Sole jurajskie (Louann)	820 (strop)	Wodór (95%)
10	Spindletop	STANY ZJEDNOCZONE	2017	0,906 mln m3	Wysad solny (kawerny)	Sole jurajskie (Louann)	1500 (średnia)	Wodór (95%)
11	Teesside	WIELKA BRYTANIA	1972	0,210 mln m3	Pokłady soli (kawerny)	Sole cechsztyńskie	380 (średnia)	Wodór (95%)
12	Underground Sun Storage	AUSTRIA	??-??magazyn gazu ziemnego; obecnie testy magazynowania wodoru	b.d.	Sczerpane złoże gazu	piaskowce miocenu (burdygał)	1000	Wodór (10%), Gaz ziemny (90%)

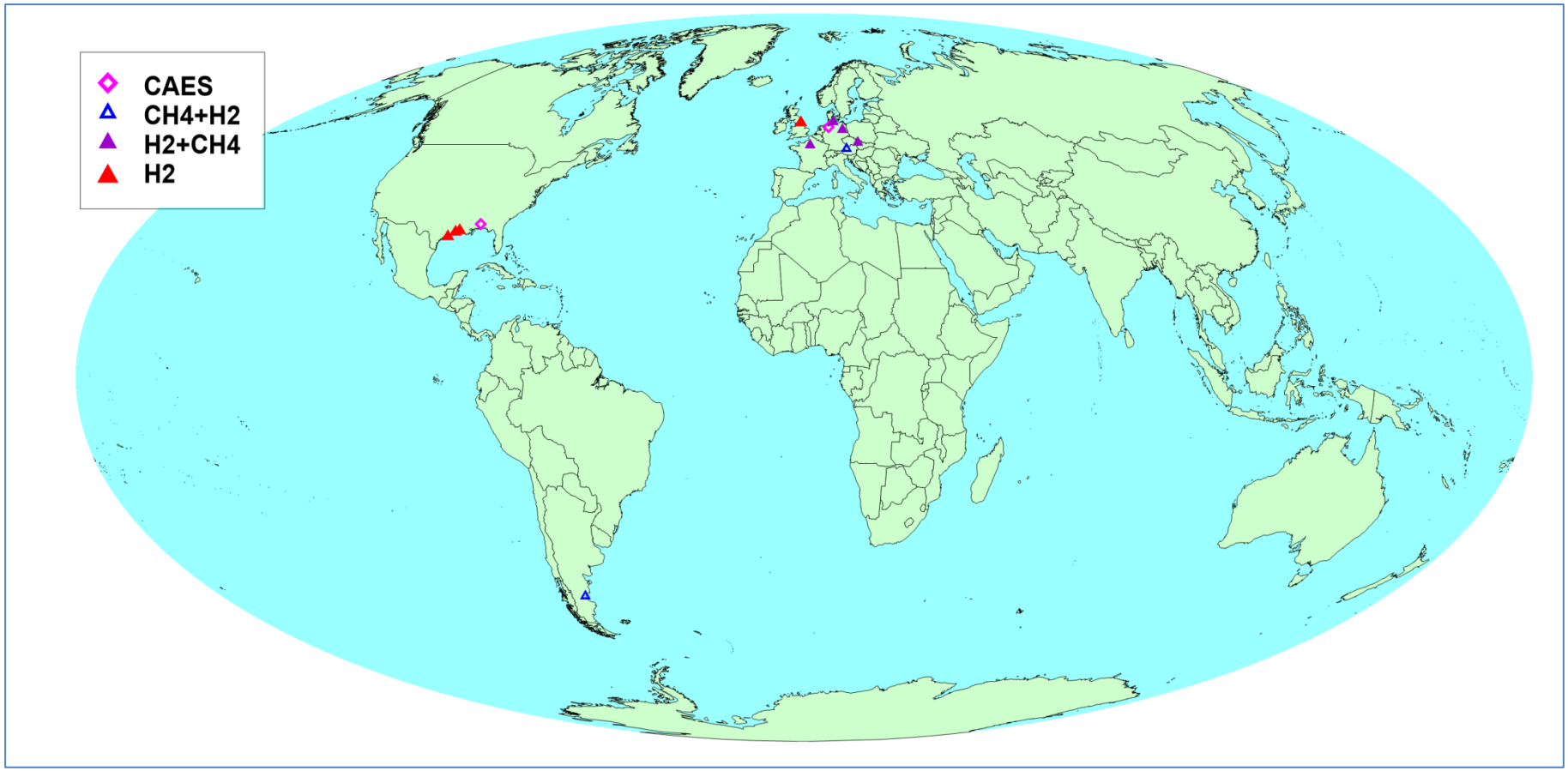


Fig. 1-2 Podziemne magazyny substancji na świecie (Tabela 1-3)

CAES – sprężone powietrze; CH_4+H_2 – mieszaniny gazu ziemnego i wodoru (z domieszkami); H_2+CH_4 – mieszaniny wodoru i gazu ziemnego (z domieszkami); H_2 – wodór (>=95%)

Tabela 1-4 Kwerenda – Projekty CCS/CCUS funkcjonujące (obecnie i niegdyś) na świecie, obejmujące składowanie CO_2 w skali przemysłowej, tzn. co najmniej 0,4 mln t CO_2/rok (GCCSI, 2021; KAPSCO2, 2022)

L.p.	Nazwa	Status	Kraj	Rok uruchomienia	Pojemność [mln t CO_2]	Rodzaj (struktury/zbiornika)	Formacja geologiczna (zbiornikowa)	Głębokość występowania zbiornika [p.p.t.]
1	Abu Dhabi CCS (Phase 1 being Emirates Steel Industries)	funkcjonujący	ZJEDNOCZONE EMIRATY ARABSKIE	2016	0,8	złoże ropy naftowej (EOR)	węglany neogenu (?)	b.d.
2	Air Products Steam Methane Reformer	funkcjonujący	STANY ZJEDNOCZONE	2013	1,0	złoże ropy naftowej (EOR)	piaskowce oligocenu (Frio)	1700
3	Alberta Carbon Trunk Line ("ACTL") with Agrium CO2 Stream	funkcjonujący	KANADA	2020	0,3-0,6	złoże ropy naftowej (EOR)	węglany dewonu (Leduc i Nisku)	1900
4	Alberta Carbon Trunk Line ("ACTL") with North West Redwater Partnership's Sturgeon Refinery CO2 Stream	funkcjonujący	KANADA	2020	1,3-1,6	złoże ropy naftowej (EOR)	węglany dewonu (Leduc i Nisku)	1900
5	Boundary Dam 3 Carbon Capture and Storage	funkcjonujący	KANADA	2014	1,0	złoże ropy naftowej (EOR) i formacje solankowe na lądzie (Aquistore)	węglany dolnego karbonu (Midale Vuggy & Marly; złoże ropy Weyburn) oraz piaskowce najniższego ordowiku	1500 oraz 3400

							i najniższego kambru (Deadwood i Winnipeg; formacje solankowe)	
6	Century Plant	funkcjonujący	STANY ZJEDNOCZONE	2010	5	złoża ropy naftowej (EOR)	różne	b.d.
7	CNPC Jilin Oil Field CO2 EOR (b. PetroChina Jilin Oil Field EOR Project (Phase 2))	funkcjonujący	CHINY	2018	0,6	złoże ropy naftowej (EOR)	mułowce górnej kredy (Qingshankou Group)	2000
8	Coffeyville Gasification Plant	funkcjonujący	STANY ZJEDNOCZONE	2013	1,0	złoże ropy naftowej (EOR)	piaskowce górnego karbonu (Burbank Sandstone)	914
9	*Cranfield Project*	*funkcjonujący /zakończony*	*STANY ZJEDNOCZONE*	*2009*	*1,5*	*formacja solankowa bezpośrednio podścielająca sczerpane złoże ropy na lądzie*	*piaskowce górnej kredy (Lower Tuscaloosa)*	*3000*
10	Enid Fertilizer	funkcjonujący	STANY ZJEDNOCZONE	1982	0,7(obecnie zredukowany 0,2)	złoża ropy naftowej (EOR)	węglany karbonu	1890 do 2865 (różne złoża)
11	Gorgon Carbon Dioxide Injection	funkcjonujący	AUSTRALIA	2019	3,4-4,0	formacje solankowe na lądzie	piaskowce górnej jury (Dupuy)	2000
12	Great Plains Synfuels Plant and Weyburn-Midale (poprzednia nazwa - Weyburn-Midale Storage Project)	funkcjonujący	KANADA/USA	2000	3,0	złoża ropy naftowej (EOR)	węglany dolnego karbonu (Midale Vuggy & Marly)	1500
13	Illinois Industrial	funkcjonujący	STANY	2017	1,0	formacje solankowe	piaskowce kambru	2130

	Carbon Capture and Storage		ZJEDNOCZONE			na lądzie	(Mount Simon Sandstone)	
14	*In Salah CO2 Storage*	*funkcjonujący /zakończony*	*ALGIERIA*	*2004*	*1,0*	*formacje solankowe na lądzie (pod złożem gazu)*	*piaskowce karbonu*	*1900*
15	Ivanić–Žutica CO2-EOR	funkcjonujący	CHORWACJA	2014	0,45	złoża ropy naftowej (EOR)	piaskowce miocenu	1500
16	Lost Cabin Gas Plant	funkcjonujący	STANY ZJEDNOCZONE	2013	0,9	złoże ropy naftowej (EOR)	piaskowce dolnej kredy (Muddy/Newcastle)	1400
17	Petra Nova Carbon Capture	funkcjonujący / (czasowo wstrzymany)	STANY ZJEDNOCZONE	2017	1,4	złoże ropy naftowej (EOR)	piaskowce oligocenu (Frio)	1640
18	Petrobras Santos Basin Pre-Salt Oil Field CCS	funkcjonujący	BRAZYLIA	2013	4,6 (od 2020)	złoże ropy naftowej (EOR)	węglany jury (Pre-salt cluster)	5000
19	Qatar LNG CCS	funkcjonujący	KATAR	2019/2020	2,1	sczerpane złoże gazu na morzu	węglany górnego permu i dolnego triasu (Kangan i Dalan)	3000
20	Quest	funkcjonujący	KANADA	2015	1,2	formacje solankowe na lądzie	piaskowce kambru (Basal Cambrian Sandstone)	2000
21	Shute Creek Gas Processing Plant	funkcjonujący	STANY ZJEDNOCZONE	1986	7,0 (od 2010)	złoża ropy naftowej (EOR)	różne	450 do 3400 (różne złoża)
22	Sleipner CO2 Storage	funkcjonujący	NORWEGIA	1996	0,85	formacje solankowe na morzu	piaskowce górnego miocenu (Utsira)	800
23	Snøhvit CO2 Storage	funkcjonujący	NORWEGIA	2008	0,7	formacje solankowe na morzu	piaskowce najniższej jury/najwyższego	2600

							triasu (Tubåente)	
24	Terrell Natural Gas Processing Plant (poprzednio Val Verde Natural Gas Plants)	funkcjonujący	STANY ZJEDNOCZONE	1972	0,45	złoża ropy naftowej	wapienie permskie (1-sze złoże) oraz piaskowce permskie (2-gie złoże)	1830 oraz 700
25	Uthmaniyah CO2-EOR Demonstration	funkcjonujący	ARABIA SAUDYJSKA	2015	0,8	złoże ropy naftowej	mułowce jury	1800

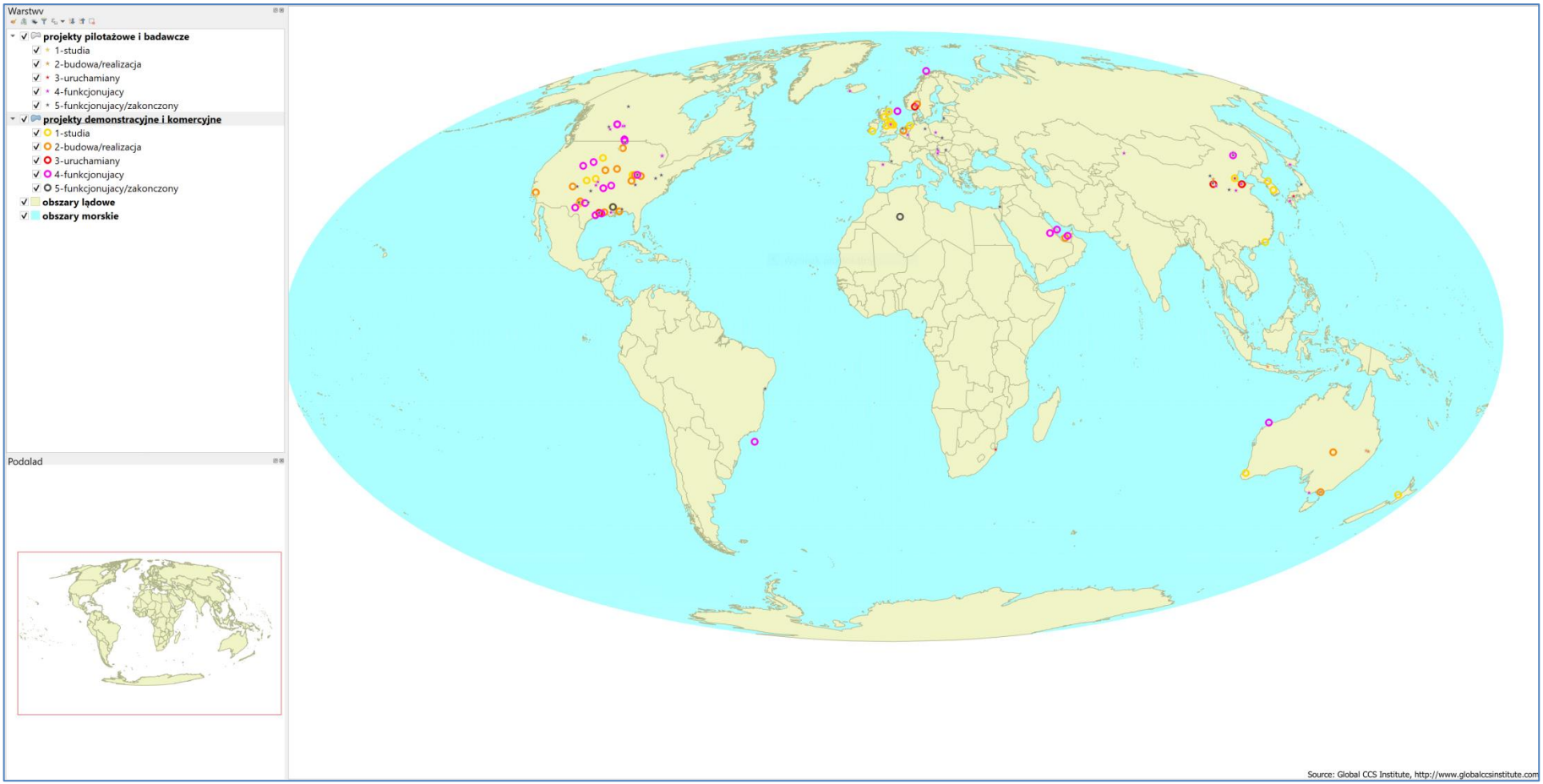


Fig. 1-3 Projekty CCS/CCUS na świecie na różnych etapach realizacji (w skali przemysłowej – demonstracyjne i komercyjne, a także pilotażowe i badawcze; KAPSCO2, 2022)

Tabela 1-5 Kwerenda – Wybrane opracowania archiwalne dla struktur solankowych (i naftowych) w Polsce

L.p.	Autor	Tytuł	Rok	Odbiorca/Finansujący	Substancja	Struktury
1	Biernat H., Zwierzyński M., Noga B., Kołpaczyński M., Kotko D., Pająk Ł., Szast P.	Projekt robót geologicznych w celu określenia warunków hydrogeologicznych i geologiczno-inżynierskich w związku z bezzbiornikowym magazynowaniem gazu w rejonie Marianowo, Etap 2; gm. Marianowo, Stara Dąbrowa, Stargard Szczeciński, pow. stargardzki, woj. zachodniopomorskie. Inw. 4959/2014 Arch. CAG PIG, Warszawa.	2014	UGS ENERGY S.A.	Gaz ziemny	Marianowo (jura)
2	Dembowska J., Marek S., zespół	Profile głębokich otworów wiertniczych Instytutu Geologicznego, zeszyt 60: Gostynin IG-1/1a, Gostynin IG-3, Gostynin IG-4, Żychlin IG-3. Inw. 7665/2021 Arch. CAG PIG, Warszawa.	1985	Inst. Geol., Warszawa	n.d. (otwory badawcze)	Gostynin (kreda, jura) i w sąsiedztwie struktury Wojszyce (kreda, jura)
3	Dembowska J., Marek S., zespół	Profile głębokich otworów wiertniczych Państwowego Instytutu Geologicznego, zeszyt 69: Koło IG-3, Koło IG-4, Poddębice IG-1. Inw. 7674/2021 Arch. CAG PIG, Warszawa.	1990	Państw. Inst. Geol., Warszawa	n.d. (otwory badawcze)	Ponętów (kreda), Wartkowice (kreda)
4	Feldman A., Marek S.	Dokumentacja wynikowa otworu badawczego Banachów IG-1 [zawiera kartę otworu]. Inw. 131366 Arch. CAG PIG, Warszawa.	1988	Państw. Inst. Geol., Warszawa	n.d. (otwór badawczy)	Ponętów (kreda)
5	Gaździcka E., Marek S., zespół	Dokumentacja wynikowa otworu badawczego Poddębice PIG-2. Inw. 133448 Arch. CAG PIG, Warszawa.	1994	Państw. Inst. Geol., Warszawa	n.d. (otwór badawczy)	Wartkowice (kreda)

6	Górecki W. (red.)	Analiza możliwości wykorzystania sczerpywalnych złóż węglowodorów, zawodnionych horyzontów i wybranych warstw wodonośnych na podziemne magazyny gazu ziemnego. Inw. 145/2005 Arch. CAG PIG, Warszawa.	2004	MŚ/NFOŚiGW	Gaz ziemny	Ponętów (kreda) (także przegląd 3 innych struktur solankowych w Polsce centralnej) *oraz sczerpane złoża gazu ziemnego (Bonikowo, Przemyśl-Tuligłowy, Tarnów; wybrane po przeglądzie krajowych złóż)*
7	Kapuściński J., Kołpaczyński M.	Projekt robót geologicznych w celu określenia warunków hydrogeologicznych i geologiczno-inżynierskich w związku z bezzbiornikowym magazynowaniem gazu w rejonie Marianowo, Etap 3, gm. Marianowo, Stara Dąbrowa, Stargard, pow. stargardzki, woj. zachodniopomorskie. Inw. 6921/2018 Arch. CAG PIG, Warszawa.	2018	UGS ENERGY S.A.	Gaz ziemny	Marianowo (jura)
8	Kukuła M., Bystroń K., Guty Ł., Kosiek K., Długosz P.	Dokumentacja hydrogeologiczna ustalająca zasoby eksploatacyjne ujęcia wód termalnych Koło GT-1 w miejscowości Chojny, gm. Koło, pow. kolski, woj. Wielkopolskie. Inw. 4370/2020 Arch. CAG PIG, Warszawa	2018	Gm. Miej. Koło	n.d. (otwór geotermalny)	pomiędzy strukturami Ponętów (kreda) i Trześniew (kreda)
9	Marek S.	Dokumentacja wynikowa otworu badawczego Polik IG-1 [zawiera kartę otworu]. Inw. 131899 Arch. CAG PIG, Warszawa.	1989	Państw. Inst. Geol., Warszawa	n.d. (otwór badawczy)	Sierpc (kreda, jura)
10	Musiatowicz J.,	Raport końcowy z prac polowych	2010	PGE GiEK S.A.	Dwutlenek węgla	Lutomiersk, Tuszyn

	Zubrzycka E.	Lutomiersk-Tuszyn 2D [wraz ze sprawozdaniem z prac doświadczalnych]. Inw. 4317/2011 Arch. CAG PIG, Warszawa.				(jura)
11	Musiatowicz J., Zubrzycka E.	Raport końcowy z prac polowych Wojszyce 2D [wraz ze sprawozdaniem z prac doświadczalnych]. Inw. 4315/2011 Arch. CAG PIG, Warszawa.	2010	PGE GiEK S.A.	Dwutlenek węgla	Wojszyce (jura)
12	Pęksa A.	Dokumentacja wynikowa otworu badawczego strukturalno-parametrycznego Grudziądz IG-1 [zawiera kartę otworu]. Inw. 116122 Arch. CAG PIG, Warszawa	1972	Inst. Geol., Warszawa	n.d. (otwór badawczy)	Poza strukturami (kreda), najbliższa struktura – antyklina Koronowa
13	Posyniak A., Rosa W.	Dokumentacja końcowa otworu wiertniczego KASZEWY 1. Inw. 4311/2011 Arch. CAG PIG, Warszawa.	2010	PGE GiEK S.A.	Dwutlenek węgla	Wojszyce (jura)
14	Posyniak A., Rosa W.	Dokumentacja końcowa wykonanych niestandardowych badań geofizycznych w otworze badawczym KASZEWY 1. Inw. 4312/2011 Arch. CAG PIG, Warszawa.	2011	PGE GiEK S.A.	Dwutlenek węgla	Wojszyce (jura)
15	Posyniak A., Rosa W.	Dokumentacja końcowa otworu wiertniczego PABIANICE 1. Inw. 4313/2011 Arch. CAG PIG, Warszawa.	2010	PGE GiEK S.A.	Dwutlenek węgla	Lutomiersk/Tuszyn (jura)
16	Posyniak A., Rosa W.	Dokumentacja końcowa wykonanych niestandardowych badań geofizycznych w otworze badawczym PABIANICE 1. Inw.	2011	PGE GiEK S.A.	Dwutlenek węgla	Lutomiersk/Tuszyn (jura)

		4314/2011 Arch. CAG PIG, Warszawa.				
17	Raczyńska A., Ryl A., zespół	Profile głębokich otworów wiertniczych Instytutu Geologicznego, zeszyt 11: Strzelno IG-1. Inw. 7616/2021 Arch. CAG PIG, Warszawa.	1973	Inst. Geol., Warszawa	n.d. (otwór badawczy)	Strzelno (kreda)
18	Sinoracki A., Żak K., Kolasiński K.	Raport końcowy z Przetwarzania Danych Sejsmicznych Lutomiersk-Tuszyn 2D. Inw. 4318/2011 Arch. CAG PIG, Warszawa.	2010	PGE GiEK S.A.	Dwutlenek węgla	Lutomiersk, Tuszyn (jura)
19	Sinoracki A., Żak K., Kolasiński K.	Raport końcowy z Przetwarzania Danych Sejsmicznych Wojszyce 2D. Inw. 4316/2011 Arch. CAG PIG, Warszawa.	2010	PGE GiEK S.A.	Dwutlenek węgla	Wojszyce (jura)
20	Tarkowski R. [red.]	Potencjalne struktury geologiczne do składowania CO2 w utworach mezozoiku Niżu Polskiego (Charakterystyka oraz ranking), autorzy: L. Dziewińska, S. Marek, Tarkowski R., Uliasz-Misiak B, [w:] "Studia Rozprawy i Monografie", nr 164, IGSMiE PAN, 2010, 138s.	2010	IGSMiE PAN/inne	Dwutlenek węgla	36 wytypowanych struktur na obszarze całego kraju
21	Wójcicki A., Nagy S., Lubaś J., Chećko J., Tarkowski R., i in.	Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO2 wraz z ich programem monitorowania, Raport końcowy oraz raport podsumowujący (ostatni w języku polskim i angielskim). Dostępne na stronie projektu: http://skladowanie.pgi.gov.pl	2013	Ministerstwo Środowiska/NFOŚiGW	Dwutlenek węgla	45 wytypowanych struktur na obszarze całego kraju

Tabela 1-6 Kwerenda – Wybrane opracowania archiwalne dla struktur solnych w utworach cechsztynu w Polsce

L.p.	Autor	Tytuł	Rok	Odbiorca/Finansujący	Substancja(e)	Struktury
1	Biernat H., Wichowska A., Karwacki K.	Dodatek nr 5 do dokumentacji geologicznej złoża soli kamiennej "Góra" w kat. C2+C1+B w miejsc. Góra, gm. Inowrocław, pow. inowrocławski, woj. kujawsko-pomorskie. Inw. 4553/2011 Arch. CAG PIG, Warszawa.	2011	Orlen/IKS Solino S.A.	Ropa i paliwa	Złoże soli kamiennej w wysadzie solnym Góra
2	Czapowski G.	Geneza najstarszej soli kamiennej cechsztynu w rejonie Zatoki Puckiej (studium sedymentologiczne). Inw. 532/96 Arch. CAG PIG, Warszawa.	1995	n.d. (PIG-PIB; praca statutowa)	n.d. (przewidziana eksploatacja soli kamiennej)	Pokłady soli najstarszej (Werra) w rejonie Zatoki Puckiej/(wschodniej części)wyniesienia Łeby, obejmujące złoża soli kamiennej
3	Czapowski G.	Prognozowanie parametrów złóż i struktur solnych pod kątem różnych form zagospodarowania (wyrobiska eksploatacyjne, zbiorniki paliw, składowiska odpadów), poz. pl. 2.62.9700.00.0. Inw. 1827/95 Arch. CAG PIG, Warszawa.	1995	Minist. Ochr. Środ., Zas. Nat. i Leśn., Warszawa	Różne (gaz ziemny, węglowodory ciekłe, sprężone powietrze, odpady energetyczne i promieniotwórcze)	Wysady solne (Przytór, Goleniów, Grzęzno, Drawno, Wapno, Damasławek, Mogilno, Inowrocław, Góra, Izbica Kłodawska, Kłodawa, Łanięta, Rogóźno) i pokłady soli (rejon Zatoki Puckiej/(wschodniej części)wyniesienia Łeby oraz rejon LGOM) w utworach cechsztynu
4	Czapowski G.	Geneza najstarszej soli kamiennej cechsztynu w rejonie Zatoki Puckiej. Inw. 696/99 Arch. CAG PIG, Warszawa.	1998	n.d. (PIG-PIB; praca doktorska)	n.d. (przewidziana eksploatacja soli kamiennej)	Pokłady soli najstarszej (Werra) w rejonie Zatoki Puckiej/(wschodniej części)wyniesienia

						Łeby, obejmujące złoża soli kamiennej
5	Feldman-Olszewska A., Czapowski G. (red.)	Projekt robót geologicznych na odwiercenie otworu badawczego Przyjaźń PIG 1. Archiwum zakładowe PIG-PIB (?)	2016	MŚ/NFOŚiGW (faktycznie PIG-PIB, projekt niezatwierdzony, rezygnacja MŚ z finansowania tej i dalszych prac)	n.d. (przewidziane poszukiwanie/rozpoznanie złóż soli kamiennej)	Pokłady soli najstarszej (Werra) w pobliżu SE skraju wyniesienia Łeby (przyległy obszar syneklizy perybałtyckiej)
6	Gontarz Z., Muszyński M., Fiedeń M.	Ocena geofizyczno-geologiczna rejonu podziemnego magazynu gazu Kosakowo. Inw. 7263/2020 Arch. CAG PIG, Warszawa.	2007	PGNiG S.A.	Gaz ziemny wysokometanowy	Pokłady soli (kawerny) w obrębie złoża soli kamiennej Mechelinki
7	Jurczak S., Brańka S., Berezowski T., Kasprzyk W., Rogowska E.	Dokumentacja geologiczno-inżynierska złoża soli kamiennej "Góra" dla bezzbiornikowego magazynowania ropy naftowej i paliw płynnych w górotworze w miejsc. Góra, woj. kujawsko-pomorskie. Inw. 1698/2006 Arch. CAG PIG, Warszawa.	2006	IKS Solino S.A.	Ropa i paliwa	Złoże soli kamiennej w wysadzie solnym Góra
8	Korol K., Derdowski R.	Dodatek nr 1 do dokumentacji geologicznej złoża soli kamiennej "Mechelinki" w kategorii C1 w miejscowości Mechelinki, gm. Kosakowo, pow. pucki, woj. Pomorskie. Inw. 4283/2008 Arch. CAG PIG, Warszawa.	2008	PGNiG S.A.	Gaz ziemny wysokometanowy	Złoże soli kamiennej Mechelinki w pokładach soli najstarszej (Werra)
9	Kornowska I.	Dokumentacja geologiczna złoża soli kamiennej "Łeba" woj. słupskie, kategoria rozpoznania - C2. Inw. 13333 CUG Arch. CAG PIG, Warszawa.	1980	Centr. Urz. Geol., Warszawa	n.d. (przewidziana eksploatacja soli kamiennej)	Złoże soli kamiennej w pokładach soli cechsztyńskich w zachodniej części wyniesienia Łeby
10	Perski Z., Brzeziński M.,	Monitoring geodynamiczny w	2019	MŚ/NFOŚiGW	n.d. (badania ruchliwości soli)	Wysady solne (i ich

	Przyłucka M., Pacanowski G., Musiatewicz M., Nowacki Ł., Graniczny M., Kowalski Z., Chełmiński J., Czarniak P., Stępień U., Czapowski G.	zakresie interferometrii satelitarnej pasa wysadów solnych w Polsce oraz próba określenia ruchliwości soli w czwartorzędzie z wykorzystaniem tomografii elektrooporowej i technik modelowania 3D. Inw. 4739/2021 Arch. CAG PIG, Warszawa.				nadkład/otoczenie) Damasławek, Izbica Kujawska(-Łęczyca), Łanięta i Wapno
11	Pisiewicz T.	Dodatek nr 1 do dokumentacji geologicznej złoża soli kamiennej "Damasławek", miejsc. Sielec, Podobowice, Uścikowo, Ustaszewo, Świątkowo, Bogdarka, gm. Żnin, Janowiec Wielkopolski, pow. żniński, woj. kujawsko-pomorskie. Inw. 7190/2020 Arch. CAG PIG, Warszawa.	2020	Gaz System S.A.	Gaz ziemny wysokometanowy	Złoże soli kamiennej w wysadzie solnym Damasławek
12	Pyrgies W., Korol K., Derdowski R.	Dokumentacja geologiczno-inżynierska dla bezzbiornikowego magazynowania gazu w złożu soli kamiennej "Mechelinki" (grunty wsi Mosty). Inw. 938/2009 Arch. CAG PIG, Warszawa.	2008	PGNiG S.A.	Gaz ziemny wysokometanowy	Złoże soli kamiennej Mechelinki w pokładach soli najstarszej (Werra)
13	Sylwestrzak U.	Dokumentacja geologiczna złoża soli kamiennej w północno-zachodniej części wysadu Mogilno "Mogilno II" w kat. C2+C1, gm. Mogilno, woj. Bydgoskie. Inw. 294/92 Arch. CAG PIG, Warszawa.	1991	PGNiG S.A. BG Geonafta	Gaz ziemny wysokometanowy	Złoże soli kamiennej (Mogilno II) w wysadzie solnym Mogilno
14	Werner Z.	Dokumentacja geologiczna złoża	1978	Centr. Urz. Geol., Warszawa	n.d. (przewidziana eksploatacja	Złoże soli kamiennej w

		soli kamiennej w kategorii C1 w rejonie Zatoki Puckiej, woj. Gdańskie. Inw. 13050 CUG Arch. CAG PIG, Warszawa.			soli kamiennej)	pokładach soli najstarszej (Werra) w rejonie Zatoki Puckiej/(wschodniej części)wyniesienia Łeby
15	Wichowska A.	Dodatek nr 3 do dokumentacji geologicznej złoża soli kamiennej "Mogilno I" w kat. rozpoznania C2+C1+B, miejscowość Przyjma, gmina Mogilno, powiat mogileński, woj. kujawsko-pomorskie. Inw. 3569/2014 Arch. CAG PIG, Warszawa.	2013	IKS Solino S.A.	n.d. (sól kamienna eksploatowana otworami w sąsiedztwie PMG)	Złoże soli kamiennej (Mogilno I) w wysadzie solnym Mogilno
16	Wichowska A.	Dodatek nr 6 do dokumentacji geologicznej złoża soli kamiennej "Góra", gm. Inowrocław, pow. inowrocławski, woj. kujawsko-pomorskie. Inw. 4605/2020 Arch. CAG PIG, Warszawa.	2020	Orlen/IKS Solino S.A.	Ropa i paliwa	Złoże soli kamiennej w wysadzie solnym Góra
17	Wojnar W., Wilkosz P., Grzybowski Ł., Korol K., Mierzejewski H., Derdowski R.	Dokumentacja geologiczno-inżynierska dla bezzbiornikowego magazynowania gazu ziemnego w złożu soli kamiennej "Mogilno II", woj. kujawsko-pomorskie. Inw. 66/2012 Arch. CAG PIG, Warszawa	2011	PGNiG S.A.	Gaz ziemny wysokometanowy	Złoże soli kamiennej (Mogilno II) w wysadzie solnym Mogilno

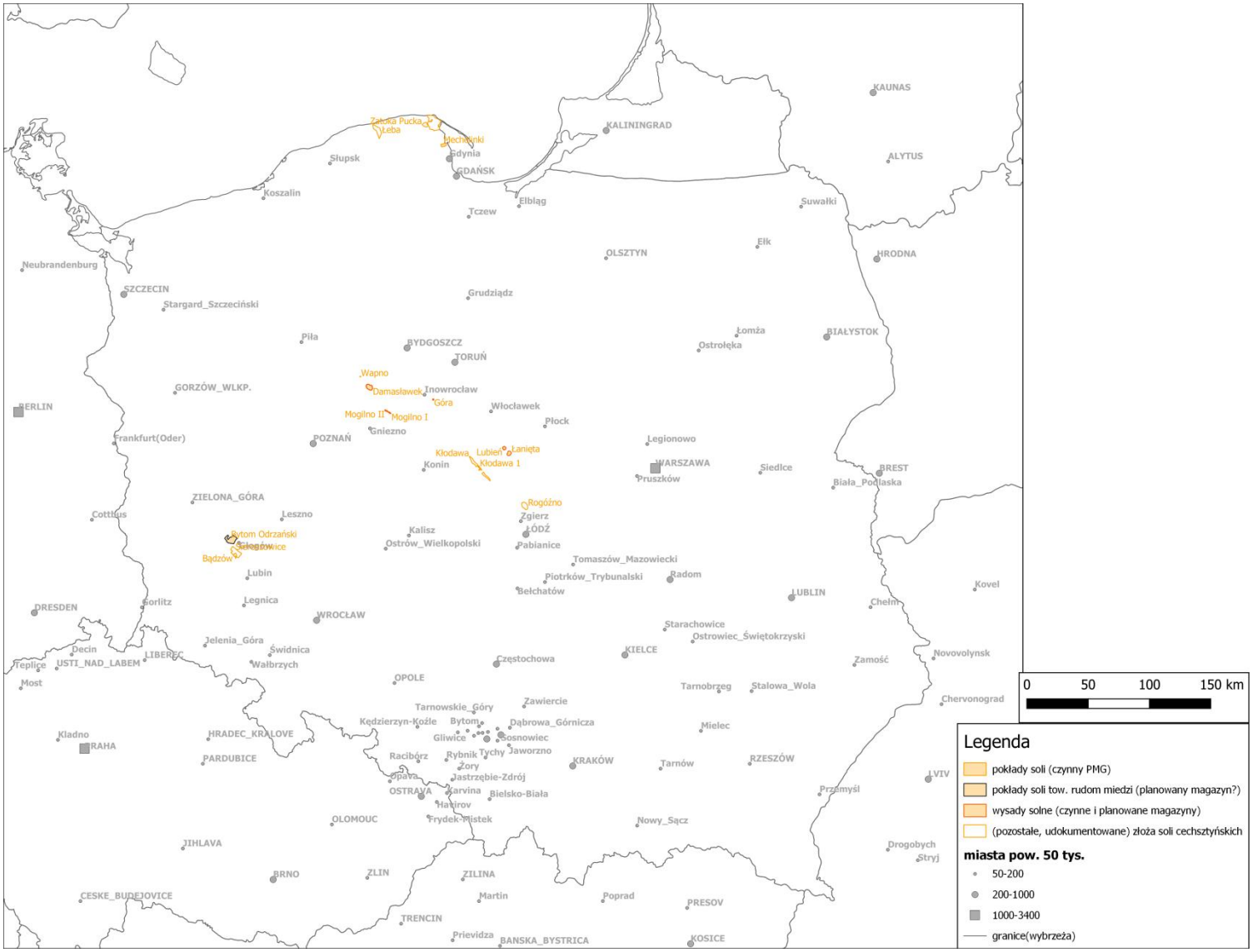


Fig. 1-4 Struktury solne (sole cechsztyńskie – udokumentowane złoża; na podstawie danych – Baza CBDG PIG-PIB, 2023; Baza MIDAS PIG-PIB, 2023)

1.2 Charakterystyka rozpatrywanych substancji a ich magazynowanie (składowanie)

(Marta Adamuszek)

W kawernach solnych i porowatych formacjach zbiornikowych możliwe jest przechowywanie różnorodnych substancji, obejmujących zarówno gazy jak i substancje chemiczne, w tym produkty naftowe, odpady przemysłowe oraz odpady radioaktywne. Te substancje mogą występować w postaci jednoskładnikowej bądź wieloskładnikowej. Niniejszy podrozdział prezentuje charakterystykę właściwości fizykochemicznych wybranych substancji gazowych tj. wodoru, gazu ziemnego, dwutlenku węgla oraz sprężonego powietrza, a także w omawia główne wyzwania związane z ich magazynowaniem (składowaniem).

1.2.1 Charakterystyka wybranych substancji

Właściwości wybranych substancji zostały przedstawione poniżej, a ich istotne cechy fizyczne i chemiczne prezentuje Tabela 1-7. Warto zauważyć, że te właściwości mogą zmieniać się w zależności od warunków panujących w środowisku, takich jak ciśnienie i temperatura.

Tabela 1-7 Właściwości fizyczne i chemiczne wybranych substancji magazynowych

Właściwości	Wodór (H_2)	Metan (CH_4)	Dwutlenek węgla (CO_2)	Sprężone powietrze
Masa molowa (g/mol)	2.016[1]	16.043[1]	44.01[1]	ok. 28.97
Gęstość (kg/m³, przy 0°C, 1 atm)	0.08375[1]	0.6682[1]	1.842[1]	ok. 1.225
Kolor	Bezbarwny	Bezbarwny	Bezbarwny	Bezbarwny
Zapach	Bezzapachowy	Bezzapachowy (dodaje się odoranty dla wykrycia wycieków)	Bezzapachowy	Bezzapachowy
Lepkość dynamiczna przy 20°C (10^{-5} Pa·s)	0.88[1]	1.10[1]	1.47[1]	ok. 1.81
Stała gazowa (J/kg·K)	4124.2[1]	518.28[1]	188.92[1]	ok. 287
Ciężar właściwy (powietrze = 1)	0.07[1]	0.55[1]	1.52[1]	1
Temperatura wrzenia (°C)	-252.87	-161.5	-78.5	-
Rozpuszczalność w wodzie (g/100 g)	0.00016[1]	0,0023[1]	0,169[1]	-
Temperatura krytyczna (°C)	-239.9[1]	-82.1[1]	31.1[1]	-
Ciśnienie krytyczne (bar)	13.13[1]	45.99[1]	73.83[1]	-
Wartość opałowa netto (MJ/kg)	120–141.7[1]	50–55.5[1]	-[1]	-
[1]Tarkowski i in., 2021				

Wodór (H_2)

Wodór, będąc najlżejszym i najprostszym pierwiastkiem chemicznym w układzie okresowym, ma symbol H i liczbę atomową 1. Jego jądro składa się z pojedynczego protonu, a w jego najczęściej występującej formie nie posiada neutronów, co czyni go wyjątkowym pod względem struktury atomowej. Wodór występuje głównie w postaci dwuatomowej (H_2), co umożliwia mu unikatowe właściwości, takie jak niska gęstość, wysoka reaktywność chemiczna i zdolność do przenoszenia protonów, co ma kluczowe znaczenie w wielu reakcjach chemicznych i biologicznych.

Jako gaz, wodór jest bezbarwny i bezwonny, co utrudnia jego wykrycie bez użycia specjalistycznych narzędzi. Ma bardzo niską gęstość (0,084 g/m^3 przy 0°C i 1 atm.), co czyni go znacznie lżejszym od powietrza. Wodór ma również wyjątkowe właściwości termiczne, takie jak wysoka przewodność cieplna i duża pojemność cieplna, co pozwala na jego wykorzystanie w różnych zastosowaniach przemysłowych, w tym jako środek chłodzący w generatorach.

W kontekście fizykochemicznym, wodór wykazuje zarówno właściwości redukujące, jak i utleniające, co zależy od warunków, w jakich jest stosowany. W warunkach standardowych jest to silny reduktor, co oznacza, że łatwo oddaje elektrony innym substancjom. Jego zdolność do łatwego przechodzenia w stan jonowy (H^+) ma fundamentalne znaczenie dla kwasów i zasad w chemii. Wodór znajduje zastosowanie w hydrolizie, a także jako paliwo w ogniwach paliwowych, gdzie jego spalanie produkuje tylko wodę, co czyni go atrakcyjnym źródłem energii o niskiej emisji. Ze względu na jego wysoką reaktywność, wodór musi być przechowywany i transportowany z zachowaniem szczególnych środków ostrożności, aby uniknąć ryzyka wybuchu.

Gaz ziemny

Użytkowy gaz ziemny składa się z metanu (CH_4) z domieszkami innych węglowodorów, takich jak etan, propan i butan, oraz niekiedy niewielkich ilości azotu, dwutlenku węgla, siarkowodoru i helu. Jako mieszanka gazowa jest bezbarwny i zazwyczaj bezwonny (wszelkie zapachy są dodawane celowo, aby umożliwić wykrywanie potencjalnych wycieków). Charakteryzuje się wysoką wartością opałową, co oznacza, że może wygenerować znaczną ilość energii cieplnej przy spalaniu. Spalanie gazu ziemnego emituje znacznie mniej dwutlenku węgla na jednostkę wyprodukowanej energii niż węgiel lub ropa naftowa, a także niewiele zanieczyszczeń w postaci siarki i azotu.

Fizykochemiczne właściwości gazu ziemnego sprawiają, że jest on stosunkowo łatwy w transporcie i przechowywaniu. Jego niska gęstość w stanie gazowym pozwala na efektywne przesyłanie na duże odległości. Ponadto, jego skroplona forma, znana jako LNG, zapewnia dodatkową elastyczność w zakresie transportu, szczególnie drogą morską.

Wydobycie i wykorzystanie gazu ziemnego, niesie za sobą wyzwania środowiskowe, w tym ryzyko wycieków metanu, czyli potężnego gazu cieplarnianego. Z tego powodu, choć gaz ziemny jest postrzegany jako "paliwo przejściowe" na drodze do bardziej zrównoważonego systemu energetycznego, jego rola w długoterminowej transformacji energetycznej jest przedmiotem trwającej debaty.

Dwutlenek węgla (CO_2)

Dwutlenek węgla (CO_2) to gaz cieplarniany, który odgrywa kluczową rolę w regulacji temperatury na Ziemi przez zjawisko znanego jako efekt cieplarniany. Jest to bezbarwny gaz o niewielkim zapachu przy normalnych stężeniach, natomiast w wyższych stężeniach może wykazywać słaby, kwaśny zapach. CO_2 jest produktem ubocznym spalania paliw kopalnych, takich jak węgiel, ropa naftowa i gaz ziemny, a także procesu oddychania żywych organizmów i procesów fermentacji. Znajduje się również w naturalnych rezerwuarach, takich jak wody podziemne, wulkany i gorące źródła.

Pod względem fizykochemicznym, CO_2 jest stosunkowo stabilnym związkiem chemicznym, który może istnieć w trzech stanach skupienia: gazowym, ciekłym oraz stałym (suchy lód, gdy jest zamrażany bezpośrednio z fazy gazowej przy temperaturach poniżej -78,5°C). Dwutlenek węgla rozpuszcza się w wodzie, tworząc słaby kwas węglowy (H_2CO_3), co ma istotne znaczenie dla równowagi chemicznej w środowiskach wodnych i procesach biologicznych, takich jak fotosynteza.

Jednym z ważnych zastosowań CO_2 w przemyśle jest użycie w produkcji napojów gazowanych, jako środek chłodzący (suchy lód) i w technologiach związanych z gaszeniem pożarów. Ponadto, CO_2 wykorzystuje się do wspomagania wydobycia ropy naftowej przez iniekcję do złoża, co pomaga w wypieraniu ropy naftowej na powierzchnię.

Mimo swoich zastosowań, CO_2 jest również przedmiotem intensywnych badań i debat z powodu jego wpływu na zmiany klimatu. Jako jeden z głównych gazów cieplarnianych emitowanych przez działalność ludzką, CO_2 przyczynia się do globalnego ocieplenia poprzez zatrzymywanie ciepła w atmosferze ziemskiej. To z kolei prowadzi do zmian klimatycznych, które mają szeroki zakres negatywnych skutków na środowisko naturalne i społeczeństwa na całym świecie.

W obliczu wyzwań klimatycznych, znacząca część badań i inicjatyw technologicznych skupia się na redukcji emisji CO_2 oraz opracowaniu metod jego sekwestracji, aby zmniejszyć jego stężenie w atmosferze. Metody te obejmują technologie wychwytywania i składowania dwutlenku węgla (CCS), ulepszanie naturalnych pochłaniaczy CO_2, takich jak lasy i oceany, oraz rozwój technologii konwersji CO_2 na użyteczne produkty, co otwiera nowe możliwości dla zrównoważonego zarządzania tym gazem.

Sprężone powietrze

Sprężone powietrze, będące jednym z najbardziej wszechstronnych nośników energii w przemyśle, to powietrze atmosferyczne, które zostało skompresowane do ciśnienia wyższego niż ciśnienie atmosferyczne. W procesie wykorzystuje się powietrze, czyli mieszaninę gazów składających się głównie z azotu (około 78%) i tlenu (około 21%), z niewielkimi ilościami argonu, dwutlenku węgla, pary wodnej i innych gazów śladowych. Sprężone powietrze jest niezwykle przydatne w wielu aplikacjach przemysłowych dzięki swojej czystości, elastyczności, łatwości transportu i przechowywania.

Fizykochemiczne właściwości sprężonego powietrza, takie jak jego zdolność do przechowywania energii i szybkiego uwalniania w formie pracy mechanicznej, są wykorzystywane w różnorodnych zastosowaniach przemysłowych. Dzięki temu, że jest niepalne i bezpieczne w wielu środowiskach, stanowi ono atrakcyjną alternatywę dla innych źródeł energii, szczególnie w warunkach wymagających wysokiej czystości procesowej lub bezpieczeństwa.

Mimo swojej wszechstronności, sprężone powietrze wiąże się z pewnymi wyzwaniami, takimi jak straty energii podczas sprężania i rozprężania, kondensacja wody, która może prowadzić do korozji systemów pneumatycznych, oraz konieczność usuwania zanieczyszczeń, aby zapewnić czystość powietrza dla konkretnych zastosowań. Dlatego też, systemy sprężonego powietrza wymagają starannego projektowania, w tym odpowiedniej filtracji, osuszania oraz regularnego konserwacji, aby zapewnić ich efektywność i długotrwałe działanie.

W ostatnich latach rośnie zainteresowanie efektywnością energetyczną w zakresie wykorzystania sprężonego powietrza, co skutkuje rozwojem bardziej zaawansowanych technologii i inteligentnych systemów zarządzania, które zmniejszają zużycie energii i koszty operacyjne. Dzięki tym innowacjom, sprężone powietrze pozostaje kluczowym elementem wspierającym zrównoważony rozwój i efektywność w przemyśle.

1.2.2 Główne wyzwania związane z magazynowaniem wybranych substancji

Każdy z omawianych gazów: wodór, metan, dwutlenek węgla i sprężone powietrze posiada unikalne właściwości, co wiąże się z różnymi wyzwaniami przy ich podziemnym magazynowaniu (składowaniu). Poniżej przedstawiono główne wyzwania związane z magazynowaniem tych czterech substancji.

Wodór (H_2)

Magazynowanie wodoru pod ziemią stanowi wyjątkowe wyzwanie ze względu na jego unikalne właściwości fizykochemiczne. Jako najlżejszy pierwiastek, wodór charakteryzuje się wysoką przenikalnością, co oznacza, że łatwo przenika przez wiele materiałów, zwiększając ryzyko wycieków z magazynów podziemnych. To zjawisko wymaga stosowania specjalnie zaprojektowanych materiałów, które mogą skutecznie zatrzymać wodór, jednocześnie zapewniając jego bezpieczeństwo.

Dodatkowym wyzwaniem jest niska gęstość energetyczna wodoru w stanie gazowym, co sprawia, że do jego skutecznego transportu i magazynowania potrzebne są albo ekstremalnie niskie temperatury, rzędu -253°C, aby skroplić gaz, albo bardzo wysokie ciśnienia, dochodzące do 700 barów, aby zmaksymalizować ilość magazynowanej energii w danej objętości. Oba te podejścia pociągają za sobą znaczne wyzwania technologiczne i kosztowe, a także wymagają szczególnych środków ostrożności ze względu na potencjalne ryzyko związane z ekstremalnymi warunkami operacyjnymi.

Bezpieczeństwo stanowi kluczowy aspekt podziemnego magazynowania wodoru. Ze względu na wysoką palność wodoru i zdolność do tworzenia mieszanin wybuchowych z powietrzem, systemy magazynowania muszą być zaprojektowane tak, aby minimalizować ryzyko wycieku i zapewnić odpowiednie systemy wykrywania i zapobiegania wybuchom. Pomimo że wodór uważany jest za paliwo czyste, potencjalne wycieki mogą mieć nieprzewidziane skutki dla ekosystemów podziemnych, w tym na jakość wód gruntowych. Ponadto, wodór wpływa na korozję materiałów konstrukcyjnych (tzw. kruchość wodorowa), co oznacza, że materiały użyte do konstrukcji zbiorników czy infrastruktury muszą być odpowiednio dobrane, aby zapobiec uszkodzeniom strukturalnym.

Gaz ziemny

W przeciwieństwie do wodoru, gęstość energetyczna gazu ziemnego umożliwia efektywniejsze magazynowanie i transport, co przekłada się na niższe koszty logistyczne i większą efektywność całego łańcucha dostaw. Jego zdolność do zapewnienia stałych i elastycznych dostaw energii czyni go niezastąpionym elementem w zapewnieniu bezpieczeństwa energetycznego, szczególnie w obliczu fluktuacji popytu na rynkach energetycznych.

Bezpieczeństwo w procesie magazynowania i dystrybucji gazu ziemnego jest jednak kwestią priorytetową. Palność metanu, głównego składnika gazu ziemnego, w połączeniu z jego zdolnością do tworzenia eksplozyjnych mieszanin z powietrzem, wymaga zastosowania zaawansowanych systemów bezpieczeństwa i monitoringu.

Ponadto, czystość gazu ziemnego jest istotna zarówno dla jego wartości energetycznej, jak i dla zapobiegania korozji w systemach magazynowania i transportu. Zanieczyszczenia, takie jak woda, siarkowodór czy dwutlenek węgla, mogą prowadzić do korozji materiałów i infrastruktury, co nie tylko zwiększa koszty utrzymania, ale również stwarza dodatkowe ryzyko awarii i wycieków.

Dwutlenek węgla

Dwutlenek węgla jest składowany głównie w celu sekwestracji, często w ramach wspomagania wydobycia ropy naftowej. Kluczową technologią w tym procesie jest wykorzystanie stanu nadkrytycznego CO_2, który występuje przy odpowiednio wysokich ciśnieniach i temperaturach, pozwalając na przechowywanie dwutlenku węgla w formie zbliżonej do płynnej. Stan ten zapewnia większą gęstość CO_2 niż w stanie gazowym, co umożliwia efektywniejsze wykorzystanie dostępnej przestrzeni magazynowej.

Monitorowanie szczelności zbiorników jest niezbędne w procesie sekwestracji CO_2, aby zapewnić, że przechowywany gaz nie przedostaje się poza składowisko. Wycieki CO_2 nie tylko zniweczą cele sekwestracji, ale mogą również stwarzać ryzyko dla zdrowia ludzkiego i środowiska naturalnego, szczególnie jeśli gromadzenie się gazu w wyższych stężeniach miałoby miejsce w sąsiedztwie obszarów zamieszkałych.

Potencjalny wpływ na wody gruntowe i lokalne środowisko geologiczne jest kolejnym ważnym aspektem podziemnego magazynowania CO_2. Interakcje między zmagazynowanym CO_2 a wodami podziemnymi mogą prowadzić do zakwaszenia wód gruntowych, co z kolei może wpływać na jakość wody pitnej oraz ekosystemy zależne od tych zasobów wodnych.

Sprężone powietrze

Sprężone powietrze, wykorzystywane jako forma magazynowania energii, pozwala na akumulację energii w okresach niskiego zapotrzebowania i jej uwalnianie w momencie wzmożonego popytu. Mechanizm ten opiera się na sprężaniu powietrza do wysokiego ciśnienia w podziemnych zbiornikach, a następnie na wykorzystaniu energii zgromadzonej w sprężonym powietrzu poprzez jego ekspansję. Jedną z głównych zalet tej technologii jest jej neutralność dla środowiska, szczególnie w kontekście potencjalnych wycieków. W przeciwieństwie do paliw kopalnych czy gazów cieplarnianych, uwolnione do atmosfery sprężone powietrze nie przyczynia się do zanieczyszczenia

ani efektu cieplarnianego, co czyni tę metodę przyjazną dla środowiska alternatywą dla tradycyjnych form magazynowania energii.

Niemniej jednak, wykorzystanie sprężonego powietrza jako medium do magazynowania energii nie jest pozbawione wyzwań. Procesy sprężania i ekspansji są z natury nie w pełni efektywne energetycznie, co oznacza, że część energii jest tracona w formie ciepła. Dlatego rozwój technologii odzyskiwania ciepła i poprawa ogólnej efektywności systemów magazynowania sprężonego powietrza są kluczowymi obszarami badawczymi.

2. Opracowanie modeli numerycznych do badań geomechanicznych związanych ze stabilnością i szczelnością kawern w złożach pokładowych soli cechsztyńskich

Jak to zasygnalizowano we Wstępie, w niniejszym rozdziale dokonano krótkiego omówienia i podsumowania prac scharakteryzowanych szczegółowo w **Tomie II – problematyka magazynowania substancji w kawernach w pokładach soli cechsztyńskich**, odnoszących się zakresu i celów podzadania 2 Karty informacyjnej zadania.

W rozdziale **1** (Wstęp) **Tomu II** przedstawiono ogólnie problematykę magazynowania substancji w kawernach solnych, w szczególności wodoru oraz uzasadnienie wyboru obszaru wyniesienia Łeby jako miejsca do typowania lokalizacji takich kawern, a także scharakteryzowano cele i zakres prac wykonanych w ramach **Tomu II**.

Następnie w rozdziale **2** przedstawiono, w oparciu o dostępne publikacje, wybrane zagadnienia z zakresu właściwości geomechanicznych skał ze szczególnym uwzględnieniem właściwości soli kamiennej, tzn. podstawowe parametry charakteryzujące właściwości geomechaniczne skał, modele reologiczne skał (proste i złożone) i ich wzajemne relacje, wyniki badań laboratoryjnych parametrów mechanicznych skał oraz procesy, które zachodzą w strukturze krystalicznej skały podczas jej deformacji.

Natomiast w rozdziale **3** skupiono się na scharakteryzowaniu, w oparciu o dostępną literaturę przedmiotu, właściwości reologicznych soli kamiennej, w tym rozmaitych modeli i mechanizmów pełzania związanych z odkształcaniem pokładów soli kamiennej (co obejmowało też, w zależności od modelu, wpływ wielkości ziaren soli kamiennej), a następnie opisu fenomenologicznego reologii soli kamiennej uzupełnionego o obserwacje z analiz laboratoryjnych i makroskopowe struktur solnych (z natury).

W rozdziale **4** omówiono, w oparciu o dostępne publikacje, reaktywność rozmaitych związków chemicznych występujących w soli kamiennej z wodorem, tzn. siarczanów (w szczególności anhydrytu – powstaje siarkowodór i woda), węglanów i dwutlenku węgla (powstaje metan i woda przy obecności mikroorganizmów), związków żelaza (powstaje hematyt i woda) i substancji bitumicznych (metan, ewentualnie siarkowodór) – generalnie w przypadku lokalizacji kawern na rozpatrywanym obszarze wyniesienia Łeby ryzyka te są pomijalne, o ile nie występują tam bakterie „konsumujące" wodór.

W rozdziale **5** omówiono, na podstawie literatury przedmiotu, zagadnienia posadowienia, geometrii i pojemności kawern, w tym czynniki wpływające na te wielkości w przypadku pokładów soli i wysadów solnych (forma i miąższość, głębokość występowania, wielkość ziaren halitu, domieszki minerałów ilastych i anhydrytu, przewarstwienia skalne), przeanalizowano geometrię i objętości typowych kawern oraz kwestie zaciskania kawern w trakcie ich eksploatacji. Scharakteryzowano parametry operacyjne kawern takie jak ciśnienie magazynowe substancji, pojemność i dostarczalność gazu, zalecany odstęp między kawernami w pokładzie soli, a także rekomendacje, jeśli chodzi o parametry geometryczne i operacyjne kawern oraz obszarów magazynowych.

Rozdział **6** obejmował charakterystykę, na podstawie publikacji i opracowań archiwalnych, utworów ewaporatowych cechsztynu na obszarze Polski, co zostało omówione bardziej szczegółowo dla rejonu wyniesienia Łeby, w szczególności, jeśli chodzi o najbardziej perspektywiczne dla lokalizacji kawern magazynowych utwory najstarszej soli kamiennej, ich wykształcenie facjalne i omówiono udokumentowane złoża soli kamiennej w rejonie wyniesienia Łeby.

Rozdział **7** dotyczył interpretacji zdjęcia sejsmicznego 3D Opalino-Lubocino pod kątem występowania poligonalnych grzbietów najstarszego anhydrytu dolnego, które zaburzają warstwę soli najstarszej oraz przeanalizowania ich możliwej genezy - obszary tych grzbietów nie są rekomendowane do lokalizacji kawern magazynowych, rekomendowane są obszary pomiędzy nimi (panwie solne). Wskazano w rozpatrywanym rejonie (wschodniej części) wyniesienia Łeby na możliwość występowania takich struktur w obszarach poza zdjęciem sejsmicznym 3D, w oparciu o interpretację rezydualnych anomalii grawimetrycznych i profili sejsmicznych.

Rozdział **8** obejmował opracowanie modeli strukturalnych na rozpatrywanym obszarze wyniesienia Łeby, w oparciu o zebrane dane sejsmiczne i dostępne informacje z otworów nawiercających sole cechsztyńskie w tym rejonie. Interpretacja danych sejsmicznych obejmowała określenie stropu i spągu najstarszej soli kamiennej, w domenie czasowej, później głębokościowej po dowiązaniu do otworów. Sporządzono mapy stropu, spągu i miąższości pokładu najstarszej soli kamiennej w wariancie wykorzystującym tylko dane z otworów oraz w wariancie opartym na interpretacji danych otworowych i sejsmicznych. Opracowano mapę przedstawiającą strefy dostępne, prawdopodobnie dostępne i niedostępne dla lokalizacji kawern magazynowych (te ostatnie z uwagi na występowanie obszarów ścisłej ochrony przyrody, zagospodarowanie powierzchni i duże zbiorniki wodne). Ponadto opracowane mapy miąższości pokładu najstarszej soli kamiennej porównano analogicznymi mapami z wcześniejszych opracowań. Zestawiono do bazy dane dotyczące głębokości zalegania stropu, spągu oraz miąższości warstwy najstarszej soli kamiennej w otworach znajdujących się na obszarze objętym szczegółową analizą (z wyłączeniem danych pochodzących z bieżącego dokumentowania przebiegu prac geologicznych).

W rozdziale **9** określono potencjał magazynowy dla wodoru w pokładzie najstarszej soli kamiennej w rejonie wyniesienia Łeby w oparciu o mapy miąższości opracowane w rozdziale 8 oraz parametry geometryczne i operacyjne kawern oraz obszarów magazynowych (i związane z tym kryteria) omawiane w rozdziale 5. Porównano to z wynikami wcześniejszych opracowań w tym zakresie i wyznaczono strefę najbardziej perspektywiczną do lokalizacji kawern magazynowych w NE części wyniesienia Łeby.

W rozdziale **10** wyznaczono w obrębie strefy w NE części wyniesienia Łeby cztery obszary najbardziej perspektywiczne dla lokalizacji kawern magazynowych (dla wodoru) gdzie miąższości pokładu najstarszej soli kamiennej są odpowiednio wysokie, brak jest grzbietów anhydrytowych oraz obszarów ścisłej ochrony przyrody i obszarów zabudowanych. Scharakteryzowano szczegółowo te obszary. Zarekomendowano otwory, które mogłyby odpowiadać orientacyjnej lokalizacji przyszłych kawern i zespołów magazynowych oraz porównano przygotowane propozycje z wcześniejszymi opracowaniami.

W rozdziale **11** przedstawiono, w oparciu o dostępne publikacje i opracowania archiwalne geomechaniczną charakterystykę złóż ewaporatowych w rejonie wyniesienia Łeby, w szczególności parametrów dla soli kamiennej w rejonie wyniesienia Łeby, soli cechsztyńskich z innych rejonów

Polski, basenu permskiego w Europie oraz innych formacji solnych na świecie (parametry sprężyste i wytrzymałościowe, plastyczne i lepkie) na potrzeby dalszego ich wykorzystania (jako modeli parametrycznych), wraz modelami strukturalnymi w ramach badań i modelowań stabilności i szczelności kawern.

W rozdziale **12** analizowano zagadnienia szczelności i stateczności kawern solnych (tzn. odporności kawerny na uszkodzenia mechaniczne, które mogą prowadzić do utraty szczelności oraz jej zdolności do zachowywania pierwotnego kształtu i objętości). Związane z tym było zestawienie kryteriów szczelności i stateczności kawern odnoszących się do następujących parametrów: przemieszczenia, dylatancji, konwergencji i plastyczności, dla których podano, w oparciu o dostępną literaturę przedmiotu, krytyczne wartości tych parametrów.

Na potrzeby oceny ewentualnych zagrożeń dla użytkowych poziomów wodonośnych w związku z budową i eksploatacją kawern magazynowych w rozpatrywanym rejonie wyniesienia Łeby w rozdziale **13** przeanalizowano dla tego obszaru, w oparciu o dostępne publikacje i opracowania archiwalne, warunki hydrogeologiczne, tzn. występowanie użytkowych wód podziemnych (JCWP, GZWP). Scharakteryzowano przy tym poszczególne piętra wodonośne od czwartorzędu po perm i przeanalizowano możliwości ewentualnej migracji wzdłuż lokalnych i regionalnych stref uskokowych solanek do poziomów wód użytkowych oraz występowania niedostatecznej izolacji pomiędzy poziomami wodonośnymi charakteryzującymi się wysoką mineralizacją a użytkowymi poziomami wodonośnymi. Przeanalizowano też ewentualne zagrożenia dla wód użytkowych wiążące się z eksploatacją kawern solnych.

Z kolei w rozdziale **14** sporządzono, w oparciu o dostępne publikacje i opracowania archiwalne, jako uzupełnienie do poprzedniego rozdziału, charakterystykę hydrogeochemiczną występujących w rejonie wyniesienia Łeby pięter wodonośnych, gdzie występują wody podziemne charakteryzujące się znaczącą mineralizacją, tzn. w obrębie utworów mezozoiku oraz paleozoiku (pod solami cechsztyńskimi). Wynikiem tego była ocena jakości izolacji poziomów wodonośnych charakteryzujących się znaczącą mineralizacją.

W rozdziale **15** przedstawiono model numeryczny, który został następnie wykorzystany do badań stabilności i szczelności kawern solnych. Zaadaptowano i rozwinięto przy tym modele i kody numeryczne wcześniej stworzone w ramach innych przedsięwzięć i publikacji. Weryfikacja poprawności implementacji kodów numerycznych została przeprowadzona za pomocą czterech szczegółowo zaprojektowanych benchmarków, z których każdy charakteryzuje się unikalną geometrią i zestawem warunków brzegowych – analizowano naprężenia w obrębie modelu kawerny dla różnych rozkładów przyłożonego ciśnienia, w obrębie otworu w modelu kawerny oraz naprężenie wokół inkluzji w pokładzie soli.

W rozdziale **16** przedstawiono wyniki modelowania numerycznego stabilności i szczelności kawern solnych zlokalizowanych w wybranych (4) otworach w obrębie każdego z czterech wytypowanych obszarów perspektywicznych, dla których wcześniej opracowano modele strukturalno-parametryczne. W modelach dla każdej lokalizacji przyjęto, że kawerna zlokalizowana jest w pokładzie soli, którą przykrywa miąższa warstwa nadkładu. Zostały uwzględnione w modelach takie parametry geomechaniczne jak naprężenia pionowe (wpływ nadkładu) i lepkość soli (zależna od temperatury i uziarnienia), a ponadto uwzględniono ciśnienie gazu w kawernie oraz geometrię kawerny i wielkość domeny modelu numerycznego. Dla obszarów wokół każdej z kawern

zilustrowano tempo przemieszczeń soli i naprężenia efektywne oraz wpływ nadkładu, lepkości soli, ciśnienia gazu oraz różnych wariantów geometrii kawerny w obrębie pokładu soli.

3. Określenie kryteriów oceny stabilności i szczelności kawern oraz opracowanie wskazówek dla wyboru lokalizacji nowych magazynów w kawernach solnych

Jak to zasygnalizowano we Wstępie, w niniejszym rozdziale dokonano krótkiego omówienia i podsumowania prac scharakteryzowanych szczegółowo w **Tomie II – problematyka magazynowania substancji w kawernach w pokładach soli cechsztyńskich**, odnoszących się zakresu i celów podzadania 3 Karty informacyjnej zadania.

Zasadniczo wspólny dla podzadań 2 i 3 Karty informacyjnej zadania jest rozdział **16 Tomu II**, gdzie przedstawiono wyniki modelowania numerycznego stabilności i szczelności kawern solnych zlokalizowanych w wybranych (4) otworach w obrębie każdego z czterech wytypowanych obszarów perspektywicznych, dla których wcześniej opracowano modele strukturalno-parametryczne. W modelach dla każdej lokalizacji przyjęto, że kawerna zlokalizowana jest w pokładzie soli, którą przykrywa miąższa warstwa nadkładu. Zostały uwzględnione w modelach takie parametry geomechaniczne jak naprężenia pionowe (wpływ nadkładu) i lepkość soli (zależna od temperatury i uziarnienia), a ponadto uwzględniono ciśnienie gazu w kawernie oraz geometrię kawerny i wielkość domeny modelu numerycznego. Dla obszarów wokół każdej z kawern zilustrowano tempo przemieszczeń soli i naprężenia efektywne oraz wpływ nadkładu, lepkości soli, ciśnienia gazu oraz różnych wariantów geometrii kawerny w obrębie pokładu soli.

Wyniki te pozwoliły następnie wyznaczyć finalne kryteria oceny parametrów geometrycznych kawerny, parametrów mechanicznych skał oraz parametrów operacyjnych, które mają szczególny wpływ na stabilność i szczelność kawern w rejonie wyniesienia Łeby.

W rozdziale **17** dokonano podsumowania wykonanych prac w ramach niniejszego przedsięwzięcia prac dotyczących problematyki magazynowania substancji (w szczególności wodoru) w kawernach w pokładach soli cechsztyńskich. Dotyczyły one analiz możliwości magazynowania w miąższym pokładzie najstarszej soli kamiennej na obszarze wyniesienia Łeby. W rezultacie tych analiz na obszarze NE części wyniesienia Łeby zostały wyznaczone (w oparciu o mapy miąższości pokładu soli sporządzone na podstawie danych otworowych, interpretacji danych sejsmicznych 2D oraz dostępnych informacji na temat parametrów soli kamiennej i kawern), cztery obszary najbardziej perspektywiczne pod kątem lokowania kawern. Przy wyznaczaniu obszarów uwzględniono zagospodarowanie terenu, formy ochrony przyrody i możliwe konflikty interesów. Istotnym wkładem do interpretacji miąższości soli Na1 są analizy występowania w podłożu pokładu soli skomplikowanego systemu wąskich poligonalnych grzbietów anhydrytowych ograniczających panwie solne o rozmiarach rzędu 1-2 km, gdzie mogą być korzystne warunki do lokowania kawern (a nie w obrębie grzbietów, gdzie pokład soli może nawet zanikać). Wykonano takie analizy w oparciu o dostępną sejsmikę 3D w strefie na południe od wytypowanych obszarów perspektywicznych, dla których postuluje się wykonanie analogicznych badań sejsmicznych.

Wskazówki dotyczące wyboru lokalizacji pod budowę podziemnych magazynów w obrębie wytypowanych obszarów w rejonie wyniesienia Łeby obejmowały kryteria głębokości występowania i miąższości pokładu soli, występowania i miąższości przewarstwień w jego obrębie, obecności uskoków i struktur tektonicznych oraz stopnia zanieczyszczenia soli (domieszek). Ponadto

zarekomendowano wybór i ranking lokalizacji w oparciu o ocenę potencjału magazynowego, gdzie obok parametrów pokładu soli uwzględnia się także parametry geometryczne i operacyjne kawern. Dzięki temu, inwestorzy i decydenci mogą dokonać wyboru lokalizacji, która najlepiej spełnia zarówno kryteria geologiczne, jak i operacyjne, maksymalizując efektywność i rentowność inwestycji, uwzględniając powyższe informacje a następnie wykonane przez nich dalsze badania i analizy w zakresie wykonalności i oceny bezpieczeństwa projektowanego magazynu.

Samą analizę stabilności i szczelności kawern solnych wykonano w oparciu o omawiane w rozdziale **16** wyniki modelowania numerycznego. Przeanalizowano, pod kątem wskazówek dla potencjalnych inwestorów, wpływ różnych parametrów geometrycznych, mechanicznych i operacyjnych na tempa deformacji wokół kawern oraz naprężeń efektywnych, które stanowią kluczowe narzędzie do oceny stabilności i szczelności kawern. Badania te podkreśliły znaczenie trzech głównych czynników: (1) lepkości soli, wpływającej m.in. na tempo zaciskania kawern, gdzie istotna też może być obecność przewarstwień anhydrytu; (2) ciśnienia w kawernie, co może mieć wpływ na integralność strukturalną kawern oraz ew. deformacje i ryzyko utraty szczelności; (3) geometrii kawerny, co ma wpływ na rozkład naprężeń wokół kawerny i utrzymanie jej integralności strukturalnej (najbardziej optymalna jest kawerna rozszerzająca się ku dołowi, z zaokrąglonymi brzegami).

Jeśli chodzi o wybór lokalizacji pod budowę podziemnych magazynów w obrębie wytypowanych obszarów w rejonie wyniesienia Łeby to ponadto zarekomendowano wykonanie na rozpatrywanych obszarach perspektywicznych badań geofizycznych w tym w szczególności sejsmiki 3D, pozwalającej na ewentualną lokalizację wałów anhydrytowych. Jednocześnie wskazano na konieczność wykonania większej ilości badań mechanicznych na próbach soli, zwłaszcza prób pełzania oraz analiz na obecność zanieczyszczeń w obrębie soli, a także wielkości kryształów (szczegółowe badania petrograficzne i mikrostrukturalne).

Ponadto podkreślono potrzebę opracowania modeli numerycznych (dynamicznych) kawern symulujących ich eksploatację oraz kontynuacji badań w zakresie wpływu mechanicznej niejednorodności ośrodka skalnego na stabilność i szczelność kawern solnych na obszarze wyniesienia Łeby i innych perspektywicznych rejonów kraju, w ramach zadań PSG. Zaleca się przy tym rozwijanie własnych kodów numerycznych, co umożliwia lepsze rozumienie modelowanych zjawisk, łatwe rozszerzanie funkcjonalności kodów o nowe procesy i wiarygodną weryfikację modeli w oparciu o dane zewnętrzne.

W ramach podzadania przeprowadzono także liczne konsultacje naukowe podczas konferencji oraz pracowano nad publikacjami naukowymi, co zostało omówione w rozdziale **9.2** niniejszego sprawozdania.

4. Wykonanie nowych analiz laboratoryjnych i profilowań rdzeni dla struktur solankowych w utworach kredy

4.1 Wstęp

(Krzysztof Leszczyński)

Niniejsze opracowanie jest próbą oceny jakości regionalnego uszczelnienia węglanowego i węglanowo-krzemionkowego sekwencji górnej kredy wraz z albem górnym w centralnej Polsce. W tym celu wybrano 11 otworów wiertniczych: Banachów IG1, Gostynin IG1/1A, Gostynin IG4, Grudziądz IG1, Koło IG3, Koło IG4, Poddębice IG1, Poddębice PIG2, Polik IG1, Strzelno IG1 i Żychlin IG3. W ramach realizowanych prac wykonano:

- ogólną charakterystykę litologiczną, stratygraficzną i sedymentologiczną sekwencji na podstawie danych archiwalnych i weryfikacyjnych profilowań litologicznych oraz profilowań sedymentologicznych fragmentów rdzeni,

- kwerendę danych archiwalnych dotyczących węglanowości (zawartość $CaCO_3$), porowatości i przepuszczalności skał,

- profilowania strukturalne rdzeni,

- profilowania podatności magnetycznej skał (ręcznym podatnościomierzem) oraz promieniowania gamma (spektrometrem polowym) celem identyfikacji m. in. zailonych przewarstwień oraz korelacji z profilowaniem gamma z geofizyki otworowej,

- badania petrograficzne, petrofizyczne i XRD (w tym badania mikroszczelinowatości skał).

Poniższe rozdziały przedstawiają wyniki tych prac oraz wstępną ocenę jakości uszczelnienia węglanowego i węglanowo-krzemionkowego górnej kredy wraz z albem górnym.

4.2 Litologia i stratygrafia, oraz sedymentologia wybranych fragmentów rdzeni w kredzie górnej (z albem górnym)

(Krzysztof Leszczyński)

Analizie została poddana sekwencja górnej kredy (łącznie z albem górnym) w centralnej Polsce w następujących 11 otworach wiertniczych niecki mogileńsko-uniejowskiej i niecki brzeżnej (płockiej): Banachów IG1, Gostynin IG1/1A, Gostynin IG4, Grudziądz IG1, Koło IG3, Koło IG4, Poddębice IG1, Poddębice PIG2, Polik IG1, Strzelno IG1 i Żychlin IG3. Znajdują się one w granicach administracyjnych województw kujawsko-pomorskiego, łódzkiego, mazowieckiego i wielkopolskiego. Ich lokalizację na tle mapy geologicznej bez utworów kenozoiku przedstawia Fig. 4-1. Otwory te wytypowano między innymi ze względu na dostępność materiału rdzeniowego. Marsze rdzeniowe są w kilku z nich stosunkowo liczne, a rdzeń zwykle zachowany w stanie nadającym się do przeprowadzenia badań, mimo że wiercenia te wykonywane były już dość dawno: najstarsze otwory odwiercono na początku lat 1960-tych (Żychlin IG1 – 1960, Gostynin IG4 – 1961), a najmłodszym wierceniem jest Poddębice PIG2 wykonane w roku 1992. Na ogół jednak kreda górna w otworach wiertniczych była rdzeniowana w bardzo ograniczonym zakresie. Wykonywane były przeważnie jedynie kontrolne marsze rdzeniowe co kilkadziesiąt metrów albo jeszcze rzadziej. W części otworów górna kreda nie była w ogóle rdzeniowana. Dotyczy to głównie wielu otworów przemysłu naftowego.

Obok materiału rdzeniowego, na którym wykonano uzupełniające weryfikacyjne profilowania litologiczne oraz profilowania sedymentologiczne fragmentów rdzeni, a także pobrano próbki do badań, wykorzystano także materiały archiwalne, głównie dokumentacje wynikowe otworów wiertniczych. Informacje o litologii na podstawie dokumentacji wynikowych otworów wiertniczych i uzupełniających profilowań zawiera Tabela 4-1.

Skoncentrowaliśmy się głównie na niższych piętrach sukcesji węglanowej i węglanowo-krzemionkowej kredy: albie górnym, cenomanie turonie i koniaku, jako bezpośrednim nadkładzie piaszczystej formacji mogileńskiej kredy dolnej, która jest bardzo dobrym poziomem zbiornikowym ze względu na odpowiednio wysokie parametry porowatości i przepuszczalności skał. Pod sekwencją kredową w kompleksie cechsztyńsko-mezozoicznym występują utwory jury, triasu i permu (cechsztyn), a sumaryczna miąższość całego kompleksu przekracza 7000 m (Fig. 4-2).

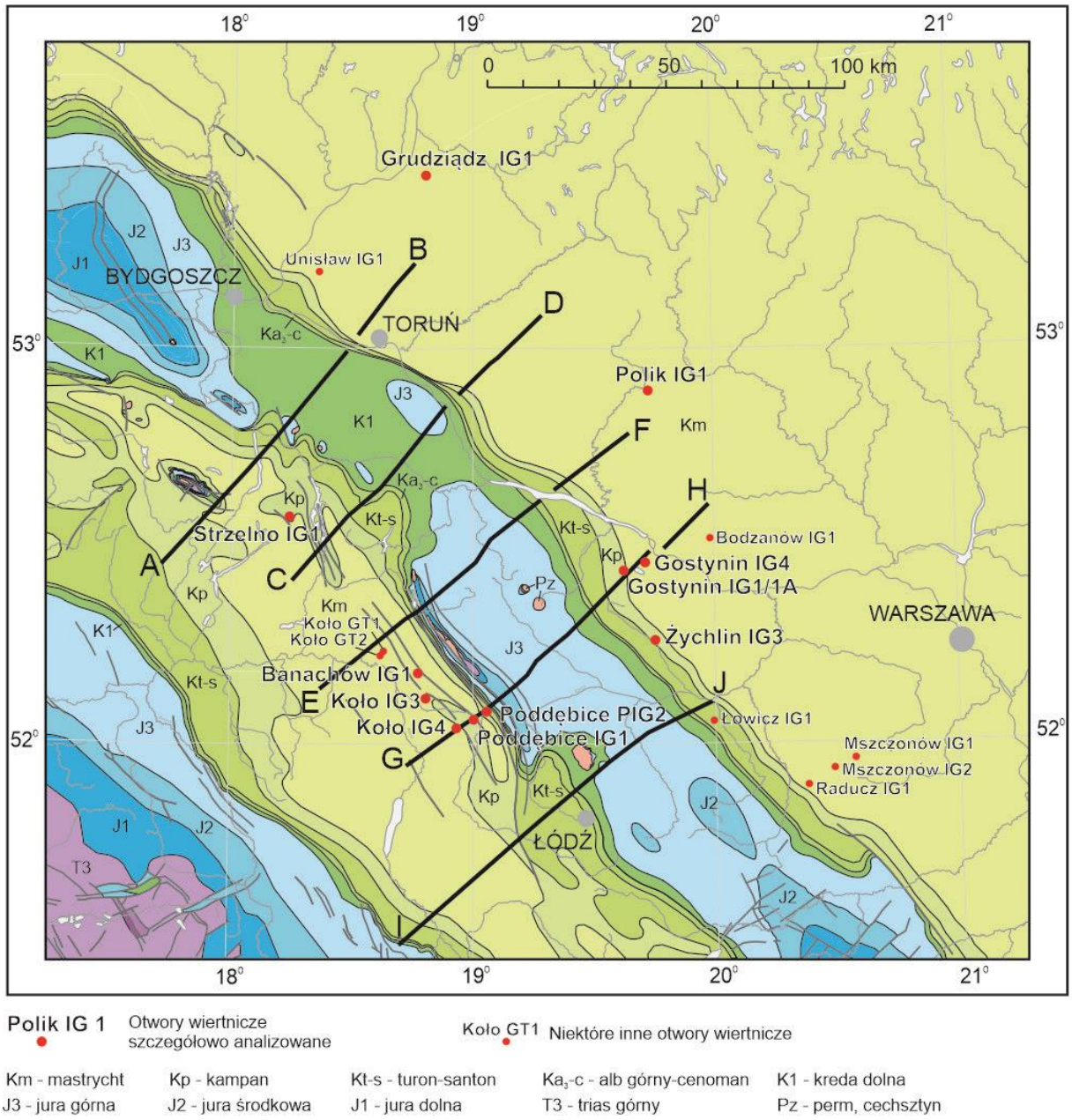


Fig. 4-1 Lokalizacja otworów wiertniczych dla badań węglanowego i węglanowo-krzemionkowego uszczelnienia w centralnej Polsce, z zaznaczonymi liniami przekrojów geologicznych A-B, C-D, E-F, G-H oraz I-J (Fig. 4.2), na tle mapy geologicznej Polski 1:500 000 (Marks i in., red., 2022)

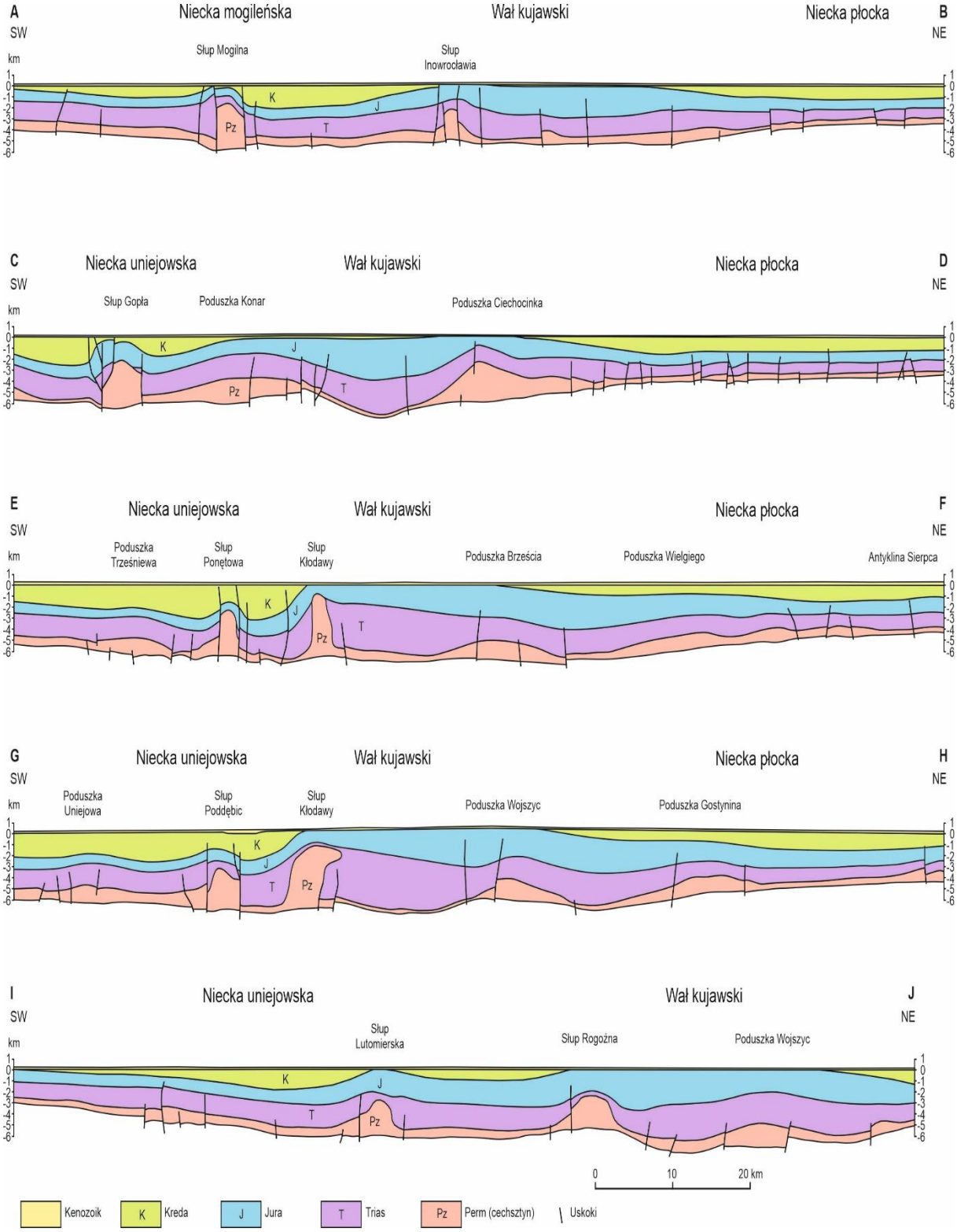


Fig. 4-2 Przekroje geologiczne A-B, C-D, E-F, G-H oraz I-J kompleksu cechsztyńsko-mezozoicznego przez nieckę mogileńsko-uniejowską, wał kujawski i nieckę płocką (wg Dadleza, 2001, uproszczone). Lokalizację linii przekrojów przedstawiono na Fig. 4.1

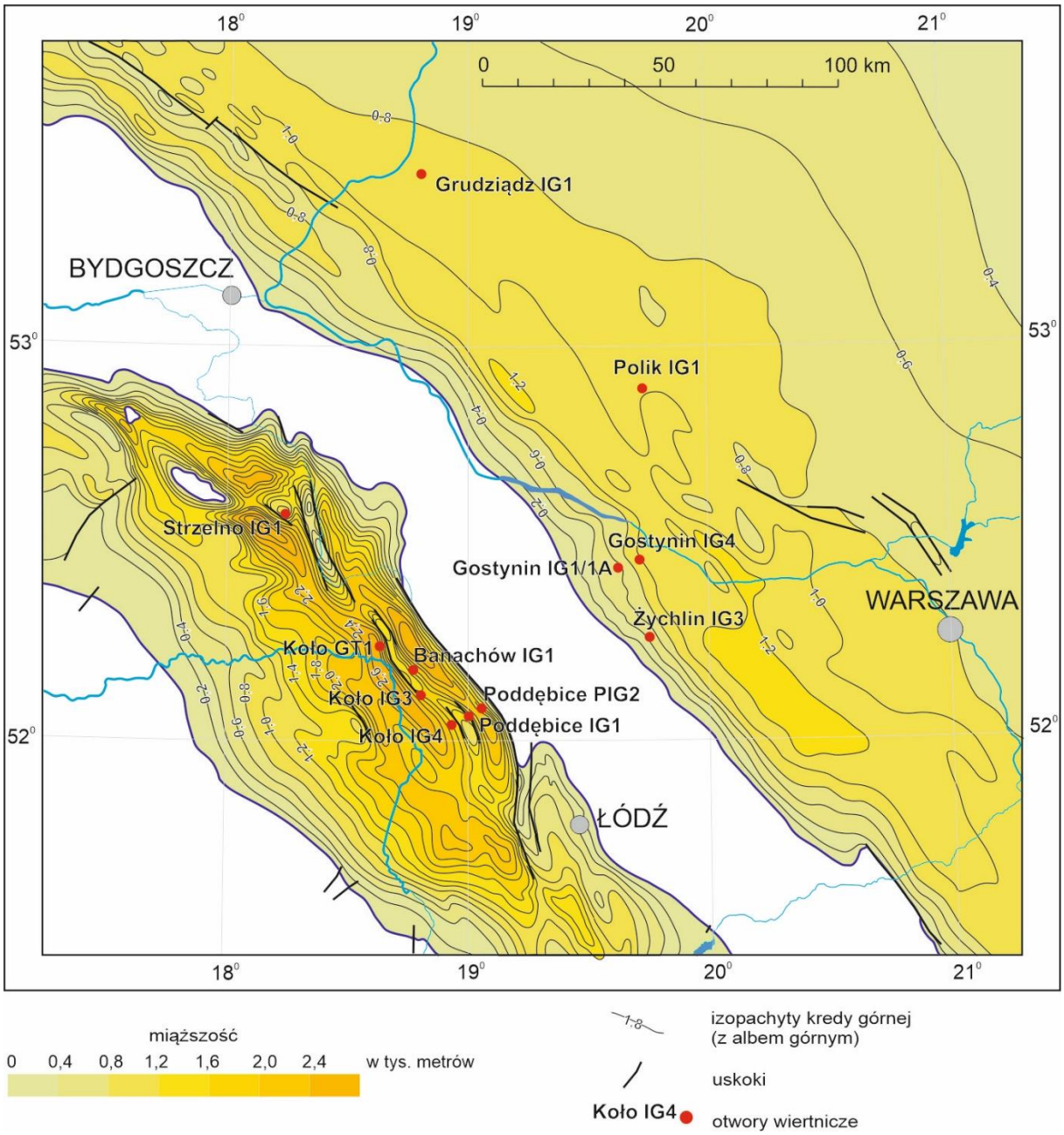


Fig. 4-3 Miąższość sekwencji kredy górnej z albem górnym w centralnej Polsce (uaktualnione na podstawie Leszczyńskiego, 2012)

Poniżej (rozdział **4.2**) zaprezentowano charakterystykę miąższościową, litofacjalno-sedymentologiczną, litologiczną i stratygraficzną utworów kredy górnej i albu górnego. Mapa miąższości kredy górnej (z albem górnym) w centralnej Polsce przedstawiona została na Fig. 4-3, natomiast na Fig. 4-4 jest pokazana korelacja stratygraficzno-litologiczna kredy górnej (z albem górnym) pomiędzy poszczególnymi otworami wiertniczymi analizowanymi dla celów projektu (11 otworów wiertniczych).

Tabela 4-1 Opis makroskopowy odcinków rdzeniowanych

Otwór/Ilość rdzenia/Ilość skrzynek/ Głębokość rdzenia/Stratygrafia/Uzysk/Litologia	Opis rdzenia	Miąższość [m]	Ilość skrzyń	ID CBDG
1.Banachów IG 1 (Leszcze) – 18,3 m rdzenia (20 skrzynek)		18.3	20	23487
511,0-518,0 kampan, 6 m wapień/opoka	Uzysk rdzenia 6.00 m - Wapień marglisty szary z ciemniejszymi plamami, prawdopodobnie ślady organizmów. Zwięzły twardy ze śladami pirytu. [1.00 m]; Opoka szara zwięzła, lekko wapnista. [1.50 m]; Wapień jasnoszary bardzo twardy. [0.50 m]; Opoka marglista, zwięzła, twarda, partiami bardzo twarda. Trawiona w HCl rozpada się na drobne grudki. [1.50 m]; Wapień jasnoszary bardzo twardy. [0.30 m]; Opoka marglista, zwięzła, twarda, partiami bardzo twarda. Trawiona w HCl rozpada się na drobne grudki. [0.20 m]; Wapień marglisty szary, zwięzły twardy, dołowi przechodzi w opokę marglistą zwięzłą, w HCl rozpadającą się na grudki. [1.00 m],			
891,0-898,0 kampan, 6 m wapień	Uzysk rdzenia 6.00 m - Wapień marglisty jasnoszary, smugowany i plamisty z wkładkami margli ciemnoszarych, ilastych o miąższości 3- 5 cm, z licznymi blaszkami miki, zbity, bardzo twardy. Trawiony w HCl rozpada się całkowicie. Upad niemierzalny. [6.00 m]. Planolites isp. i inne nieoznaczone skamieniałości śladowe.			
1882,0-1884,0 turon, 0,8 m opoka	Uzysk rdzenia 2.00 m - Opoka szara, plamista i nieregularnie smugowana substancją ilasto- marglistą, ciemnoszarą. Skała zwięzła, bardzo twarda, w HCl nie rozpada się. Upad niemierzalny. [0.80 m]; Iłowiec ciemnoszary, marglisty. [1.20 m],			
2045,0-2051,0 turon, 5,5 m iłowiec	Uzysk rdzenia 5.40 m - Iłowiec ciemnoszary, marglisty z wkładkami opoki ilastej, szarej, silnie plamistej, zwięzłej o przełamie gładkim, miąższości 20- 50 cm, ze śladami detrytu skorup inoceramów, z cienkimi przewarstwieniami margli ciemnoszarych o pokroju płytkowym, w HCl rozpadający się całkowicie pozostawiając obfitą substancję ilastą. Upad niemierzalny. [4.00 m]; Iłowiec marglisty, ciemnoszary o pokroju płytkowym, przełamie gładkim, a w HCl nie rozpada się. [1.40 m],			
2. Gostynin IG 1/1A (Leszcze) – 49,9 m rdzenia (86 skrzynek)		49.9	86	93790
144,0-151,6 kampan, 6,7 m mułowiec/margiel/wapień	1,0 m - mułowiec szary, wapnisty, smugowany, trawiony w HCl nie rozpada się. W skale widoczne drobne łuseczki muskowitu oraz niewielkie skupienia pirytu pelitowego. W płytce cienkiej na tle spoiwa wapienno-ilastego obserwuje się liczne ziarna kwarcu i glaukonitu średnicy 0,02-0,2 mm oraz rozproszony piryt pelitowy. (Rdzeń przesunięty, według pomiarów geofizycznych górna granica tych utworów znajduje się na głębokości 144,0 m) 1,7 m - okruchy rdzenia - margiel szary, smugowany ciemniejszym, z drobnymi skupieniami pirytu pelitowego. Pod binokularem widoczne nieliczne ziarna kwarcu i glaukonitu średnicy około 0,1 mm. (Rdzeń przesunięty - uwaga jw.) 4,0 m rdzenia - wapień marglisty kredopodobny, biały z jasnoszarymi nieregularnymi soczewkami skrzemieniałej skały (niewykształcone czerty). W płytce cienkiej na tle spoiwa ilasto-węglanowego są widoczne dość liczne ziarna kwarcu średnicy 0,02-0,06 mm oraz nieliczne ziarna glaukonitu średnicy 0,03-0,04 mm, nieliczne otwornice i rozproszony piryt pelitowy. Zawartość $CaCO_3$ na głębokości 147,0 m wynosi 80,5%, $MgCO_3$ - 0,45%, P_2O_5 - 0,9%. Fauna: szczątki spirytyzowanej gąbki, Baculites sp., łuski ryb			
191,6-198,6 kampan, 2m wapień	2,0 m rdzenia (część w kawałkach) - wapień marglisty, kredopodobny, biały, dość miękki, lekki, z szarymi czertami wrośniętymi w skałę, średnicy od kilku do 15 cm. W płytce cienkiej na tle spoiwa ilasto-węglanowego są widoczne dość częste, źle obtoczone ziarna kwarcu średnicy 0,02-0,1 mm i nieliczne ziarna glaukonitu wielkości 0,04 mm oraz rozproszony piryt pelitowy. Zawartość $CaCO_3$ na głębokości 192,0 m wynosi - 86,5%, $MgCO_3$ - 0,8%, P_2O_5 - 0,74%. Fauna: Pectinidae			

240,0-246,0 kampan, 4,5 m wapień	4,5 m rdzenia - wapień marglisty, biały, średniej twardości z czertami. Czerty jasnoszare wrośnięte w skałę. Skała trawiona w HCl rozpada się. W płytce cienkiej na tle spoiwa ilasto-węglanowego są widoczne otwornice, nieliczne średnio obtoczone ziarna kwarcu średnicy około 0,05 mm i kilka ziaren glaukonitu średnicy 0,03 mm. Skała wykazuje teksturę kierunkową. Zawartość CaCO3 na głębokości 241,0 m wynosi 78%, MgCO3 - 1%, P2O5 - 0,87%. Fauna: szczątki Baculites sp. i Echinoidea			
276,0-282,0 kampan, 4 m wapień	4,0 m rdzenia - wapień marglisty biały, dość twardy, z nielicznymi czertami jasnoszarymi wrośniętymi w skałę. W płytce cienkiej na tle spoiwa ilasto-węglanowego są widoczne otwornice, sporadyczne ziarna kwarcu wielkości około 0,02 mm, rozproszony piryt pelitowy. Skała wykazuje teksturę kierunkową. Zawartość CaCO3 na głębokości 277,0 m wynosi 86,1%, MgCO3 - 0,35%, P2O5 - 0,78%			
312,0-317,0 kampan/santon, 2,5 m wapień	2,5 m rdzenia: 1,0 m - wapień marglisty biały, bielący, miejscami skrzemionkowany, dość twardy, z drobnymi czertami jasnoszarymi. W płytce cienkiej na tle spoiwa ilasto-węglanowego są widoczne otwornice, nieliczne nieobtoczone ziarna kwarcu średnicy około 0,03 mm oraz trzy ziarna glaukonitu średnicy około 0,3 mm. Zawartość CaCO3 na głębokości 312,5 m wynosi 68,9%, MgCO3 - 0,65%, P2O5 - 0,64%. 1,5 m -wapień marglisty biały, silnie skrzemionkowany			
367,0-372,0 santon, 3 m wapień	3,0 m rdzenia - wapień marglisty biały, miejscami jasnoszary. Zawartość CaCO3 na głębokości 371,4 m wynosi 72,5%, MgCO3 - 0,1%, P2O5 - 0,52%			
422,0-427,0 santon, 3 m wapień	3,0 m rdzenia - wapień marglisty biały, twardy, lekko bielący, miejscami plamisty z jasnoszarym, miejscami wapień impregnowany krzemionką, z nielicznymi czertami jasnoszarymi i białymi wrośniętymi w skałę. W płytce cienkiej na tle spoiwa ilasto-węglanowego są widoczne nieliczne słabo obtoczone ziarna kwarcu średnicy około 0,04 mm i kilka ziarn glaukonitu średnicy około 0,05 mm oraz rozproszony piryt pelitowy. Skała wykazuje teksturę kierunkową. Zawartość CaCO3 na głębokości 426,0 m wynosi 56,8% (skała impregnowana krzemionką), MgCO3 - 1,3%, P2O5 - 1,1%. Fauna: Inoceramus cf. cardissoides Goldfuss i Hauericeras ex. gr. pseudogardeni (Schlüter)			
477,0-482,0 koniak, 1,8 m wapień	1,8 m rdzenia - wapień marglisty biały, twardy, z licznymi, dużymi czertami białymi i jasnoszarymi. Skała jest silnie impregnowana krzemionką. W płytce cienkiej na tle spoiwa ilasto-węglanowego są widoczne liczne otwornice, dość liczne słabo obtoczone ziarna kwarcu średnicy około 0,05 mm, nieliczne ziarna glaukonitu średnicy około 0,08 mm i nieliczne włókna inoceramów. Skała wykazuje teksturę kierunkową. Zawartość CaCO3 na głębokości 480,0 m wynosi 65,5%, MgCO3 - 1,0%, P2O5 - 1,22%			
532,0-537,0 turon, 3 m wapień	3,0 m rdzenia - wapień marglisty biały, plamisty, nieregularnie smugowany szarym, z wtrąceniami skały szarej, twardy, zwięzły. W płytce cienkiej na tle spoiwa ilasto-węglanowego są widoczne otwornice, nieliczne ziarna glaukonitu średnicy około 0,05 mm, nieliczne ziarna kwarcu średnicy około 0,05 mm, rozproszony piryt pelitowy. Skała wykazuje teksturę kierunkową. Zawartość CaCO3 na głębokości 533,0 m wynosi 72,6%, MgCO3 - 1,0%, P2O5 - 1-2%			
587,0-592,0 turon, 2 m wapień	2,0 m rdzenia - wapień biały, twardy, z nielicznymi laminami szarego marglu. W płytce cienkiej na tle spoiwa ilasto-węglanowego są widoczne otwornice, rozproszony piryt pelitowy. Zawartość CaCO3 na głębokości 591,0 m wynosi 92,8%, MgCO3 - 1,6%, P2O5 - 0,65%			
620,0-625,0 turon, 3,5 m wapień	3,5 m rdzenia - wapień marglisty biały, zwięzły, twardy, z wkładkami (grubości 7 cm) szarozielonego łupliwego marglu. W dolnej partii faliste, nieregularne laminy i cienkie wkładki szarozielonego marglu i materiału ilastego (grubości kilku milimetrów do 1,5 cm). W płytce cienkiej na tle spoiwa ilasto-węglanowego są widoczne otwornice i nieliczne włókna inoceramów. Zawartość CaCO3 na głębokości 621,0 m wynosi 88,5%, MgCO3 - 0,5%, P2O5 - 0,7%			

652,0-663,0 cenoman, 5,9 m wapień	1,0 m rdzenia - wapień marglisty biały, zwięzły, twardy, z warstewkami (grubości kilku centymetrów) wapienia marglistego jasnoszarego, słabo smugowanego 4,9 m rdzenia - wapień marglisty biały, zwięzły, twardy, z nieregularnymi falistymi laminami i warstewkami margla szarego (grubości od kilku milimetrów do 1 cm), partiami na odcinkach 20-30-centymetrowych występuje wapień marglisty szary. W płytce cienkiej na tle spoiwa ilasto-węglanowego są widoczne otwornice, liczne oligosteginy i nieliczne włókna inoceramów. Zawartość CaCO3 na głębokości 660 m wynosi 87,5%, MgCO3 - 1,0%, P2O5 - 0,7%. Fauna: Inoceramus sp. (2 okazy). Wapień marglisty z nieregularną, nieciągłą laminacją falistą i soczewkową.			
738,0-744,0 alb, 5 m wapień/margiel/piaskowiec	5,0 m rdzenia: 0,6 m - wapień marglisty biały, miejscami jasnoszary, zwięzły, twardy, z rozsianymi licznymi włóknami inoceramów. Przerost wapienia marglistego. jasnoszarego o słabym odcieniu zielonawym z rozsianymi włóknami inoceramów. Obserwuje się nieliczne otwornice, okruchy włókien inoceramów. Fauna: Neohibolites sp. (2 okazy), Aucellina gryphaeoides (Sowerby) (liczne okazy) 0,4 m - margiel szary, z piaskiem. Piasek kwarcowy, średnio i gruboziarnisty (drobne skupienia, nieliczne ziarna glaukonitu. Liczne otwornice, włókna inoceramów, liczne ziarna kwarcu wielkości 0,02-0,8 mm (średnioobtoczone), nieliczne ziarna glaukonitu, rozproszony piryt pelitowy. Fauna: Aucellina gryphaeoides (Sowerby) liczne okazy i fragmenty inoceramów 0,3 m - margiel piaszczysty szary o odcieniu zielonkawym, zawiera piasek kwarcowy średnio- i gruboziarnisty, nieliczne obtoczone ziarna kwarcu wielkości około 2 mm oraz drobne ziarna glaukonitu. Piasek występuje często w postaci skupień. W marglu tkwią nieliczne fosforyty, liczniejsze w dole warstwy. Liczne otwornice, włókna inoceramów, ziarna glaukonitu średnicy 0,03-0,05 mm. Fauna: Neohibolites sp. i liczne okazy Aucellina gryphaeoides (Sowerby) 0,1 m - margiel piaszczysty szarozielony, łupliwy z nielicznymi drobnymi fosforytami. Piasek kwarcowy różnoziarnisty (skupienia). Nieliczne ziarna glaukonitu. Fauna: Aucellina gryphaeoides (Sowerby), oraz liczne Aucellina sp. 0,5 m - piaskowiec kwarcowy szarozielony, z glaukonitem, średnio- i gruboziarnisty, mułowcowy, wapnisty, z drobnymi fosforytami średnicy do 5 cm 0,5 m - piaskowiec średnio- i gruboziarnisty, mułowcowy, miejscami fukoidowy, z obfitym glaukonitem, bezwapienny, z dość licznymi konkrecjami piaszczysto-fosforytowymi. 2,6 m - piaskowiec kwarcowy jasnoszary, drobnoziarnisty, ze sporadycznymi ziarnami glaukonitu, bezwapienny			
3. Gostynin IG 4 (Leszcze) – 29,9 m rdzenia (33 skrzynki)		29.9	33	93806
140,0-145,0 mastrycht, 2,7 m opoka	2,7 m rdzenia - opoka szara, zwięzła, bardzo twarda. W płytkach cienkich na tle spoiwa ilasto-węglanowego widoczne są otwornice, próżnie po igłach gąbek, fragmenty igieł gąbek, nieliczne ziarna glaukonitu wielkości 0,02-0,01 mm, rozproszony piryt pelitowy. Zawartość CaCO3 - 54,8% - 58,8%. Fauna: Lamellibranchiata indet, Gastropoda indet.			
260,0-266,0 mastrycht, 5 m opoka	5,0 m rdzenia - opoka jasnoszara i szarobiała, porowata, dość twarda (skała miększa od opoki z głębokości 140,0-145,0 m). W płytkach cienkich na tle spoiwa węglanowego widoczne liczne małe i duże próżnie po igłach gąbek, fragmenty głównie krzemionkowych igieł gąbek, miejscami po kilka, ziarna glaukonitu wielkości 0,02-0,12 mm, rozproszony piryt pelitowy. Zawartość CaCO3 wynosi na głębokości 261,0 m - 65,2% i na głębokości 265,0 m - 67,2%. Fauna: Entolium cf. membranaceum (Nilsson), Lamellibranchiata indet.			
393,3-399,3 kampan, 5 m wapień	5,0 m rdzenia - wapień marglisty biały, średniej twardości, lekko bielący. Na głębokości 394,0 m występuje przerost (20 cm grubości) wapienia marglistego szarego ze spirytyzowaną gąbką i z rozsianym pirytem pelitowym. W płytkach cienkich na tle spoiwa ilasto-węglanowego są widoczne otwornice, nieliczne igły gąbek i ziarna glaukonitu wielkości 0,01-0,1 mm oraz rozproszony piryt pelitowy. Zawartość CaCO3 na głębokości 393,4 m wynosi 81,8%, na głębokości 399,0 m - 69,7%. Fauna: Inoceramus sp. (2 okazy), Chlamys sp., Lamellibranchiata indet., Terebratulidae oraz Baculites sp. (kilka)			

549,3-556,0 kampan, 6 m opoka	6,0 m rdzenia - opoka marglista biała, twarda, z przerostami wapieni. W płytkach cienkich na tle spoiwa ilasto-węglanowego widać nieliczne otwornice, kilka cienkich igieł gąbek, pojedyncze ziarna glaukonitu wielkości 0,01-0,06 mm, trochę pirytu pelitowego. Zawartość CaCO3 wynosi na głębokości 550,0 m - 81,7%, na głębokości 555,5 m - 83,9%. Fauna: Inoceramus sp., Baculites sp. liczne			
737,5-742,5 santon, 1,5 m margiel	1,5 m rdzenia- margiel szarobiały dość twardy, w szare plamy, prawdopodobnie ślady działalności organizmów. W płytce cienkiej na tle spoiwa węglanowo -ilastego są widoczne liczne otwornice, mikrodetryt włókien inoceramów, nieliczne igły gąbek, nieoznaczalne szczątki fauny, kilka ziaren glaukonitu wielkości 0,01-0,06 mm, rozproszony piryt pelitowy. Zawartość CaCO3 na głębokości 740,0 m wynosi 61,6%			
902,2-908,7 koniak, 4,7 m wapień	4,7 m rdzenia - wapień marglisty biały lub jasnoszary, z szarymi smugami i plamami (ślady organizmów), zwięzły, bardzo twardy, z nielicznymi czertami. W płytce cienkiej widoczne otwornice, nieliczne fragmenty włókien inoceramów, ziarna glaukonitu wielkości 0,01-0,05 mm. Zawartość CaCO3 na głębokości 905,0 m wynosi 73,9%. Fauna: Inoceramus cf. kleini Müller			
1063,0-1069,5 turon, 5 m wapień	5,0 m rdzenia - wapień marglisty zwięzły, bardzo twardy, z licznymi nieregularnymi, cienkimi wkładkami i laminami szarego marglu. W płytkach cienkich na tle spoiwa ilasto-węglanowego widoczne nieliczne otwornice i liczne oligosteginy. Zawartość CaCO3 wynosi na głębokości 1063,2 m - 88,9%, na głębokości 1069,0 m - 83,9%. Fauna: Inoceramus sp., Inoceramus cf. lamarcki Parkinson.			
4. Grudziądz IG1 (Leszcze) – 71,5 m rdzenia (108 skrzynek)		71.5	108	87853
208,0-214,0 mastrycht, 3,9 m wapień	3,9 m rdzenia - wapień marglisty jasnoszary, miejscami z szarymi smugami, piaszczysty, ze szczątkami bakulitów i belemnitów. W stropie wkładka marglu piaszczystego zawierającego 35,3% CaCO3, 1,3% MgCO3, 35,3% SiO2 i 1,8% Al2O3. W spągu pojedyncze konkrecje ciemnoszarych czertów. Fauna: 213,0 m - Belemnella cf. lanceolata (Schlotheim). Analiza chemiczna: wapień marglisty - CaCO3 74,8 – 77,5%; MgCO3 0,78 – 1,5%; SiO2 15,8 – 18,1%; Al2O3 1,1 – 1,4%			
367,0-374,0 kampan, 6,5 m opoka/wapień	6,5 m rdzenia: 4,0 m - opoka zwięzła, jasnoszara, prawie biała, twarda, o przełamie gładkim, w HCl nie rozpada się. Analiza chemiczna: CaCO3 66,0%; MgCO3 0,8%; SiO2 28,4%; Al2O3 0,8%. Na głęb. 370,0 – 370,3 m około 0,3 m wkładka wapienia marglistego jasnoszarego, prawie białego, bardziej miękkiego od opoki. Analiza chemiczna: CaCO3 75,9%; MgCO3 0,51%; SiO2 16,8%; Al2O3 0,82%. 1,0 m - wapień marglisty, jasnoszary miejscami z szarymi smugami, zwięzły, dość twardy, o przełamie gładkim. Analiza chemiczna: CaCO3 74,6%; MgCO3 1,7%; SiO2 17,8%; Al2O3 1,8%. 1,5 m - opoka zwięzła, jasnoszara, prawie biała. Analiza chemiczna: CaCO3 75,9%; MgCO3 0,7%; SiO2 18,9%; Al2O3 0,85%			
500,0-507,0 kampan, 3,7 m opoka	3,7 m rdzenia - opoka zwięzła, jasnoszara, z szarymi plamami i smugami, twarda, o przełamie półziarnistym. Analiza chemiczna: CaCO3 57,4 – 65,0%; MgCO3 0,63 – 0,82%; SiO2 28,8 – 35,0%; Al2O3 1,2 – 1,24%			
604,0-609,0 santon, 2 m opoka	2,0 m rdzenia: 1,0 m - opoka ilasta, ciemnoszara, zwięzła, z dość liczną miką. Analiza chemiczna: CaCO3 25,1%; MgCO3 1,2%; SiO2 65,3%; Al2O3 2,5%. 1,0 m - opoka zwięzła, szara, silnie plamista (ślady działalności organizmów) i smugowana, w środkowej partii jaśniejsza. Analiza chemiczna: CaCO3 47,8%; MgCO3 0,73%; SiO2 46,0%; Al2O3 1,16%.			
709,0-716,0 santon, 5,8 m opoka	5,8 m rdzenia – opoka mulasta/geza ciemnoszara, miejscami jaśniejsza i bardziej zwięzła, z liczną miką, twarda, o przełamie półziarnistym. Na głęb. 715,0 m szczątek belemnita Gonioteuthis sp. Analiza chemiczna: CaCO3 35,5 – 38,4%; MgCO3 0,96 – 1,3%; SiO2 49,5 – 50,7%; Al2O3 3,8 – 4,4%			
811,0-818,0 koniak -turon, 7 m opoka	7,0 m rdzenia – opoka mulasta/geza ciemnoszara, zwięzła, twarda, z liczną miką, o przełamie półziarnistym, przechodząca w opokę bardziej zwięzłą, szaropopielatą, z większą zawartością CaCO3. Pojedyncze łuski ryb. Analiza chemiczna: CaCO3 26,5 – 30,4%; MgCO3 0,84 – 1,43%; SiO2 53,1 – 57,3%; Al2O3 3,8 – 5,6%			
838,0-851,0 koniak -turon, 10 m opoka	10,0 m rdzenia (w okruchach) – opoka, zwięzła, szaropopielata, twarda, z liczną miką, o przełamie gładkim, miejscami z cienkimi wkładkami opoki mulastej/gezy ciemnoszarej. Analiza chemiczna: CaCO3 37,0 – 39,0%; MgCO3 0,43 – 1,72%; SiO2 48,7 – 52,0%; Al2O3 2,9 – 3,9%			

881,0-892,0 koniak -turon, 8,5 m opoka	8,5 m rdzenia – opoka zwięzła, szara, bardzo twarda, o przełamie półziarnistym, miejscami z wkładkami opoki mulastej/gezy ciemnoszarej miąższości 20 – 50 cm. Pojedyncze szczątki inoceramów. Analiza chemiczna: $CaCO_3$ 33,2 – 48,6%; $MgCO_3$ 0,85 – 1,26%; SiO_2 40,0 – 51,5%; Al_2O_3 3,6 – 4,9%			
910,0-924,0 koniak -turon, 10 m opoka	10,0 m rdzenia – opoka, zwięzła, szara z ciemnoszarymi plamami i smugami, twarda, z liczną miką, o przełamie prawie gładkim. W stropie i części środkowej 5 cm wkładki opoki ilastej ciemnoszarej. Analiza chemiczna opoki zwięzłej: $CaCO_3$ 32,5%; $MgCO_3$ 0,57%; SiO_2 58,1%; Al_2O_3 2,3%			
954,0-961,0 cenoman, 6,5 m iłowiec	6,5 m rdzenia – iłowiec marglisty ciemnoszary, zwięzły, miejscami z konkrecjami pirytu o średnicy 1-3 cm oraz nielicznym detrytem małżów. W HCl całkowicie rozpada się, residuum ilaste obfite. Analiza chemiczna: $CaCO_3$ 19,3-24,3%; $MgCO_3$ 1,9-2,4%; SiO_2 45,8-50,5%; Al_2O_3 12,3-12,8%			
1000,0-1006,0 cenoman, 5 m margiel mulasty/ilasty	3,0 m rdzenia – margiel mulasty ciemnoszary z liczną miką, zwięzły, dość twardy, z pojedynczymi konkrecjami pirytu o średnicy do 2 cm. W HCl rozpada się, residuum ilaste obfite. Analiza chemiczna: $CaCO_3$ 26,5%; $MgCO_3$ 1,7%; SiO_2 47,5%; Al_2O_3 10,0% 2,0 m rdzenia – margiel silnie ilasty ciemnoszary z liczną miką W HCl rozpada się całkowicie. Analiza chemiczna: $CaCO_3$ 16,4%; $MgCO_3$ 1,2%; SiO_2 60,8%; Al_2O_3 8,9%			
1037,0-1041,0 cenoman-alb, 2,5 m wapień/margiel/piaskowiec	2,5 m rdzenia – wapień marglisty organodetrytyczny, piaszczysty, z przejściami do wapienia pelitycznego, zbitego, bardzo twardego z przemazami czarnej substancji ilasto-marglistej. Przełam szorstki. Analiza chemiczna: $CaCO_3$ 88,3-92,2%; $MgCO_3$ 0,95-1,0%; SiO_2 3,0-5,1%; Al_2O_3 0,89-1,3%. 1,5 m rdzenia: 0,5 m – margiel silnie piaszczysty z glaukonitem, szarozielony, zwięzły i twardy, z pojedynczymi konkrecjami fosforytów piaszczystych barwy beżowej i wielkości 1-3 cm. Spękanie wypełnione materiałem ilasto-marglistym. Nieregularne, faliste i soczewkowe smugowanie materiałem ilastym. Analiza chemiczna: $CaCO_3$ 71,6%; $MgCO_3$ 1,0%; SiO_2 20,8%; Al_2O_3 1,84% 1,0 m – piaskowiec drobnoziarnisty kwarcowo-glaukonitowy, z domieszką drobnego żwirku kwarcowego do 3 mm średnicy, wapnisty, ku spągowi stopniowy zanik węglanowości. Barwa szarozielona. W całej warstwie dość liczne konkrecje fosforytów piaszczystych z glaukonitem, o matowej powierzchni, średnicy 1-4 cm. Analiza chemiczna: $CaCO_3$ 17,8-41,9%; $MgCO_3$ 0,71-1,79%; SiO_2 34,0-65,2%; Al_2O_3 3,4-4,8%			
5. Koło IG 3 (Leszcze) – 82,9 m rdzenia (147 skrzynek)		82.9	147	92268
120,0-127,0 mastrycht, 3,5 m opoka	3,5 m rdzenia - opoka szara zwięzła, o przełamie szorstkim, twarda, lekka, nie rozpada się w HCl. Liczna mikrofauna			
280,0-287,0 kampan, 5,7 m opoka	5,7 m rdzenia - opoka szara twarda, o przełamie gładkim. W górnej części liczne płaszczyzny ślizgów z nalotami iłowca marglistego i cienkimi żyłkami kalcytu grubości 4-5 cm. Szczątki gąbek, głowonogów z rodzaju Bakulites, nieliczne małże, wśród nich Pecten sp.			
389,0-396,0 kampan, 6 m opoka	6,0 m rdzenia - opoka szara, zwięzła, o przełamie gładkim, twarda, nie rozpada się w HCl, liczna mikrofauna			
493,0-500,0 kampan, 3,5 m wapień	3,5 m rdzenia - wapień szary, marglisty, miejscami ze smugami ciemniejszymi, nieliczne płaszczyzny ślizgów z ciemnymi powleczeniami ilasto-marglistymi. Rozpada się całkowicie w HCl			
596,0-603,6 kampan, 6,4 m wapień	6,4 m rdzenia - wapień szary, marglisty, twardy, z wkładkami margla ciemnoszarego, ilastego grubości 5--20 cm. Szczątki jeżowców, inoceramów i Bakulites			
702,4-709,4 santon, 1 m opoka	1,0 m rdzenia - opoka jasnoszara, z nieco ciemniejszymi plamami (ślady po organizmach), z wkładką margla ciemnoszarego. Margiel rozpada się w HCl całkowicie, a opoka nie			
804,0-811,0 santon, 3 m opoka	3,0 m rdzenia - opoka jasnoszara, marglista z wkładkami (1-5 cm) margla ciemnoszarego, z płaszczyznami ślizgów, z nielicznymi czertami. Opoka nie rozpada się w HCl			

904,5-911,5 santon, 4,3 m opoka	4,3 m rdzenia - opoka szara marglista smugowana, zwięzła, o przełamie gładkim z wkładkami margla ciemnoszarego ilastego (od 5 do 40 cm). Nieliczne szczątki inoceramów. Opoka słabo rozpada się w HCl			
1014,0-1021,0 santon, 6,8 m margiel	6,8 m rdzenia - margiel ciemnoszary, zwięzły, twardy z wkładkami wapienia szarego, marglistego. Przejście od margla do wapienia stopniowe. W HCl rozpada się całkowicie			
1117,4-1136,7 santon, 17,9 m opoka	8,1 m rdzenia - opoka szara, marglista, zwięzła o gładkim przełamie, przewarstwiana opoką ciemnoszara, ilastą, pękającą na nieregularne płytki. Ślady detrytusu inoceramów. Słabo rozpada się w HCl 9,8 m rdzenia - opoka ciemnoszara, marglista, twarda, o przełamie gładkim, stopniowo przejście do opoki szarej. Słabo rozpada się w HCl			
1239,5-1246,5 koniak, 7 m opoka	7,0 m rdzenia - opoka ciemnoszara, twarda, nieco ilasta, o gładkim przełamie, miejscami z jaśniejszymi plamami. Nie rozpada się w HCl. Planolites isp., ?Thalassinoides isp.			
1331,6-1333,6 koniak, 1,5 m opoka	1,5 m rdzenia - opoka szara, twarda, nie rozpada się w HCl			
1436,0-1443,0 turon, 6,3 m wapień	6,3 m rdzenia - wapień szary, nieco skrzemionkowany, z przemazami i laminami (0,5-2 cm) margla ciemnoszarego, ilastego. Ciemnoszare krzemienie bez kory, liczniejsze w części środkowej			
1524,8-1525,4 turon, 0,3 m opoka	0,3 m rdzenia - opoka z nielicznymi szczątkami inoceramów			
1630,4-1635,4 turon, 4,7 m wapień	4,7 m rdzenia - wapień szary, marglisty, skrzemionkowany, z licznymi przemazami, laminami i przerostami margla ciemnoszarego, nieliczne szczątki inoceramów. W HCl margiel rozpada się całkowicie. Liczna mikrofauna			
1745,4-1751,4 cenoman, 4,5 m wapień	4,5 m rdzenia - wapień jasnoszary, masywny, twardy, z licznymi nieregularnymi falistymi laminami ciemnoszarego margla ilastego. Rozpada się całkowicie w HCl. Włókna inoceramów i liczna mikrofauna			
1775,4-1776,4 alb, 0,5 m margiel/piaskowiec	0,5 m rdzenia: 0,4 m margiel szarozielony, ilasty, nieco skrzemionkowany, z ciemnoszarymi plamami (ślady organizmów), zwięzły, o pokroju, płytkowym, rozpada się w HCl. Liczne Aucellina sp. Granicę z kredą dolną przyjęto na głębokości 1776,0 m Alb-środkowy - barrem (formacja mogileńska) Ogniwo kruszwickie (C) 0,1 m - piaskowiec jasnoszary bardzo słabo zwięzły			
6.Koło IG 4 (Leszcze) – 51,5 m rdzenia (105 skrzynek)		51.5	105	92682
40,0-54,0 mastrycht, 4,3 m opoka, geza	1,8 m rdzenia - opoka szara porowata, lekka, dość miękka, z pojedynczymi łuskami ryb, szczątkami Bakulites sp. i drobnych małżów. Nie rozgada się w HCl			
135,0-142,0 mastrycht, 3,7 m opoka/geza	3,7 m rdzenia - opoka szara, dość twarda i zwięzła, pękająca na dość regularne płytki. Na głębokości około 139,0 i 141,0 m - trzydziestocentymetrowe wkładki gezy szarej, piaszczystej. Szczątki łusek ryb, drobnych małżów i spirytyzowanych gąbek. Nie rozpada się w HCl			
246,0-253,0 kampan, 3 m opoka	3,0 m rdzenia - opoka szara, zwięzła, twarda ze szczątkami łusek ryb i spirytyzowanych gąbek. Nie rozpada się w HCl			
362,9-369,5 kampan, 4 m opoka	4,0 m rdzenia - opoka szara, marglista, zwięzła,przechodząca w wapień marglisty			
462,9-467,9 kampan, 5 m wapień	5,0 m rdzenia - wapień jasnoszary, z szarymi smugami, marglisty, zwięzły, miejscami przechodzi w opokę zwięzłą. Na głębokości 465,6 m - 40 cm wkładka margla ilastego ciemnoszarego, dość miękkiego			

571,0-575,0 kampan, 3 m opoka	3,0 m rdzenia - opoka szara zwięzła, miejscami przechodząca w wapień marglisty. Podrzędnie wkładki (10-40 cm) margla ciemnoszarego skrzemionkowanego o pokroju płytkowym			
673,0-679,0 santon, 4,8 m opoka	4,8 m rdzenia: 2,7 m - opoka ciemnoszara, ilasta, warstwowana poziomo, o pokroju płytkowym, z wkładkami (5-20 cm) opoki szarej, zwięzłej 2,1 m - opoka szara, zwięzła z czterema wkładkami (5-10 cm) opoki ciemnoszarej, ilastej jak wyżej			
783,0-785,0 santon, 0,5 m piaskowiec bardzo zwięzły	0,5 m rdzenia - piaskowiec szary zlewny, bardzo twardy, o spoiwie marglistym, z nielicznymi ziarnami glaukonitu			
826,7-831,2 santon, 3,8 m opoka/piaskowiec bardzo zwięzły	3,8 m rdzenia: 0,1 m - opoka szara, twarda z laminami opoki ciemnoszarooliwkowej, ilastej. Nie rozpada się w HCl; 0,5 m - piaskowiec jasnoszary, zlewny, z glaukonitem, spoiwo margliste; 1,2 m - opoka szara, zwięzła, plamista (ślady aktywności organizmów), o przełamie gładkim, z wkładkami (5-10 cm) opoki szarooliwkowej ilastej, również plamistej. Miejscami spirytyzowane szczątki gąbek. Nie rozpada się w HCl; 1,2 m - piaskowiec jasnoszary zlewny jak wyżej; 0,6 m - opoka szara smugowana ciemnooliwkowa, plamista, zwięzła, twarda. Nie rozpada się w HCl; 0,1 m - opoka ciemnoszarooliwkowa ilasta; 0,1 m - piaskowiec zlewny jak wyżej			
931,0-938,5 santon, 7,5 m opoka	7,5 m rdzenia: 1,0 m - opoka ciemnoszarooliwkowa, plamista (ślady po roganizmach), ilasta, zwięzła z nielicznymi spirytyzowanymi szczątkami flory. Nie rozpada się w HCl; 4,9 m - opoka szara, marglista plamista i smugowana, twarda, z wkładkami (5-10 cm) opoki ciemnoszarooliwkowej, ilastej. Pojedyncze źle zachowane inoceramy. Skała słabo rozpada się w HCl; 1,6 m - opoka szara, marglista jak wyżej			
1040,8-1044,8 santon, 0,7 m opoka	0,7 m rdzenia - opoka ilasta ciemnoszara, plamista (ślady po organizmach), dość twarda, o przełamie prawie gładkim. Rozpada się słabo w HCl			
1147,0-1151,6 koniak, 0,3 m opoka	0,3 m rdzenia - opoka ciemnoszara, nieco plamista (ślady po organizmach), o przełamie słabo ziarnistym. Nie rozpada się w HCl			
1193,0-1196,0 koniak, 3 m opoka	3,0 m rdzenia - opoka ciemnoszara, zwięzła			
1298,0-1300,0 koniak, 2 m opoka	2,0 m rdzenia - opoka szara, plamista (ślady po organizmach), twarda, z nielicznymi krzemieniami z cienkimi (do 2 cm) laminami margla ciemnoszarego, ilastego nieco skrzemionkowanego. Opoka nie rozpada się w HCl			
1423,5-1425,8 turon, 1,6 m wapień	1,6 m rdzenia - wapień szary, marglisty twardy, z nieregularnymi laminami margla ciemnoszarego ilastego, nieco skrzemionkowanego			
1552,0-1557,0 turon, 3,8 m margiel	3,8 m rdzenia - margiel szarooliwkowy, plamisty (ślady po organizmach), z soczewkami i cienkimi (2-5 cm) wkładkami wapienia szarego, marglistego. Skała nieco skrzemionkowana, rozpada się słabo w HCl. Nieliczne słabo zachowane inoceramy. Skała z nieregularną falistą laminą szarego marglu. Planolites isp., ?Chondrites isp.			
1648,0-1650,0 cenoman, 0,5 m wapień	0,5 m rdzenia - wapień jasnoszary z suturami, z przemazami i laminami margla prawie czarnego, ilastego			
7.Poddębice IG 1 (Leszcze) – 63,3 m rdzenia (72 skrzynki)		63.3	72	92442
282,3-285,8 kampan, 3 m opoka	3,0 m rdzenia - opoka jasnoszara twarda, nieco plamista (ślady po organizmach) miejscami z ciemnoszarymi smugami ilastymi, przełam szorstki, miejscami pokruszone igły gąbek, w części dolnej nieliczne cienkie żyłki kalcytu. W HCl nie rozpada się			
385,8-388,0 kampan, 3,6 m opoka	3,6 m rdzenia - opoka jasnoszara, twarda, o przełamie gładkim z licznymi, ciemnoszarymi, ilastymi smugami poziomymi lub nachylonymi pod kątem 5 stopni. Nie rozpada się w HCl			

545,0-552,0 santon, 6 m opoka/piaskowiec	6,0 m rdzenia: 1,0 m - opoka szara zwięzła, ze smugami ciemnoszarymi, o przełamie szorstkim. Nie rozpada się w HCl. Upad około 10 stopni; 1,0 m - opoka ciemnoszara, nieco ilasta, o przełamie szorstkim. Nie rozpada się w HCl; 3,5 m - opoka szara zwięzła, z licznymi ciemnoszarymi smugami (2-5 cm grubości), nachylonymi pod kątem 10-15 stopni. W dole domieszka ziarn kwarcu. Nie rozpada się w HCl; 0,5 m - piaskowiec jasnoszary wapnisty, zlewny, bardzo twardy, nieliczny glaukonit. W HCl nie rozpada się			
697,0-702,0 santon, 5 m opoka/piaskowiec	5,0 m rdzenia: 0,4 m - opoka szara zwięzła, twarda, smugowana opoką ciemnoszarą, o przełamie szorstkim, ku dołowi piaszczysta. Nie rozpada się w HCl; 0,6 m - piaskowiec szary, wapnisty, zlewny, twardy, z glaukonitem. Nie rozpada się w HCl; 3,1 m - opoka szara z ciemnoszarymi smugami, twarda, o przełamie szorstkim, szczątki inoceramów. Nie rozpada się w HCl; 0,3 m - piaskowiec wapnisty jak wyżej ;0,4 m - opoka jak wyżej; 0,2 m - opoka szara, piaszczysta, ze szczelinami wypełnionymi piaskowcem wapnistym jak wyżej. Nie rozpada się w HCl			
853,0-858,0 santon, 4 m opoka/piaskowiec	4,0 m rdzenia: 1,0 m - opoka szara, zwięzła, z ciemnymi smugami przebiegającymi pod kątem około 15 stopni, ze śladami spirytyzowanych szczątków organicznych. Słabo zachowane inoceramy. Nie rozpada się w HCl; 0,1 m - piaskowiec szary, kwarcowy, wapnisty, zlewny, bardzo twardy, warstwowany pod kątem około 15 stopni. Na płaszczyznach warstwowania liczne ciemne skupienia pirytu, glaukonit nieliczny; 0,4 m - opoka jak wyżej; 0,4 m - piaskowiec jak wyżej z liczniejszym glaukonitem; 1,1 m - opoka ciemnoszara, ilasta, ze skupieniami ziemistego pirytu, o gładkim przełamie, miejscami soczewki i laminy (1-4 mm) piaskowca szarego zlewnego z nielicznym glaukonitem; 0,5 m - piaskowiec jasnoszary, wapnisty, zlewny ,z nielicznym glaukonitem. Nie rozpada się w HCl 0,5 m - piaskowiec jasnoszary, kwarcowy, wapnisty z licznym glaukonitem, średnio zwięzły. W HCl nie rozpada się			
996,0-1003,4 santon, 5 m opoka	2,6 m rdzenia - opoka ciemnoszara z odcieniem oliwkowym, nieco ilasta, plamista (ślady po organizmach), miejscami wkładki (około 20 cm) opoki szarej, plamistej. W górze cienkie pionowe żyłki kalcytu. Ślady detrytusu skorup inoceramów i ułamek amonita. Nie rozpada się w HCl, Upad około 25 stopni			
1140,0-1144,0 koniak, 4 m opoka	4,0 m rdzenia - opoka ciemnoszara ilasta, zwięzła o gładkim przełamie, pękająca na płytki regularne, naprzemianległa z opoką szarą plamistą (ślady po organizmach), smugowaną ciemnoszarą, bardzo twarda. Upad około 20 stopni. Nie rozpada się w HCl			
1310,0-1315,0 koniak, 3 m opoka	3,0 m rdzenia - opoka szara plamista (ślady po organizmach), z ciemnoszarymi smugami (2-5 cm) opoki ilastej, twarda, o przełamie gładkim. Miejscami detrytus skorup inoceramów. Nie rozpada się w HCl. Upad około 30 stopni			
1455,0-1459,6 koniak-turon, 4,6 m opoka/iłowiec	4,6 m rdzenia: 0,5 m - opoka szara, zwięzła, plamista (ślady po organizmach), ku dołowi stopniowo ciemniejsza twarda, o gładkim przełamie. Nie rozpada się w HCl; 0,8 m - iłowiec ciemnoszary, prawie czarny, marglisty, dość miękki, pękający na regularne płytki o gładkim przełamie. Nie rozpada się w HCl; 1,2 m - opoka jak wyżej, spękana, na płaszczyznach spękań przemazy ilasto-margliste ciemnoszare,miejscami ciemne smugi pod kątem około 20st. Nie rozpada się w HCl. Upad 20-30 stopni; 1,2 m - iłowiec marglisty jak wyżej; 0,9 m - opoka szara, zwięzła, plamista, twarda Uwaga: Opisany rdzeń według pomiarów geofizycznych jest przesunięty w dół i pochodzi z głębokości 1451,0-1455,6 m.			
1615,0-1619,6 turon, 1 m opoka/wapień	1,0 m rdzenia: 0,2 m - opoka szara, zwięzła, plamista (ślady po organizmach), twarda o gładkim przełamie. Nie rozpada się w HCl; 0,8 m - wapień jasnoszary, twardy, z przemazami ilasto-marglistymi ciemnoszarymi, dość silnie skrzemionkowany. Szczątki inoceramów. Upad 25-30 stopni			
1765,0-1772,0 turon, 6,5 m margiel, wapień	6,5 m rdzenia: 3,5 m - margiel ciemnoszary z odcieniem oliwkowym, plamisty (ślady po organizmach), dość twardy, pęka na regularne płytki, nieliczny detrytus inoceramów. Miejscami wkładki wapienia szarego marglistego. Skała skrzemionkowana; 3,0 m - wapień szary marglisty, skrzemionkowany,twardy o gładkim przełamie z cienkimi przewarstwieniami margla ciemnoszarego z odcieniem oliwkowym. Upad 25 stopni			
1788,0-1790,0 turon, 2 m wapień	2,0 m rdzenia - wapień szary, marglisty, skrzemionkowany, zwięzły, z nieregularnymi falistymi laminami marglisto-ilastymi, ciemnoszrymi, na ich powierzchni ślady ślizgów. Miejscami pionowe szczeliny spękań. W HCl rozpada się słabo. Nieliczne źle zachowane inoceramy			

1892,0-1900,0 cenoman, 7,5 m wapień	4,0 m rdzenia - wapień jasnoszary, zwięzły, twardy, z przemazami i laminami ilasto-marglistymi, ciemnoszarymi z suturami. Miejscami przechodzi w wapień marglisty szary. Wkładka (30 cm) margla ciemnoszarego z odcieniem oliwkowym. Nieliczny detrytus inoceramów. Thalassinoides isp., Ophiomorpha isp. i Planolites isp. Rozpada się w HCl 3,5 m rdzenia: 1,0 m - wapień jasnoszary, zwięzły, twardy, z przemazami i laminami ilasto-marglistymi, ciemnoszarymi i z suturami. 1,0 m - wapień marglisty szary, twardy, z nieregularnymi cienkimi laminami iłowca marglistego ciemnoszarego. Upad około 20 stopni 1,5 m - wapień jasnoszary nieregularnymi laminami ilasto-marglistymi i suturami			
1938,0-1941,3 cenoman, 3 m wapień	3,0 m rdzenia - wapień szary z odcieniem oliwkowym, marglist, z nieregularnymi laminami ilasto-marglistymi, skrzemionkowany, słabo rozpada się w HCl; wkładki wapienia jasnoszarego, twardego. Liczny detrytus i nieliczne, słabo zachowane okazy inoceramów. Upad 20 stopni			
1985,0-1988,0 alb, 3 m margiel ilasty	3,0 m rdzenia - margiel ilasty ciemnoszarooliwkowy, dość twardy o pokroju płytkowym i przełamie gładkim. W HCl słabo się rozpada na drobne kłaczki. W górnej części liczne, w dolnej nieliczne małże z rodzaju Aucellina			
1988,0-1992,0 alb, 3,5 m margiel	3,5 m rdzenia -margiel jak wyżej, nieliczne aucelliny			
1992,0-1997,4 alb, 5,4 m margiel	5,4 m rdzenia - margiel jak wyżej, skrzemionkowany, nieliczne Aucellina sp.			
2005,0-2007,1 alb, 2,1 m iłowiec/piaskowiec	2,1 m rdzenia (wg pomiarów geofizycznych rdzeń pochodzi z głębokości płytszej niż 2005,0 m) 1,0 m - iłowiec ciemnoszary marglisty, zwięzły,o gładkim przełamie. Nie rozpada się w HCl; 0,5 m - iłowiec ciemnoszary o odcieniu oliwkowym, bezwapienny, dość miękki, o pokroju płytkowym i gładkim przełamie, z nielicznymi ziarnami kwarcu i glaukonitu; 0,5 m - piaskowiec ciemnoszary, kwarcowy, bezwapienny, różnoziarnisty z przewagą ziarn drobnych o spoiwie ilastym, z glaukonitem, zwięzły, twardy, z nielicznymi konkrecjami ciemnobrunatnych fosforytów piaszczystych średnicy 2-4 cm; 0,1 m - piaskowiec kwarcowy, ciemnoszary, drobnoziarnisty z ziarnami grubszymi, zwięzły dość twardy zbioturbowany (laminki i przemazy ilaste zaburzone), z konkrecjami beżowych fosforytów o średnicy 1-2 cm			
8.Poddębice PIG 2 (Leszcze) - – 57,8 m rdzenia (64 skrzynki)		57.8	64	11170
403,0-408,0 kampan, 2 m piaskowiec	2,00 m rdzenia (pokruszonego) – piaskowiec kwarcowy drobnoziarnisty z domieszką ziaren grubych i średnich (do 1,2 mm), fragmentami różnoziarnisty z przewagą ziaren drobnych, o spoiwie ilastym, bardzo słabo zwięzły, rozsypliwy, jasnoszary, prawie biały, bezwapnisty. Upad niemierzalny			
517,0-522,0 kampan, 3,8 m opoka	3,80 m rdzenia – opoka nieco piaszczysta szara i jasnoszara, delikatnie smugowana, zwięzła i dość twarda, z fauną inoceramów, z nielicznymi drobnymi blaszkami muskowitu oraz smugami i przemazami ciemnoszarej substancji ilastej. Przełam szorstki. Upad niemierzalny. Zawartość CaCO3 – 45,4–56,0%			
617,0-620,0 kampan, 1 m opoka	1,00 m rdzenia – opoka marglista, silnie piaszczysta, jasnoszara, ze smugami i przemazami ciemniejszej substancji ilastej, z nielicznym, drobnym muskowitem, zwięzła, dość twarda, miejscami przechodząca w margiel, a w spągu (0,2 m) stopniowo przechodząca w piaskowiec drobnoziarnisty, kwarcowy, szarobiały o spoiwie marglistym, z nielicznym drobnym glaukonitem. Upad niemierzalny. Zawartość CaCO3 – 33,8–34,8%			
715,0-720,0 kampan, 2,8 m piaskowiec/margiel	2,80 m rdzenia, w tym: 1,00 m – piaskowiec drobnoziarnisty, miejscami różnoziarnisty, kwarcowy (ziarna kwarcu niekiedy do 2 mm, błyszczące, na ogół półobtoczone), o spoiwie marglistym, szarożółty, zwięzły, stosunkowo twardy, z nielicznymi minerałami ciemnymi (glaukonit?). Upad niemierzalny. Zawartość CaCO3 – 27,0%; 0,20 m – margiel ilasty, szarobeżowy, smugowany szarym materiałem ilastym, zwięzły. Zawartość CaCO3 – 46,3%; 1,60 m – margiel mułowcowy ilasto-piaszczysty, szary, zwięzły, stosunkowo kruchy, smugowany ciemnoszarym materiałem ilastym, z nielicznym bardzo drobnym muskowitem, miejscami przechodzący w piaskowiec marglisty, a w spągu (0,1m) w mułowiec piaszczysty. Upad niemierzalny. Zawartość CaCO3 – 38,6%			

858,0-861,0 santon, 1,3 m piaskowiec	1,30 m rdzenia – piaskowiec kwarcowy, bardzo drobnoziarnisty i drobnoziarnisty, z nielicznymi ziarnami średnimi i grubymi, jasnoszary, prawie biały, słabo zwięzły, kruchy, o spoiwie ilastym, bezwapnisty, w spągu (0,1 m) przechodzący w piaskowiec mułowcowy i mułowiec piaszczysty. Upad niemierzalny			
916,0-921,0 santon, 3 m opoka/piaskowiec	3,00 m rdzenia, w tym: 0,40 m – opoka marglisto-piaszczysta, szara, delikatnie smugowana, stosunkowo zwięzła, krucha, z nielicznymi drobnymi blaszkami muskowitu. Upad niemierzalny. Zawartość CaCO3 – 41,5%. Stopniowe przejście do niżej leżącego piaskowca; 2,60 m (pokruszony) – piaskowiec kwarcowy, drobno- i średnioziarnisty o spoiwie marglistym, stosunkowo zwięzły, kruchy, jasnoszary, z nielicznymi drobnymi blaszkami muskowitu i ziarnami minerałów ciemnych (glaukonit?). Piaskowiec ten miejscami przechodzi w twardszy i zwięźlejszy piaskowiec szary o spoiwie krzemionkowo-wapnistym. Upad niemierzalny. Zawartość CaCO3 – 3,9%			
972,0-978,0 santon, 4,6 m opoka	4,60 m rdzenia – opoka szara, zwięzła, stosunkowo twarda, smugowana, o przełamie na ogół nierównym, szorstkim, z pokruszonymi skorupami inoceramów. Upad niemierzalny. Zawartość CaCO3 – 53,1%			
1066,0-1072,0 santon, 5,5 m opoka	5,50 m rdzenia – opoka szara, zwięzła, stosunkowo twarda, smugowana, niekiedy plamista (ślady po organizmach), o przełamie na ogół równym, szorstkim, czasem gładkim, z nielicznymi skupieniami ziemistego pirytu i fragmentami skorup inoceramów. Upad niemierzalny. Zawartość CaCO3 – 57,9–70,4%			
1205,0-1210,0 koniak, 4,2 m opoka	4,20 m rdzenia – opoka szara, ku spągowi przechodząca w margiel, miejscami silnie skrzemionkowany, coraz ciemniejszy do ciemnoszarego. Skała zwięzła, dość twarda, delikatnie smugowana, miejscami plamista (ślady po organizmach) o przełamie równym, gładkim lub lekko szorstkim, z fragmentami skorup inoceramów i skupieniami ziemistego pirytu. Ku spągowi pojawiają się drobne blaszki muskowitu. Upad niemierzalny. Zawartość CaCO3 – 44,4–49,2%			
1310,0-1312,0 koniak, 1,2 m opoka	1,20 m rdzenia – opoka szara, zwięzła, stosunkowo twarda, jak w rdzeniu z głębokości 1205,0–1210,0 m, bez szczątków inoceramów. Upad niemierzalny. Zawartość CaCO3 – 43,4–49,2%			
1414,0-1419,0 koniak, 4,8 m opoka	4,80 m rdzenia – opoka szara i ciemnoszara, zwięzła, stosunkowo twarda, smugowana, z nielicznymi plamkami i drobnym muskowitem oraz fragmentami skorup inoceramów, przełam równy, lekko szorstki do gładkiego. Upad niemierzalny. Zawartość CaCO3 – 43,4–50,2%			
1520,0-1526,0 koniak dln-turon, 4,8 m opoka	4,80 m rdzenia – opoka szara, zwięzła, twarda, o przełamie równym, gładkim, lekko, nieregularnie smugowana. Co kilkanaście centymetrów występują ciemnoszare przewarstwienia (o grubości od 1,0 do kilku cm) marglu ilastego, kruchego, z drobnym muskowitem. Planolites isp., Zoophycos isp., Ophiomorpha isp. i inne nieoznaczone. Upad ok. 5°. Zawartość CaCO3 – 48,3–63,8%			
1630,0-1634,0 konak dln-turon, 0,2 opoka	0,20 m rdzenia – opoka szara, zwięzła, zbita, bardzo twarda, z nieregularnym smugowaniem, tworzącym słabo zarysowane, drobne, wydłużone soczewki. Upad niemierzalny. Zawartość CaCO3 – 61,1%			
1671,0-1675,0 koniak dln-turon, 3,7 m opoka	3,70 m rdzenia – opoka szara, zwięzła, zbita, bardzo twarda, lekko, nieregularnie smugowana, o przełamie równym, gładkim, czasem szorstkim. Co kilkadziesiąt centymetrów występują przerosty ilasto-margliste ciemnoszare, prawie czarne, kruche, laminowane (nieco wzbogacone w muskowit) o grubości od 1,0 do kilku centymetrów. Nieliczne skorupy i fragmenty inoceramów. Upad 5°. Zawartość CaCO3 – 28,0–53,1%			
1789,0-1793,0 turon, 4 m wapień	4,00 m rdzenia – wapień marglisty, przechodzący w margiel, szary, twardy, zbity, zwięzły, miejscami skrzemionkowany, przełam równy, gładki. Zawiera kilkucentymetrowe warstewki czarnego iłowca marglistego z muskowitem. Na głębokości: 1789,5; 1789,8 i 1792,9 m występują spękania wypełnione czarnym iłem, tworzące kąt 75°. Na głębokości 1791,1 m płaszczyzna ślizgu pod kątem ok. 50°. Fauny brak. Upad 0–5°. Zawartość CaCO3 –39,6–75,3%			

1891,0-1895,0 turon, 2,8 m wapień/margiel	2,80 m rdzenia, w tym: 0,80 m – wapień marglisty, jasnoszary i szary, ku spągowi coraz ciemniejszy, zwięzły, przełam nierówny, liczne nieregularne laminy ilasto-marglisteoraz wkładki (1 cm) margliste i ilaste. Występują fragmenty skorup inoceramów. Zawartość CaCO3 – 75,2%; 0,30 m – margiel ciemnoszary, miejscami laminowany, bardzo kruchy, łupliwy, nieliczny, bardzo drobny muskowit; 0,30 m – wapień marglisty, zwięzły, jasnoszary jak na początku marszu rdzeniowego, przechodzący stopniowo w leżący niżej margiel; 0,70 m – margiel ciemnoszary, miejscami laminowany, bardzo kruchy, łupliwy, z nielicznym drobnym muskowitem i okruchami skorup inoceramów. Zawartość CaCO3 – 56,4–58,3%; 0,70 m – wapień marglisty, jak na początku marszu, z licznymi nieregularnymi przemazami i laminami marglistymi. Upad 0–5°. Zawartość CaCO3 – 79,0%			
2001,0-2006,0 cenoman, 4,7 m wapień/margiel	4,70 m rdzenia, w tym: 2,40 m – wapień marglisty, jasnoszary, zwięzły, dość twardy, o przełamie równym, gładkim, z ciemnoszarymi przemazami i nieregularnymi lub falistymi laminami marglistymi, niekiedy tworzącymi drobne, wydłużone soczewki. Zawartość CaCO3 – 81,1%; 0,50 m – margiel szary, zwięzły, nieco łupliwy, plamisty (ślady po organizmach) z nieregularnymi czarnymi smugami i laminami ilastymi, niekiedy tworzącymi drobne, płaskie soczewki. Pokruszone skorupy inoceramów. Margiel ten stopniowo przechodzi w leżący niżej wapień marglisty. Zawartość CaCO3 – 68,5%; 0,50 m – wapień marglisty jasnoszary do prawie białego, smugowany, twardy, jak na początku marszu rdzeniowego; 0,20 m – margiel ciemnoszary jw.; 0,70 m – wapień marglisty jasnoszary, smugowany, z plamkami, jak na początku marszu. Zawartość CaCO3 – 79,1%; 0,40 m – margiel ciemnoszary, smugowany z nieregularnymi laminami, niekiedy tworzącymi drobne, wydłużone soczewki, miejscami z plamkami. Nieliczne fragmenty skorup inoceramów. W spągu 0,05 m jasnoszarego, twardego wapienia marglistego. Upad ok. 0–50°			
2106,0-2110,0 alb grn, 3,4 m margiel	3,40 m rdzenia (pokruszonego) – margiel ilasty, szary do ciemnoszarego, średniozwięzły, bardzo kruchy, ze słabo widocznym smugowaniem. Upad niemierzalny. Zawartość CaCO3 – 36,7–44,2%			
9.Polik IG 1 (Leszcze) – 12,2 m rdzenia (13 skrzynek)		12.2	13	13092
402,0–408,0 mastrycht, 6 m wapień/opoka	6,0 m rdzenia (w skrzynce IV rdzeń całkowicie pokruszony) – wapień marglisty, ku dołowi przechodzący w margiel z przerostami opoki marglistej; skała w całości jednolita, białoszara, miejscami krucha lub średnio zwięzła, dość lekka, miejscami drobnoporowata; opoka reaguje z HCl wolno i rozpada się na grudki; opoka marglista jest drobnoporowata i nie kruszy się. W skrzynce III w rdzeniu widoczne spękania przebiegające prawie pionowo. Z fauny znaleziono odcisk małża i fragment jeżowca. Według danych mikropaleontologicznych próbki z głęb. 403,0–403,8 m pochodzą z warstw mastrychtu górnego. W próbce z głęb. 408,0 m obok otwornic charakterystycznych dla mastrychtu górnego występuje otwornica przewodnia dla mastrychtu dolnego. Na głęb. 402,0 m zawartość CaCO3 – 79,1%, CaMg(CO3)2 – 0%, na głęb. 403,0 m zawartość CaCO3 – 70,4%, CaMg(CO3)2 – 0%			
1195,0-1205,0 cenoman, 6,2 m wapień	3,7 m rdzenia – wapień biały, bardzo zbity, bardzo twardy, bardzo zwięzły, zlewny, ciężki, z nikłymi ciemniejszymi plamami (ślady po organizmach), miejscami smugowany, miejscami z cienkimi i grubymi laminami szarego wapienia marglistego ściśle związanego ze skałą właściwą; występują warstewki szarego wapienia marglistego, zwięzłego, ale miejscami z tendencją do łupliwości; w dwóch warstewkach na samym dole występują drobne, płaskie, soczewkowate intraklasty białego wapienia; w warstewkach widoczne nagromadzenia skorup inoceramów; na głęb. 1,2 m (licząc od góry marszu) występują warstewki o grubości 4 cm; na głęb 1,3 i 2,8 m – 7 cm. Deformacje: w skrzynce I małe płaszczyzny ślizgu pod kątem 30 i 60°, w skrzynkach II i III pionowe pęknięcia. Fauna: Inoceramus cf. crippsi Mantel 2,5 m rdzenia – wapień biały jw., ze smugami i laminami wapienia marglistego, szarego. Liczne deformacje: w skrzynce I płaszczyzny ślizgów pod kątem 55–60 i 90° powleczone szarym iłem marglistym; w skrzynce II płaszczyzna ślizgu pod kątem 80–85° nie powleczona iłem; w skrzynce III na krótkim odcinku występuje pionowe pęknięcie; w skrzynce IV płaszczyzna ślizgu pod kątem 80° powleczona szarym iłem marglistym, szorstkim			
10.Strzelno IG 1 (Leszcze) – 20,0 m rdzenia (zredukowany – 20 skrzynek)		20	20	62352
149,7-156,7 kampan, 2 skrz geza	**rdzeń zredukowany** 6,8 m rdzenia - geza wapnista szara, z próżniami po igłach gąbek, miejscami próżnie są liczniejsze, miejscami ich nie ma, z nielicznymi opalowymi spikulami. Średnio twarda, dość lekka. W HCl nie rozpada się			

773,0-779,0 santon,2 skrz, opoka	**rdzeń zredukowany** 5,2 m rdzenia - opoka ilasta ciemnoszara, zwięzła, twarda, o przełamie gładkim. W HCl nie rozpada się. Fauna: Inoceramus cardisspides Goldf.			
824,8-831,4 turon, 2 skrz opoka	**rdzeń zredukowany** 17,0 m rdzenia - opoka zwięzła, szara, plamista (ślady po organizmach), bardzo twarda, z licznymi płaszczyznami ślizgu z nalotami czarnej substancji ilastej oraz z żyłkami kalcytu. Na głębokości 830,7 m szczelina szerokości 4 cm jest wypełniona kalcytem. W całej warstwie występują liczne wkładki opoki ilastej, ciemnoszarej,miąższości 10-60 cm			
874,3-880,9 turon, 1 skrz opoka	**rdzeń zredukowany** 28,0 m rdzenia - opoka zwięzła, szara, plamista (ślady po organizmach), z ciemnoszarymi smugami, bardzo twarda, z licznymi wkładkami opoki ilastej, ciemnoszarej, miąższości od 2 do 50 cm. Miejscami dość liczne płaszczyzny ślizgu z nalotami ciemnoszarej substancji ilastej oraz żyłki kalcytu. W HCl nie rozpada się			
938,4-944,4 turon, 2 skrz opoka	**rdzeń zredukowany** 6 m rdzenia - opoka zwięzła, szara, silnie zbioturbowana, smugowana ciemnoszarymi smużkami, bardzo twarda. Miejscami nieregularne cienkie laminy ilaste, skrzemionkowane. Na głębokości 942,0-942,4 m wkładka opoki silnie ilastej, ciemnoszarej, o pokroju płytkowym, zwięzłej, twardej. Skała w HCl nie rozpada się. W spągu upad 20 stopni			
968,4-974,0 turon, 3 skrz wapień	**rdzeń zredukowany** 5,6 m rdzenia - wapień marglisty jasnoszary plamisty (ślady po organizmach) i smugowany, zwięzły, bardzo twardy z nieregularnymi laminami ilasto-marglistymi, z soczewkami, lawinkami i podrzędnie z wkładkami margli ciemnoszarych z odcieniem oliwkowym. W HCl rozpada się. Fauna: Inoceramus inconstans Woods			
1021,0-1027,0 cenoman, 5 skrz iłowiec/margiel	2,2 m rdzenia - iłowiec marglisty ciemnoszary prawie czarny, zwięzły, twardy, o pokroju płytkowym, z pojedynczymi łuskami ryb i szczątkami inoceramów. Podrzędnie występują wkładki margli ciemnoszarych z odcieniem oliwkowym, silnie plamiste (ślady po organizmach), skrzemionkowane, bardzo twarde 0,8 m rdzenia - margiel szarozielony, twardy, silnie skrzemionkowany, z licznymi płaszczyznami ślizgu. Na głębokości 1023,3-1023,4 m wkładka iłowca marglistego czarnego, z płaszczyznami ślizgu 3,0 m rdzenia - margiel szary z odcieniem oliwkowym, bardzo plamisty (ślady po organizmach), zwięzły, twardy, silnie skrzemionkowany, w górnej części z płaszczyznami ślizgu. Na głębokości 1025,5-1025,8 oraz 1026,5-1027,0 m występuje margiel ilasty ciemnoszarooliwkowy, silnie plamisty, skrzemionkowany. Pokrój płytkowy, przełam gładki. Planolites isp.			
1027,0-1028,0 cenoman, 3 skrz margiel	1,4 m rdzenia - margiel ciemnoszary z odcieniem oliwkowym, plamisty (ślady po organizmach), zwięzły, dość twardy, z płaszczyznami ślizgu i żyłkami kalcytu. W spągu około 30-centymetrowa wkładka wapienia marglistego, szarego z ciemniejszymi plamami, zwięzłego, bardzo twardego. W HCl rozpada się			
11.Żychlin IG 3 (Leszcze) – 24,2 m rdzenia (32 skrzynki)		24.2	32	93807
295,0-301,0 santon, 4,5 m wapień	4,5 m rdzenia - wapień marglisty biały, dość twardy, plamisty (ślady po organizmach), jasnoszary, z licznymi nieregularnymi drobnymi jasnoszarymi czertami. W płytce cienkiej na tle spoiwa ilasto-węglanowego są widoczne otwornice, nieliczne ziarna glaukonitu wielkości 0,02-0,07 mm i rozsiany piryt pelitowy. Zawartość CaCO3 na głębokości 296,0 m wynosi 79,8%. Fauna: spirytyzowane szczątki gąbek, Inoceramus sp., Inoceramus cf. digitatus Sowerby			
396,0-402,0 turon, 4,6 m wapień	4,6 m rdzenia - wapień marglisty biały, średniej twardości, miejscami skrzemionkowany, plamisty (ślady po organizmach), jasnoszary, z częstymi jasnoszarymi czertami, w dolnej części jasnoszary. W płytce cienkiej na tle spoiwa ilasto-węglanowego są widoczne otwornice i jedno ziarno glaukonitu wielkości 0,04 mm, piryt ziemisty. Zawartość CaCO3, na głębokości 397,0 m wynosi 66,08%. Fauna: spirytyzowane szczątki gąbek, Inoceramus sp., szczątki łusek ryb			

503,5-510,0 turon, 6,5 m wapień	6,5 m rdzenia - wapień marglisty biały, zwięzły, bardzo twardy, smugowany jasnoszarozielonawym marglem, wkładki (grubości kilku centymetrów) wapienia marglistego zielonawego miększego. Skała z nieregularną, nieciągłą laminacją falistą i soczewkową. W płytkach cienkich na tle spoiwa ilasto-węglanowego są widoczne otwornice, oligosteginy, rozproszony piryt pelitowy. Zawartość CaCO3 na głębokości 504,0 m wynosi 69,4%. Fauna: fragmenty skorup inoceramów; Inoceramus cf. labiatus Schlotheim			
540,0-546,0 cenoman, 6 m wapień	6,0 m rdzenia - wapień marglisty biały, zwięzły, bardzo twardy, miejscami z zielonymi plamami marglistymi. Dwa przerosty wapienia marglistego jasnoszarozielonawego (grubości około 20 cm). Nieliczne płaszczyzny ślizgów. Miejscami w wapieniu są widoczne rozsiane włókna inoceramów. W płytkach cienkich na tle spoiwa ilasto-węglanowego są widoczne otwornice oraz włókna inoceramów. Zawartość CaCO3 na głębokości 540,5 m wynosi 80,4%. Fauna: Inoceramus sp. (2 okazy), Inoceramus cf. crippsi Mantell (5 okazów), Inoceramus aff. crippsi Mantell, Entolium sp.			
571,0-577,0 cenoman, 2,6 m wapień	2,6 m rdzenia - wapień marglisty, biały, zwięzły, bardzo twardy, intensywnie plamisty szarym, z dwoma przerostami wapienia jasnoszarego. W wapieniu jasnoszarym występują ławice inoceramów oraz liczne skupienia pirytu pelitowego. W płytkach cienkich na tle spoiwa ilasto-węglanowego są widoczne nieliczne otwornice i okruchy włókien inoceramów, piryt pelitowy. Zawartość CaCO3 na głębokości około 572,0 m wynosi 79,4%. Fauna: Inoceramus sp., Inoceramus crippsi Mantell, Inoceramus cf crippsi Mantell (3 okazy), Inoceramus cf. scalprum Boehm. Planolites isp., ?Ophiomorpha isp. i ?Chondrites isp. Widoczne mikrouskoki.			

4.2.1 Miąższość sekwencji węglanowej i węglanowo-krzemionkowej górnej kredy

Sukcesja węglanowa i węglanowo-krzemionkowa górnej kredy (łącznie z albem górnym) na obszarze centralnej Polski ma w analizowanych otworach wiertniczych miąższość od 510,5 m (Żychlin IG3) do 2159,5 m (Banachów IG1). Analiza przekrojów sejsmicznych wskazuje, że w niektórych strefach synklinalnych na pograniczu niecki mogileńskiej i niecki uniejowskiej jej miąższość jest jeszcze większa i przekracza 2500 m. Tak duże miąższości obserwuje się na SW od otworu wiertniczego Strzelno IG1 oraz po obu stronach słupa solnego Ponętowa (Fig. 4-1 i Fig. 4-2). Na przykład w otworze hydrogeologicznym Koło GT1, odwierconym w roku 2018, miąższość kredy górnej z albem górnym wynosi 2536,0 m. Po północno-wschodniej stronie wału śródpolskiego miąższości są mniejsze niż po stronie południowo-zachodniej w nieckach mogileńskiej i uniejowskiej, i nie przekraczają 1300 m. Omawiana sukcesja przykrywa piaszczystą formację mogileńską (barrem-alb środkowy), która jest dobrym poziomem zbiornikowym o miąższościach przekraczających 100 m (Raczyńska, 1979).

Ku osi wału śródpolskiego, na jego obu skłonach, sukcesja górnej kredy wyklinowuje się wskutek procesów inwersji tektonicznej bruzdy śródpolskiej, zachodzących w późnej kredzie i na przełomie kredy i paleogenu. Na wale śródpolskim kreda górna została całkowicie zerodowana, a pod spągową powierzchnią utworów kenozoiku występują skały kredy dolnej i jury (Fig. 4-1 i Fig. 4-2).

4.2.2 Stratygrafia i litologia z elementami sedymentologii

Stratygrafia sukcesji górnej kredy opiera się na danych z licznych opracowań publikowanych i archiwalnych, dotyczących badań stratygraficzno-litologicznych i poszukiwawczych prowadzonych na obszarze centralnej Polski (m.in. Jaskowiak-Schoeneichowa, 1977; Jaskowiak-Schoeneichowa i Krassowska, 1983; Leszczyński, 2002; CBDG, 2008). Podział chronostratygraficzny górnej kredy dostosowano do schematu standardowego ustanowionego w rezultacie prac prowadzonych w ramach sympozjów kredowych w Kopenhadze i Brukseli (Birkelund i in., 1984; Rawson i in., 1995; Bengtson, 1996).

Chronostratygrafię i miąższości sekwencji górnej kredy (z albem górnym) w poszczególnych otworach wiertniczych przedstawia Tabela 4-2.

Tabela 4-2 Chronostratygrafia i miąższości sekwencji górnej kredy (z albem górnym) w rozpatrywanych 11 otworach

Otwór (miąższość całkowita K2+Kal3	Głębokość sekwencji [m]		Miąższość sekwencji [m]	Stratygrafia sekwencji
	od	do		
Banachów IG1 (2159,5 m)	22,0	394,0	372,0	mastrycht
	394,00	960,00	566,00	kampan
	960,00	1 397,50	437,50	santon
	1 397,50	1 677,00	279,50	koniak górny-środkowy
	1 677,00	2 053,50	376,50	koniak dolny-turon
	2 053,50	2 152,00	98,50	cenoman

	2 152,00	2 181,50	29,50	alb górny
Gostynin IG1/1A (595,0 m)	144,00	314,00	170,00	kampan
	420,00	437,00	17,00	santon dolny
	437,00	493,00	56,00	koniak górny-środkowy
	493,00	652,00	159,00	koniak dolny-turon
	652,00	731,50	79,50	cenoman
	731,50	739,00	7,50	alb górny
Gostynin IG4 (1028,0 m)	133,00	260,00	127,00	mastrycht górny
	260,00	392,00	132,00	mastrycht dolny
	392,00	687,00	295,00	kampan
	687,00	815,00	128,00	santon górny
	815,00	846,00	31,00	santon dolny
	846,00	901,00	55,00	koniak górny-środkowy
	901,00	1 067,00	166,00	koniak dolny-turon
	1 067,00	1 154,00	87,00	cenoman
	1 154,00	1 161,00	7,00	alb górny
Grudziądz IG1 (859,0 m)	181,00	346,00	165,00	mastrycht
	346,00	604,00	258,00	kampan
	604,00	726,00	122,00	santon
	726,00	785,00	59,00	koniak górny-środkowy
	785,00	953,00	168,00	koniak dolny - turon
	953,00	1 038,00	85,00	cenoman
	1 038,00	1 040,00	2,00	alb górny
Koło IG3	45,00	210,00	165,00	mastrycht

(1731,0 m)				
	210,00	787,00	577,00	kampan
	787,00	1 140,00	353,00	santon
	1 140,00	1 361,50	221,50	koniak górny-środkowy
	1 361,50	1 672,00	310,50	koniak dolny-turon
	1 672,00	1 756,00	84,00	cenoman
	1 756,00	1 776,00	20,00	alb górny
Koło IG4 (1700,0 m)	17,00	152,00	135,00	mastrycht
	152,00	647,00	495,00	kampan
	647,00	1 047,00	400,00	santon
	1 047,00	1 226,00	179,00	koniak górny-środkowy
	1 226,00	1 606,50	380,50	koniak dolny-turon
	1 606,50	1 688,50	82,00	cenoman
	1 688,50	1 717,00	28,50	alb górny
Poddębice IG1 (1736,5 m)	268,50	627,00	358,50	kampan
	627,00	1 108,00	481,00	santon
	1 108,00	1 382,50	274,50	koniak górny-środkowy
	1 382,50	1 855,00	472,50	koniak dolny-turon
	1 855,00	1 960,50	105,50	cenoman
	1 960,50	2 005,00	44,50	alb górny
Poddębice PIG2 (1842,5 m)	272,50	723,00	450,50	kampan
	723,00	1 169,00	446,00	santon
	1 169,00	1 481,00	312,00	koniak górny-środkowy
	1 481,00	1 956,00	475,00	koniak dolny-turon

	1 956,00	2 061,50	105,50	cenoman
	2 061,50	2 115,00	53,50	alb górny
Polik IG1 (959,0 m)	256,50	408,00	151,50	mastrycht górny
	408,00	609,00	201,00	mastrycht dolny
	609,00	840,00	231,00	kampan
	840,00	946,00	106,00	santon
	946,00	997,50	51,50	koniak górny-środkowy
	997,50	1 155,00	157,50	koniak dolny-turon
	1 155,00	1 207,50	52,50	cenoman
	1 207,50	1 215,50	8,00	alb górny
Strzelno IG1 (966,0 m)	71,50	520,00	448,50	kampan
	520,00	780,00	260,00	santon
	780,00	812,00	32,00	koniak górny-środkowy
	812,00	1 021,00	209,00	koniak dolny-turon
	1 021,00	1 032,00	11,00	cenoman
	1 032,00	1 037,50	5,50	alb górny
Żychlin IG3 (510,5 m)	92,00	215,00	123,00	kampan
	215,00	301,00	86,00	santon
	301,00	354,00	53,00	koniak górny-środkowy
	354,00	510,00	156,00	koniak dolny-turon
	510,00	597,50	87,50	cenoman
	597,50	602,50	5,00	alb górny

4.2.3.1 Profilowania litologiczno-sedymentologiczne wybranych fragmentów rdzeni i korelacje chronostratygraficzno-litofacjalne

Stratygrafia i litologia

Przeprowadzono standardowe makroskopowe profilowania litologiczne rdzeni wiertniczych w utworach górnej kredy w wytypowanych 11 otworach (Fig. 4-1) ze szczególnym uwzględnieniem obserwacji struktur sedymentacyjnych oraz przeanalizowano krzywe pomiarów geofizyki wiertniczej. Na Fig. 4-4 pokazano przykładowo krzywe dla otworów Poddębice PIG2 i Grudziądz IG1. Zapis jest monotonny ze względu na niewielką zmienność własności petrofizycznych i chemicznych skał w profilu kredy górnej i na ogół bardzo stopniowe przejścia pomiędzy poszczególnymi litologicznymi typami skał.

Poniżej przedstawiony został opis litologiczno-stratygraficzny utworów kredy górnej (z albem górnym), czyli nadkładu formacji mogileńskiej, w centralnej Polsce w podziale na poszczególne piętra (i podpiętra) na podstawie zebranych informacji.

Na utworach piaszczystych formacji mogileńskiej (barrem-alb środkowy) w centralnej Polsce leży **alb górny**. Reprezentuje go cienka warstwa (na ogół około 1 m) transgresywnego piaskowca kwarcowego z glaukonitem i konkrecjami fosforytowymi, przechodzącego ku górze w iłowiec ciemnoszary, piaszczysty i marglisty. Powyżej węglanowość skał wyraźnie wzrasta i pojawia się margiel ilasty, szary do ciemnoszarego oraz ciemnoszarooliwkowy, dość twardy, o pokroju płytkowym, średniozwięzły, ze słabo widocznym smugowaniem, lokalnie nieco skrzemionkowany. W spągu margiel ten jest silnie piaszczysty, z glaukonitem, szarozielony, czasem z pojedynczymi konkrecjami fosforytów (Fig. 4-5 (1)). W stropie albu lokalnie występuje wapień marglisty biały, miejscami jasnoszary, zwięzły, twardy, z rozsianymi licznymi włóknami inoceramów. W badanych otworach wiertniczych alb górny ma zróżnicowaną miąższość od 2,0 m w otworze Grudziądz IG1 do 53,5 m w otworze Poddębice PIG2.

Cenoman ma miąższość od zaledwie 11,0 m w otworze Strzelno IG1 do 105,5 m w otworach Poddębice IG1 i PIG2. Dominująca litologia to (1) wapień marglisty biały do szarego, zwięzły, twardy, z warstewkami (grubości kilku centymetrów) wapienia marglistego jasnoszarego, słabo smugowanego, z nieregularną laminacją falistą i soczewkową (Fig. 4-5 (4)) i warstewkami marglu szarego, (2) wapień pelityczny jasnoszary lub biały, miejscami skrzemionkowany, czasem zlewny, masywny, twardy, z nieregularnymi falistymi laminami ciemnoszarego marglu ilastego, (3) margiel szary, zwięzły, nieco łupliwy, plamisty z nieregularnymi czarnymi smugami i laminami ilastymi, niekiedy tworzącymi drobne, płaskie soczewki. W otworze Grudziądz IG1, w górnej części cenomanu stwierdzono iłowiec marglisty ciemnoszary (o zawartości $CaCO_3$ 16,4-26,5%), zwięzły, miejscami z konkrecjami pirytu, margiel mulasty ciemnoszary z liczną miką, zwięzły, dość twardy, z pojedynczymi konkrecjami pirytu, oraz margiel silnie ilasty ciemnoszary z liczną miką. W wapieniach widoczna jest bioturbacja. Skamieniałości śladowe reprezentowane są przez *Thalassinoides* isp., *Ophiomorpha* isp., *Chondrites* isp. i *Planolites* isp. (Fig. 4-5 (2), (3), (5)).

Interwał **turon – koniak dolny** ma miąższość od 156,0 m w otworze Żychlin IG3 do 475,0 m w otworze Poddębice PIG2. W dolnej części na ogół przeważają wapienie i margle, w górnej większą rolę odgrywają opoki. Wapienie i wapienie margliste są przeważnie białe, jasnoszare i szare, zwięzłe, z nielicznymi laminami lub smugami szarego marglu, miejscami skrzemionkowane, plamisty, lokalnie z laminacją soczewkową i falistą (Fig. 4-5 (7), (8)), oraz wkładkami margli ciemnoszarych, miejscami

z jasnoszarymi czertami (Fig. 4-6 (1), (2), (3)). Opoki to skały szare, zwięzłe, plamiste, twarde, smugowane, niekiedy z przewarstwieniami iłowców marglistych (Fig. 4-6 (4), (5)). W otworze Grudziądz IG1 stwierdzono również opoki mulaste. Margle są szare do ciemnoszarych, miejscami laminowane, niekiedy kruche i łupliwe (Fig. 4-5 (9)). Występują też margle szarooliwkowe, plamiste, z soczewkami i cienkimi (2-5 cm) wkładkami wapienia marglistego szarego. W skałach dość powszechna jest bioturbacja. W spągu turonu w niecce mogileńsko-uniejowskiej występuje iłowiec marglisty ciemnoszary prawie czarny, zwięzły, twardy, o pokroju płytkowym (Fig. 4-5 (6)). Podrzędnie zawiera on wkładki margli ciemnoszarych i opok ilastych, szarych, silnie plamistych. Iłowiec ten ma niewielką miąższość, na ogół rzędu kilku-kilkunastu metrów. W badanych otworach największą osiąga w wierceniu Poddębice IG1 gdzie w spągu turonu występuje seria iłowców przewarstwianych marglami, o miąższości 19,0 m.

Koniak środkowy-górny ma miąższość od 51,5 m w otworze Polik IG1 do 312,0 m w otworze Poddębice PIG2. W niecce brzeżnej dominują wapienie margliste białe do szarych, na ogół twarde, z czertami białymi i jasnoszarymi. W niecce mogileńsko-uniejowskiej przeważają opoki zwięzłe i opoki ilaste, ciemnoszare i szare, plamiste, twarde, z cienkimi (do 2 cm) laminami marglu ciemnoszarego, ilastego, często smugowane, i z nielicznymi krzemieniami. Opoki mulaste stwierdzono w otworze Grudziądz IG1. W rejonie Koła i Poddębic w rdzeniu oznaczono skamieniałości śladowe *Planolites* isp., *Zoophycos* isp., *Ophiomorpha* isp. I ?*Thalassinoide*s isp. (Fig. 4-5 (11), (12)).

Santon ma miąższość od 86,0 m w otworze Żychlin IG3 do 481,0 m w otworze Poddębice IG1. Podobnie jak w starszych piętrach, w niecce brzeżnej powszechniejsze są wapienie margliste, a w niecce mogileńsko-uniejowskiej opoki. Wapienie margliste są białe (szczególnie rejon Gostynina) i jasnoszare, dość twarde, plamiste, i zawierają czerty. Opoki są szare i ciemnoszare z odcieniem oliwkowym, plamiste, zwięzłe, stosunkowo twarde, niekiedy o pokroju płytkowym, lokalnie ilaste i margliste (Fig. 4-6 (6)). Miejscami występują warstwowania poziome. Czasem spotyka się w nich wkładki margli i wapieni marglistych. W rejonie Koło-Poddębice stwierdzono przewarstwienia i grubsze pakiety piaskowca jasnoszarego, zlewnego, z glaukonitem, o spoiwie marglistym, miejscami słabiej zwięzłego i porowatego o znacznej przepuszczalności.

Kampan ma miąższość od 123,0 m w otworze Żychlin IG3 (z tym, że profil jest od góry zerodowany wskutek inwersji pokredowej) do 577,0 m w otworze Koło IG3. Tak jak w niższych piętrach, w kampanie dominują opoki i opoki margliste, szare, zwięzłe, często smugowane (Fig. 4-6 (7)), oraz wapienie margliste jasnoszare i szare, często plamiste, smugowane, zwięzłe, twarde, lokalnie z bioturbacją (*Planolites* isp. i inne - Fig. 4-5 (12)). W skałach tych pojawiają się wkładki margli ciemnoszarych, ilastych. W niecce brzeżnej wapienie są jaśniejsze, nieco mniej zwięzłe i „bielące", miejscami gruzłowe (Fig. 4.6.8). Występują też wapienie margliste kredopodobne, białe, lekkie i miękkie, z jasnoszarymi czertami. W otworze Gostynin IG1/1A stwierdzono także wkładkę mułowca szarego, wapnistego, smugowanego oraz margiel szary, smugowany ciemniejszym. W otworze Poddębice PIG2 nawiercono piaskowiec kwarcowy drobnoziarnisty z domieszką ziaren grubych i średnich (do 1,2 mm), fragmentami różnoziarnisty, bardzo słabo zwięzły, rozsypliwy, oraz opokę nieco piaszczystą szarą i jasnoszarą, delikatnie smugowaną. W górnej części profilu Strzelna IG1 stwierdzono występowanie gez. Skały te wyinterpretowano też w otworze Koło IG3 na podstawie pomiarów geofizyki wiertniczej i analizy próbek okruchowych.

Mastrycht ma miąższość od 135,0 m w otworze Koło IG4 do 372,0 m w otworze Banachów IG1. Górna jego granica ma wszędzie charakter erozyjny. W otworach Gostynin IG1/1A, Żychlin IG3, Strzelno IG1, Poddębice IG1 i Poddębice PIG2 mastrycht nie występuje. W litologii dominują wapienie margliste, margle i opoki. Skały lokalnie bywają piaszczyste (np. Grudziądz IG1).

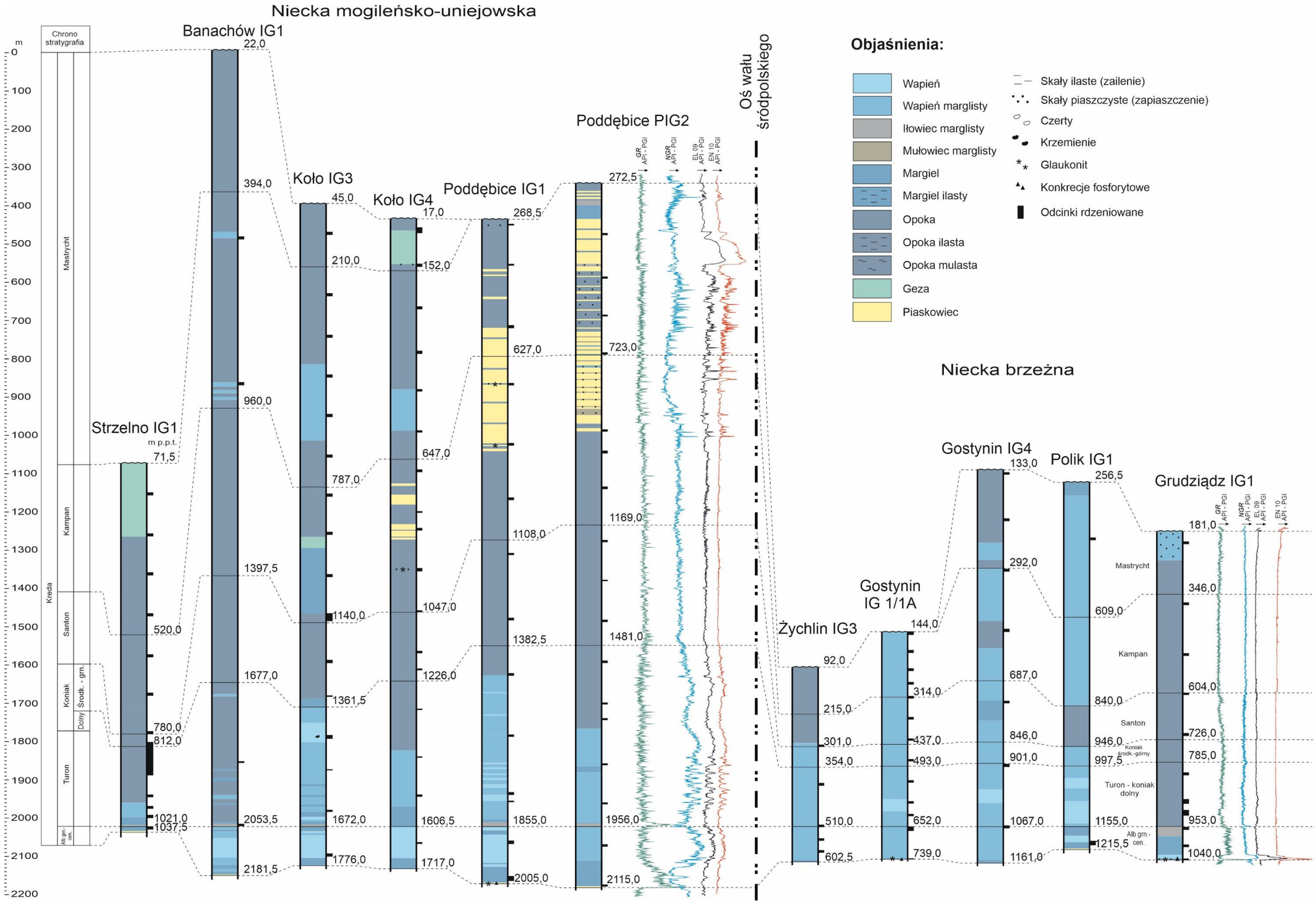


Fig. 4-4 Korelacja litologiczna i stratygraficzna kredy górnej (z albem górnym) w 11 otworach wiertniczych centralnej Polski (lokalizacja otworów na Fig. 4.1)

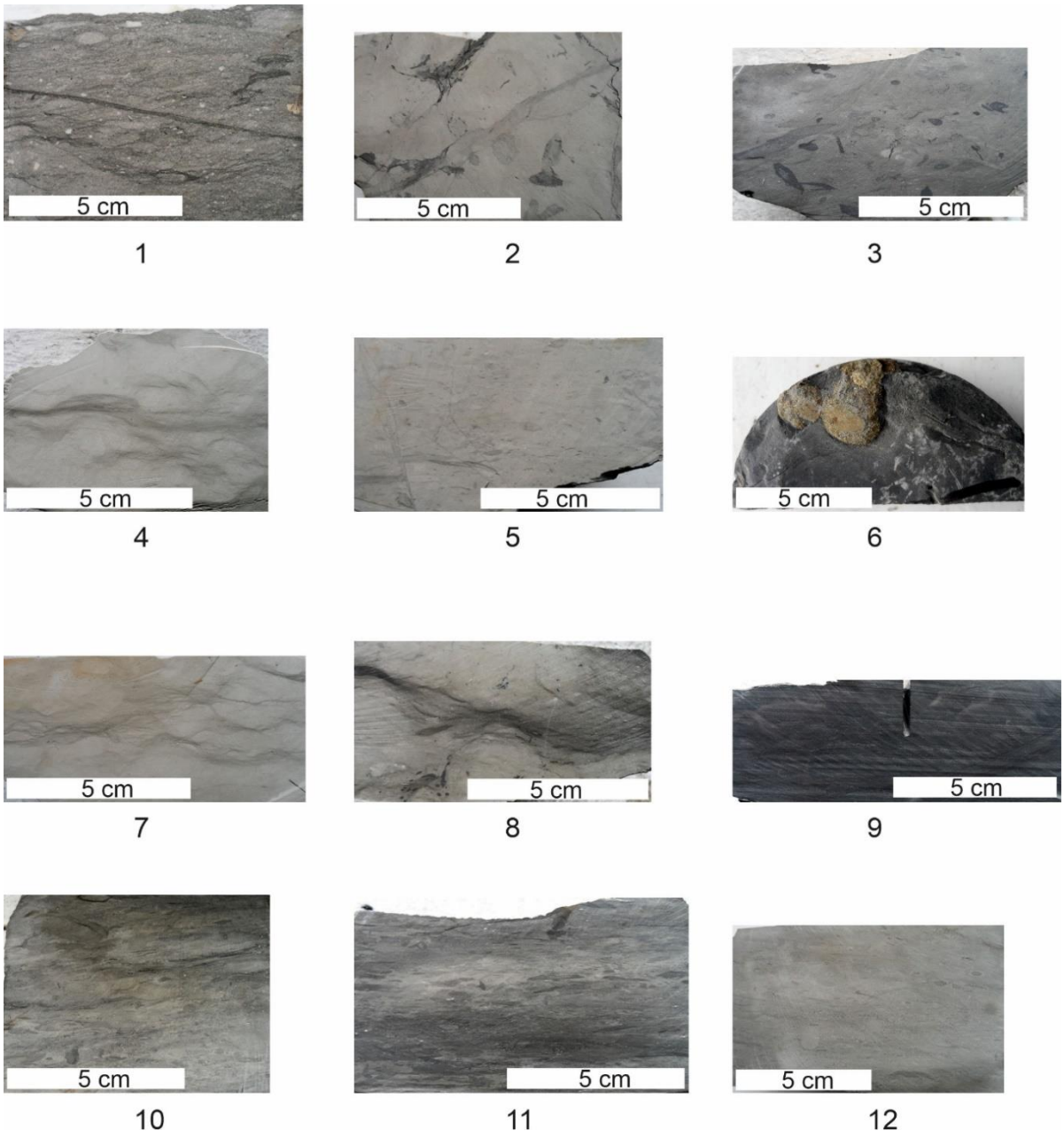


Fig. 4-5 Struktury sedymentacyjne w kredzie górnej i albie górnym

1 – Margiel piaszczysty z nielicznym glaukonitem. Fragmenty skorup inoceramów, detrytyczne ziarna kwarcu oraz konkrecja fosforytowa piaszczysta (lewy górny róg). Spękanie wypełnione materiałem ilasto-marglistym. Nieregularne, faliste i soczewkowe smugowanie materiałem ilastym. Alb górny. Grudziądz IG1, głęb. 1039,8 m; 2 – Wapień bardzo zwięzły. Thalassinoides isp., Ophiomorpha isp. i Planolites isp. Sutura w prawym górnym rogu. Cenoman. Poddębice IG1, głęb. 1893,4 m; 3 – Margiel. Planolites isp. Cenoman. Strzelno IG1, głęb. 1025,4 m; 4 – Wapień marglisty z nieregularną, nieciągłą laminacją falistą i soczewkową. Cenoman. Gostynin IG1/1A, głęb. 659,1 m; 5 – Wapień marglisty. Planolites isp., ?Ophiomorpha isp. i ?Chondrites isp. Widoczne mikrouskoki. Cenoman. Żychlin IG3, głęb. 571,5 m; 6 – Iłowiec marglisty z dużą konkrecją pirytową. Turon. Banachów IG1, głęb. 2049,2 m; 7 – Wapień marglisty, z nieregularną, nieciągłą laminacją falistą i soczewkową. Turon. Żychlin IG3, głęb. 506,7 m; 8 – Wapień marglisty jasnoszary z nieregularną falistą laminą szarego marglu. Planolites isp., ?Chondrites isp. Turon. Koło IG4, głęb. 1554,1 m; 9 – Margiel ciemnoszary (wkładka w wapieniu marglistym). Turon-koniak dolny. Strzelno IG1, głęb. 971,1 m; 10 – Opoka. Planolites isp., Zoophycos isp., Ophiomorpha isp. i inne nieoznaczone. Koniak środkowy-górny. Poddębice PIG2, głęb. 1522,5 m; 11 – Opoka ciemnoszara prawdopodobnie lekko ilasta. Planolites isp., ?Thalassinoides isp. Koniak środkowy-górny. Koło IG3, głęb. 1241,7 m; 12 – Wapień marglisty, plamisty i smugowany materiałem ilasto-marglistym. Planolites isp. i inne nieoznaczone skamieniałości śladowe. Kampan. Banachów IG1, głęb. 893,4 m.

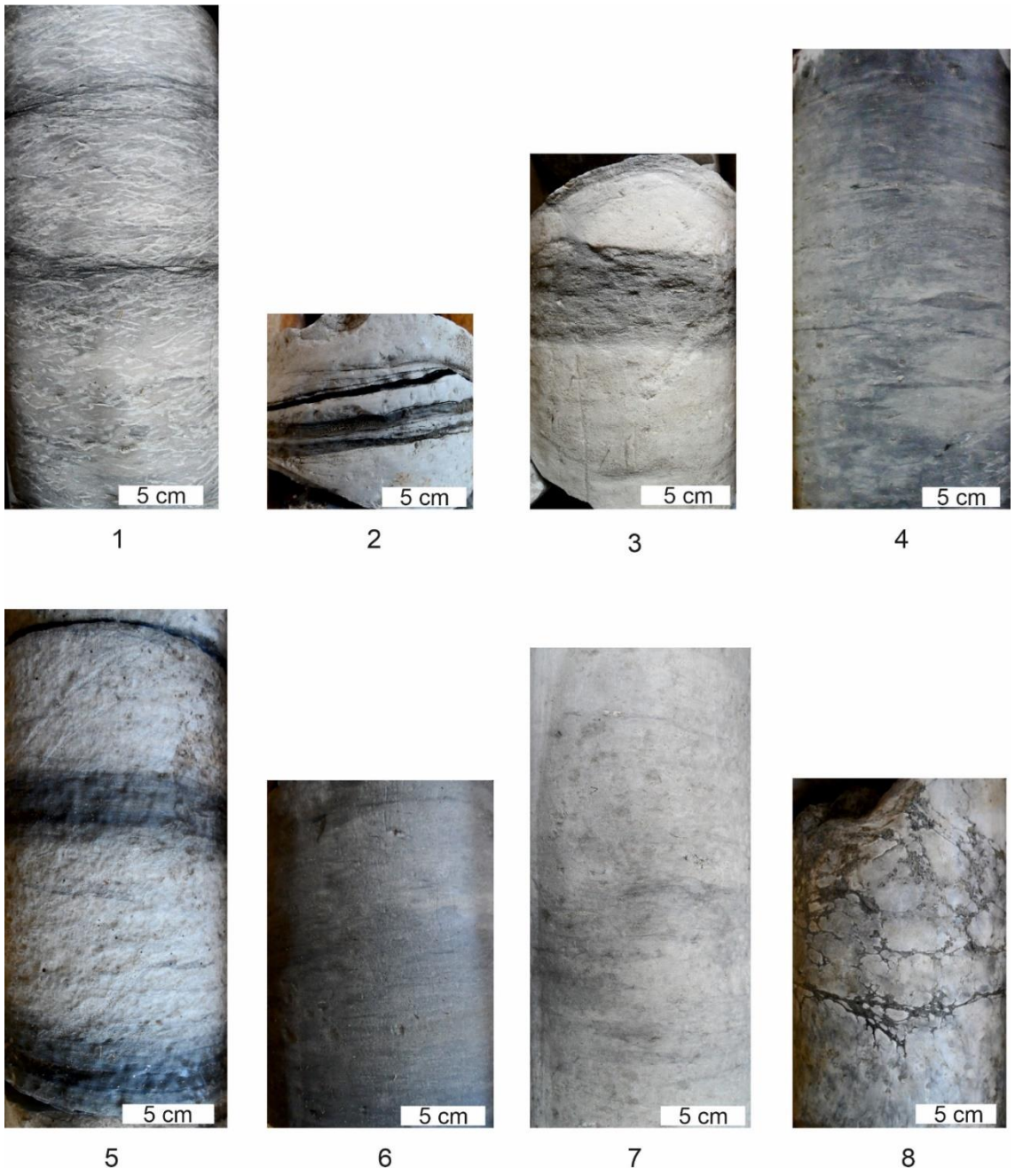


Fig. 4-6 Skały węglanowe i węglanowo-krzemionkowe kredy górnej

1 – wapień marglisty, przechodzący w margiel, szary, twardy, zbity, zwięzły, miejscami skrzemionkowany, przełam równy, gładki. Zawiera 1-3 cm warstewki czarnego iłowca marglistego/marglu ilastego z muskowitem. Turon-koniak dolny. Poddębice PIG2, głęb. 1789-1790 m; 2 – wapień szary, nieco skrzemionkowany, z przewarstwieniami i laminami (do 2 cm) marglu ciemnoszarego, ilastego. Turon-koniak dolny. Koło IG3, głęb. 1436-1437 m; 3 – wapień biały i jasnoszary, zbity, bardzo twardy i zwięzły, zlewny, ciężki, z słabymi ciemniejszymi plamami, miejscami smugowany. Widoczne przewarstwienie szarego wapienia marglistego, zwięzłego, ale miejscami z tendencją do łupliwości. Turon-koniak dolny. Polik IG1, głęb. 1197-1198 m;4 – opoka zwięzła, szara i ciemnoszara, smugowana ciemnoszarym materiałem ilastym. Turon-koniak dolny. Strzelno IG1, skrzynka 9, głęb. 824,8-831,4 m; 5 – opoka, zwięzła, twarda, o przełamie równym, gładkim, lekko, nieregularnie smugowana. Co kilkanaście centymetrów występują ciemnoszare przewarstwienia (o grubości od 1 do kilku cm) ciemnoszarego marglu ilastego, kruchego, z drobnym muskowitem. Turon-koniak dolny. Poddębice PIG2, głęb. 1523-1524 m; 6 – opoka ciemnoszara, marglista, twarda. Santon. Koło IG3, głęb. 1127,5-1128,5 m; 7 – opoka szara marglista smugowana, zwięzła, o przełamie gładkim z przesmużeniami substancji ilastej. Santon. Koło IG3, głęb. 904,5-905,5 m; 8 – wapień marglisty biały, średniej twardości, lekko „bielący", z gruzłami i spękaniami powleczonymi substancją ilastą z rozproszonym pirytem. Kampan. Gostynin IG4, głęb. 394-395 m.

Podstawowe litofacje, ich charakterystyka i struktury sedymentacyjne

Na podstawie badań litologicznych rdzeni wiertniczych, w górnej kredzie centralnej Polski wyróżniono następujące litofacje:

1) **Węglanowe** (wapienie, wapienie margliste) – przeważają wapienie pelityczne, rzadziej organodetrytyczne i organogeniczne, o barwach jasnoszarych, szarych i białych. W otworze Grudziądz IG1 w cenomanie stwierdzono wapień organodetrytyczny piaszczysty; w otworze Gostynin IG1/1A występują wapienie margliste kredopodobne, „bielące". Skały są twarde, zwięzłe i często zbite, niekiedy zlewne, miejscami skrzemionkowane; miejscami występują krzemienie i czerty; często obserwuje się plamistość i smugowanie skał. Występuje nieregularna, nieciągła laminacja falista i soczewkowa oraz w niektórych interwałach przewarstwienia margliste do kilku cm miąższości. Główne skamieniałości to małże (inoceramy) i otwornice; stwierdzono także skamieniałości śladowe *Thalassinoides* isp., *Ophiomorpha* isp., *Planolites* isp. i ?*Chondrites* isp. (Fig. 4-5).

2) **Iłowcowe** (iłowce margliste, wapniste) – są to skały ciemnoszare do prawie czarnych, zwięzłe lub o pokroju płytkowym; często występuje piryt jako konkrecje i rozproszony pelit. Występują bardzo drobne ziarna kwarcu i glaukonitu; notowano szczątki inoceramów i łuski ryb.

3) **Mułowcowe** (mułowce margliste) – występują w otworze Gostynin IG1/1A, są to skały ciemnoszare i szare, miejscami smugowane; stwierdzano w nich łuseczki muskowitu, skupienia pirytu, ziarna kwarcu i glaukonitu.

4) **Margliste** (margle, margle ilaste) – są to skały barwy od szarobiałej i szarej do ciemnoszarej, miejscami plamiste, zwięzłe, czasem twarde, miejscami o pokroju płytkowym, lokalnie mogą być skrzemionkowane. Trawione w 10% HCl rozpadają się całkowicie zostawiając obfite residuum ilaste. Zawierają ziarna kwarcu, niekiedy blaszki miki. Spotyka się także margle piaszczyste o barwach szarozielonych, zawierające glaukonit (np. Gostynin IG1/1A), a w otworze Grudziądz IG1 także konkrecje fosforytowe (alb górny). Występują również magle silnie ilaste o niskiej zawartości $CaCO_3$. Obserwuje się nieregularne, faliste i soczewkowe smugowanie i laminację materiałem ilastym. Najważniejsze skamieniałości to małże (głównie inoceramy), belemnity i otwornice; wśród skamieniałości śladowych stwierdzono *Planolites* isp. (Fig. 4.5).

5) **Węglanowo-krzemionkowe** (opoki, gezy) – reprezentowane są głównie przez opoki, opoki margliste, opoki mulaste i opoki ilaste, szarobiałe, szare do ciemnoszarych, zwięzłe, na ogół twarde i bardzo twarde. Opoki ilaste często wykazują oddzielność płytkową. Skały te trawione w 10% HCl nie rozpadają się zostawiając residuum ilaste lub rozpadają się na grudki; często zawierają ziarna kwarcu (niekiedy liczne – opoki piaszczyste, obserwowane na przykład w kampanie w otworze Poddębice PIG2), niekiedy ziarna glaukonitu, czasem rozproszony pelit pirytowy oraz blaszki miki. Miejscami występują krzemienie i czerty. Opoki są często smugowane i laminowane faliście ciemnoszarym materiałem ilastym lub wykazują plamistość, laminację i warstwowanie poziome. Główne skamieniałości to małże (głównie inoceramy), bakulity i otwornice, niekiedy widoczne są pod mikroskopem próżnie po igłach gąbek (opoki porowate) i fragmenty igieł; znajdowano także łuski ryb. Stwierdzono skamieniałości śladowe *Planolites* isp., *Zoophycos* isp., ?*Thalassinoides* isp., Ophiomorpha isp. i inne nieoznaczone (Fig. 4-5). Gezy występują podrzędnie i na ogół są piaszczyste, porowate; zawierają szczątki małżów, gąbek i łuski ryb.

6) **Piaszczyste (piaskowce)** – w albie górnym są to skały drobnoziarniste do różnoziarnistych, szarozielonkawe, kwarcowo-glaukonitowe, na ogół słabo zwięzłe, i zawierają konkrecje fosforytowe. W santonie (otwór Koło IG4, Poddębice IG1) i kampanie (Poddębice IG1 i Poddębice PIG2) są to skały jasnoszare, drobnoziarniste do różnoziarnistych, zwięzłe, zlewne, miejscami słabo zwięzłe i rozsypliwe, porowate i o dobrej przepuszczalności (w otworze Poddębice PIG2 pomierzona przepuszczalność wyniosła 7500 mD), zawierające nieliczny glaukonit.

W dolnej części profilu kredy górnej przeważają litofacje węglanowe (wapienie pelityczne, organodetrytyczne i organogeniczne) i margliste; wyżej coraz większą rolę ogrywają litofacje węglanowo-krzemionkowe. Piaskowce (poza cienką warstwą w albie górnym) stwierdzono w santonie i kampanie w otworach Koło IG4, Poddębice IG1 i Poddębice PIG2.

Skały kredy górnej wykazują zróżnicowane zailenie w profilu pionowym. Jednakże poza spągiem turonu w niecce mogileńsko-uniejowskiej, gdzie występują niewielkiej miąższości ciemnoszare i czarne iłowce o pokroju płytkowym z przewarstwieniami margli i opok, oraz górną częścią cenomanu w otworze Grudziądz IG1, gdzie stwierdzono serię ciemnoszarych iłowców marglistych, nie spotyka się miąższych przewarstwień iłowców, a laminacja ilasto-marglista jest nieliczna; raczej występuje smugowanie materiałem ilasto-marglistym. Ilość dużych bioklastów jest na ogół niewielka w badanym materiale rdzeniowym. Ich ilość ma znaczenie, gdyż powierzchnie kontaktu bioklastów i otaczającej skały mogą stanowić drogi migracji gazów w skale. Częściej spotyka się bioturbację osadu, jednakże w rdzeniu nie zawsze możliwą do jednoznacznej interpretacji skamieniałości śladowych.

4.2.3.2 Tektonika nieciągła

Badania geologiczne, w tym głównie sejsmika refleksyjna, wskazują, że węglanowa i węglanowo-krzemionkowa sekwencja kredy górnej w Polsce centralnej nie jest intensywnie zuskokowana. Główne uskoki przebiegają w rejonie struktur solnych (Fig. 4-1, Fig. 4-2 – słup Mogilna, słup Inowrocławia, słup Gopła, słup Ponętowa, Wartkowic i Poddębic, słup Kłodawy i jego przedłużenie ku południowi, słup Lutomierska) oraz w strefach związanych z synsedymentacyjnymi rowami tektonicznymi, które w późnej kredzie uległy inwersji: w strefie Gopła (na wschód od otworu Strzelno IG1) oraz w strefie Ponętów-Wartkowice-Poddębice (w rejonie otworów Banachów IG1 – Koło IG4). Wszystkie te struktury tektoniczne zlokalizowane są po południowo-zachodniej stronie antyklinorium śródpolskiego, w nieckach mogileńskiej i uniejowskiej. Uskoki występujące w rejonie tych struktur mają na ogół przebieg NW-SE i NNW-SSE, lokalnie N-S. Po stronie północno-wschodniej, w niecce płockiej, tektonika jest spokojniejsza, a rowy synsedymentacyjne ograniczone uskokami stwierdzono na północ (rów Dębego) i północny zachód (rów Płońska) od Warszawy (Fig. 4-3).

4.2.3.3 Węglanowość, gęstość, porowatość i przepuszczalność skał – dane archiwalne

Zawartość węglanu wapnia w skałach kredy górnej jest zmienna, na ogół dość wysoka i najczęściej zawiera się w przedziale 50-90%, ale występują także skały silnie margliste i zailone z zawartością węglanu wapnia poniżej 40% (Tabela 4-3 i Tabela 4-4). Kompleksy o najwyższych wartościach węglanu wapnia (wapienie pelityczne i organogeniczne/organodetrytyczne) stwierdzono w cenomanie oraz w turonie-koniaku dolnym. W otworach zlokalizowanych w niecce płockiej wartości powyżej 80% notowane są również w kampanie (Tabela 4-4). Maksymalne pomierzone zawartości $CaCO_3$ wynoszą 92,8% dla białych wapieni z interwału koniak dolny-turon (najprawdopodobniej turon) w otworze Gostynin IG1/1A oraz 92,2% dla wapieni cenomanu

w otworze Grudziądz IG1. Zawartości węglanu wapnia nieco powyżej 90% stwierdzono również w cenomanie w otworze Koło IG3. Najniższe wartości notowane są w piaskowcach i iłowcach.

W dokumentacjach wynikowych otworów wiertniczych na ogół dostępne są ograniczone informacje na temat ciężaru, porowatości i przepuszczalności skał węglanowych i węglanowo-krzemionkowych kredy górnej (Tabela 4-5). Skały te, jako mało perspektywiczne dla akumulacji węglowodorów, nie były obiektem szczegółowych oznaczeń tych parametrów. Zebrane dane wskazują, że skały z otworów wiertniczych położonych w niecce brzeżnej (Gostynin IG1/1A, Gostynin IG4 i Polik IG1) wykazują generalnie nieco wyższe wartości porowatości. W otworze Polik IG1 występuje porowata odmiana lekkiej opoki. Wysoką porowatość i przepuszczalność mają też piaskowce santonu w otworze Poddębice PIG2 oraz wapienie kampanu w otworze Poddębice IG1. Wyjątkowo wysoką wartość przepuszczalności pomierzono w niecce łódzkiej w piaskowcu santońskim z otworu Poddębice PIG2 (7500 mD). W tym rejonie w santonie i kampanie występują przewarstwienia porowatych piaskowców (niekiedy słabo zwięzłych i rozsypliwych). Poza tym, wartości są stosunkowo wyrównane, a przepuszczalność w utworach węglanowych i węglanowo-krzemionkowych jest niska i zawiera się przeważnie w przedziale <0,10 – 0,32 mD. Ciężar objętościowy skał zawiera się w przedziale 1,52-2,69 g/cm^3, a najcięższymi skałami są zwięzłe i zbite wapienie pelityczne oraz niektóre odmiany opok.

Tabela 4-3 Zawartość węglanu wapnia w skałach kredy górnej w otworach wiertniczych niecki uniejowskiej - dane z dokumentacji wynikowych otworów i materiałów archiwalnych M. Jaskowiak-Schoeneichowej

Stratygrafia	Poddębice IG1		Poddębice PIG2		Koło IG3		Koło IG4		Strzelno IG1		Banachów IG1	
	Głębokość [m]	$CaCO_3$ %	Głębokość [m]	$CaCO_3$ %	Głębokość [m]	$CaCO_3$ %	Głębokość [m]	$CaCO_3$ %	Głębokość [m]	$CaCO_3$ %	Głębokość [m]	$CaCO_3$ %
Mastrycht					120,2	63,9	40,1	54,3				
					126,5	63,9	45,0	54,6				
							48,0	61,2				
							53,5	59,2				
							135,1	52,0				
							139,1	34,0				
							141,2	32,3				
Kampan	280,0	62,9	405,0	0,0	280,2	61,9	246,2	67,2	149,8	44,7	511,2	46,0
	285,5	67,1	518,3	56,0	283,0	63,4	253,0	54,9	153,5	43,1	511,7	61,0
	383,0	67,6	520,1	45,4	287,0	68,9	363,0	66,6	156,5	57,0	514,0	62,4
	385,0	53,8	617,5	34,8	389,2	62,4	366,0	65,2	257,1	47,8	515,6	64,5
	388,0	67,3	617,8	33,8	392,0	59,4	369,0	65,7	259,5	40,1	891,2	63,0
	548,5	63,1	715,2	27,0	396,0	50,4	463,0	71,9	263,5	35,7	893,6	42,3
	550,0	64,4	716,1	46,3	493,2	66,9	465,8	44,6	358,5	60,3	894,8	63,0
			717,2	38,6	500,0	68,9	467,8	61,8	360,0	54,7	896,9	63,0
					597,0	70,5	571,1	76,5	364,9	66,2		

					600,0	71,0	573,0	69,7	465,5	56,1		
					603,5	71,0	574,4	55,9	471,9	62,0		
Santon	996,1	63,9	858,5	0,0	702,5	71,9	827,7	73,3	572,1	64,5		
	1000,0	58,4	859,5	0,0	709,0	68,9	828,9	49,3	575,1	47,5		
			916,5	41,5	804,2	62,9			577,8	66,8		
			917,5	3,9	811,0	64,9			673,5	61,5		
			974,0	53,1	905,0	64,9			675,5	41,3		
			976,1	53,1	908,5	47,4			773,1	41,8		
			1067,1	59,8	911,0	66,4			779,2	49,0		
			1069,5	70,4	1014,1	66,4						
			1071,1	57,9	1017,5	59,4						
					1021,0	63,4						
					1117,5	62,9						
					1122,0	52,4						
					1123,7	56,9						
					1126,5	56,9						
					1129,0	54,9						
					1134,0	59,9						
					1136,5	58,9						
Koniak grn.-śr.			1205,2	49,2	1239,5	48,9	1193,1	50,2	800,2	41,6		

			1207,2	44,4	1243,5	54,9	1196,0	51,1	806,2	39,3		
			1310,5	43,4	1246,5	49,9			811,0	48,9		
			1311,0	49,2	1332,0	55,9						
			1415,0	50,2	1333,5	52,9						
			1418,0	43,4								
Koniak dln.-turon	1765,0	69,7	1522,0	48,3	1630,5	85,4	1298,1	48,7	813,0	45,8	1882,1	75,0
	1768,0	69,3	1524,0	63,8	1633,0	83,9	1300,0	37,4	817,5	51,3	1882,5	77,2
	1769,5	75,3	1630,2	61,1	1635,4	86,4	1424,0	84,5	822,5	53,3	1883,5	5,0
	1772,0	80,2	1671,5	53,1			1425,7	85,4	828,0	37,8		
			1673,8	42,5			1552,1	85,1	832,0	43,0		
			1674,5	28,0			1557,0	75,0	837,0	46,3		
			1789,5	72,4					840,5	57,5		
			1791,0	39,6					844,4	35,2		
			1792,4	75,3					847,5	44,7		
			1891,4	75,2					851,5	47,5		
			1892,0	56,4					855,6	64,8		
			1892,5	58,3					960,3	51,6		
			1893,7	79,0					862,3	55,5		
									867,0	53,7		
									870,8	51,4		

									874,1	28,7			
									877,3	59,5			
									883,7	45,1			
									938,5	70,7			
									942,2	54,4			
									944,3	57,5			
									968,5	83,0			
									969,8	61,4			
									974,0	75,8			
									991,8	82,3	2046,7	67,7	
									995,0	79,8	2047,6	51,7	
									997,9	77,1	2049,5	47,9	
Cenoman-alb grn.	1892,1	86,5	2002,5	81,1	1745,5	90,9			1021,1	77,6			
	1895,0	86,9	2003,5	68,5	1749,0	90,2			1022,4	63,4			
	1938,2	88,7	2004,8	79,1	1751,0	90,0			1023,5	50,4			
	1941,0	81,8	2106,5	44,2					1025,0	70,3			
	1985,1	62,4	2108,5	36,7					1027,5	68,0			
	1987,0	65,2							1028,2	79,2			
	1992,1	44,8											
	1994,5	47,8											

	1996,0	49,5										
	1997,3	51,2										

Skala barw zawartości $CaCO_3$:

0,1%					50%				100%

Tabela 4-4 Zawartość węglanu wapnia w skałach kredy górnej w otworach wiertniczych niecki brzeżnej (płockiej) - dane z dokumentacji wynikowych otworów i materiałów archiwalnych M. Jaskowiak-Schoeneichowej

Stratygrafia	Gostynin IG1/1A		Gostynin IG4		Żychlin IG3		Grudziądz IG1	
	Głębokość [m]	$CaCO_3$ %	Głębokość [m]	$CaCO_3$ %	Głębokość [m]	$CaCO_3$ %	Głębokość [m]	$CaCO_3$ %
Mastrycht			140,1	50,82			208,2	55,4
			142,3	54,85			211,0	77,5
			144,5	58,30			214,0	74,8
			261,0	65,21				
			265,0	67,13				
Kampan	147,0	80,5	393,5	81,82			367,1	66,2
	192,0	86,5	399,0	69,69			369,0	69,3
	241,0	78,0	550,0	81,66			370,1	77,8
	277,0	86,1	555,5	83,88			372,0	74,6
	312,5	68,9					374,0	75,9
							500,1	64,9
							506,8	57,6
Santon	371,4	72,5	740,0	61,62	296,0	79,8	604,5	25,2
	426,0	56,8					608,8	47,9
							709,2	35,5
							715,8	38,4
Koniak grn.-śr.	480,0	65,5						
Koniak dln.-turon	533,0	72,6	965,0	73,90	397,0	66,1	811,1	30,4
	591,0	92,8	1062,3	88,86	504,0	69,4	814,5	26,4
	621,0	88,5					817,8	33,0
							838,2	38,4
							844,0	37,0
							846,0	39,0
							850,8	37,7
							881,1	41,9
							884,0	33,2
							887,0	48,6
							891,8	36,9
							910,1	44,6
							915,0	43,2
							918,0	32,6
							923,5	38,6
Cenoman-alb grn.	660,0	87,5	1069,0	83,94	540,4	80,4	954,1	24,3
	738,3	84,2			572,0	79,4	957,0	19,7
	738,8	70,9					960,8	19,4
	739,1	57,5					1000,1	26,5
							1005,8	16,4
							1037,1	88,3
							1039,0	92,3
							1039,7	71,6
							1040,1	32,6
							1040,5	41,9
							1041,0	17,8

Skala barw zawartości $CaCO_3$:

0,1%					50%				100%

Tabela 4-5 Parametry petrofizyczne skał kredy górnej w badanych otworach wiertniczych (dane z dokumentacji wynikowych otworów wiertniczych)

Otwór wiertniczy	Ciężar właściwy g/cm3	Ciężar objętościowy g/cm3	Porowatość efektywna %	Porowatość otwarta %	Porowatość całkowita %	Przepuszczalność mD
Banachów IG1	bd	margle 1,89-2,63 śr. 2,23	0,94-27,3 śr. 15,08	bd	bd	0,23-0,32 śr. 0,27
		wapienie 2,62-2,63 śr. 2,63	0,31-0,32 śr. 0,31			poniżej 0,10
Gostynin IG1/1A	bd	1,61-2,28	bd	10-28	bd	bd
Gostynin IG4	bd	1,73-2,38	bd	7-25	bd	bd
Koło IG3	bd	1,74-2,60	bd	2-11	bd	bd
Koło IG4	bd	1,70-2,51	bd	1-12	bd	bd
Poddębice IG1	bd	2,00-2,58	bd	5-39	bd	bd
Poddębice PIG2	2,65-2,74	1,91-2,69	0,41-26,23 (w piaskowcu 917,5 m)	bd	1,10 w wapieniu marglistym i marglu ilastym; 28,46 w piaskowcu (917,5 m)	0,16-7500 (w piaskowcu 917,5 m)
Polik IG1	2,54-2,71	1,52-2,35	12,03-39,81	bd	13,28-40,39 (opoka)	<0,10-0,30
Żychlin IG3	bd	1,76-2,19	bd	10-17	bd	bd

bd – brak danych; śr. - średnia

4.3 Profilowanie strukturalne rdzeni z interwałów kredowych

(Marek Jarosiński, Kinga Bobek)

Celem badań tektonicznych było określenie na ile kruche struktury tektoniczne w obrębie potencjalnie uszczelniających warstw kredy mogą przyczynić się do rozszczelnienia zbiorników w obrębie kompleksu kredowego. W ramach badań tektonicznych wykonaliśmy profilowanie strukturalne rdzeni z 11 otworów wiertniczych. Profilowanie tektoniczne rdzeni wykonano makroskopowo z wykorzystaniem szkła powiększającego i kwasu solnego dla generalnego rozróżnienia typów mineralizacji. Oprócz struktur tektonicznych takich jak spękania, żyły mineralne, lustra tektoniczne i strefy uskokowe, analizowaliśmy również pęknięcia technologiczne niosące informacje o anizotropii współczesnych naprężeń poziomych oraz kruchości skał. Scharakteryzowaliśmy atrybuty struktur istotne z punktu widzenia analizy szczelności badanych kompleksów skalnych, takie jak: głębokość wystąpienia, wysokość, kąt upadu, stopień otwarcia spękań, apertura żył mineralnych, kinematyka luster tektonicznych. Stare karotaże z badanych otworów nie dawały podstaw do zorientowania rdzeni i struktur tektonicznych względem stron świata. Sporadycznie udało się określić względny bieg struktur w odniesieniu do innych struktur lub biegu warstw. Na podstawie sumy obserwacji z analizowanych otworów wiertniczych wskazaliśmy główne czynniki ryzyka rozszczelnienia zbiorników w kredzie przez struktury tektoniczne.

4.3.1 Używane skróty i symbole

W tabeli Excel (plik *Aneks do profilowań strukturalnych.xslx* zamieszczony na DVD w katalogu **/Baza danych/Profilowania rdzeni dla analizowanych otworów**) używaliśmy następujących skrótów i symboli:

Struktury tektoniczne

- Bed – (ang. *bedding*) – powierzchnia warstwowania
- FaZ– (ang. *fault zone*) – strefa uskoku z brekcją tektoniczną lub zlustrowanymi skałami uskokowymi, wraz z przyległą aureolą gęstych luster tektonicznych
- FrO – (ang. *open fracture*) – spękanie tektoniczne rozdzielające rdzeń, lub o obniżonej oporności w obrazie skanera elektrooporowego XRMI
- FrC– (ang. *closed fracture*) – spękanie tektoniczne nie rozdzielające rdzenia, zwykle niewidoczne w obrazie skanera elektrooporowego zmieniające oporność w zależności od typu mineralizacji.
- Vein – (ang. *mineral vein*) – żyła tektoniczna z określoną aperturą i ew. mineralizacją, w obrazie skanera elektrooporowego zmieniające oporność w zależności od typu mineralizacji. W zależności od tego czy jest wtórnie spękana, może być zaliczona do FrO lub FrC
- Sli – (ang. *slickenside*) – lustro tektoniczne z rysami ślizgowymi (ang. striation) lub bez. Cechy lustra wraz z kierunkiem rys w relacji do kierunku zapadania lustra powinny być opisane w komentarzu

- StT – (ang. *tectonic stylolite*) - ze słupkami stylolitowymi (lineacją) w kierunku poziomym lub zbliżonym do powierzchni warstwowania - opisaną w komentarzu
- StG – (ang. *gravitational/compaction stylolite*) – z lineacją pionową lub prostopadłą do powierzchni warstwowania, ze stopniem kompakcji opisanym w komentarzu

Pęknięcia technologiczne

- CoD – (ang. *core disking*) - pęknięcia poprzeczne rdzenia z undulacją przypominającą siodło, z wypukłością ku dołowi
- CoA – (ang. *core ashtray*) - miseczkowate poprzeczne pęknięcia rdzenia (wypukłe ku dołowi) bez undulacji
- CeF – (ang. *centerline fracture*) - pęknięcia podłużne rdzenia przebiegające blisko jego osi, bez śladów mineralizacji, przebarwień ani innych wskaźników spękań tektonicznych
- PeF – (ang. *petal fracture*) – pęknięcia odchodzące od krawędzi rdzenia, propagujące się lekko skośnie, wzdłuż rdzenia, niekiedy lekko ugięte, o stałej orientacji
- Talar – płaskie, poprzeczne pęknięcia rdzenia genezy technologicznej
- Cru – (ang. *crumb*) skała pokruszona bez śladów deformacji tektonicznej

Kinematyka uskoków i ścięć

- NF – (ang. *normal faulting*) – ścięcie uskoku normalnego, w reżimie tensyjnym
- SS – (ang. *strike-slip faulting*) – ścięcie uskoku przesuwczego
- TF – (ang. *thrust/reverse faulting*) – ścięcie uskoku odwróconego lub nasunięcia w reżimie kompresyjnym

4.3.2 Obserwacje tektoniczne w otworach wiertniczych

Dane z profilowania strukturalnego otworów zostały wprowadzone do arkusza Excel, w którym umieszczono również dokumentację fotograficzną struktur. Materiały te znajdują się w załączonym na DVD pliku *Aneks do profilowań strukturalnych.xlsx* (katalog /Baza danych/Profilowania rdzeni dla analizowanych otworów). Na podstawie parametrów zapisanych w bazie wykonane zostały analizy statystyczne intensywności spękania, zgodnie z metodyką zaproponowaną wcześniej przez autorów raportu (Bobek i Jarosiński, 2021).

Analizowane otwory pogrupowaliśmy w 3 obszary: (1) strefa Poddębice-Strzelno[1] - zlokalizowana na SW od strefy wysadów i uskoków Kłodawy; (2) struktura Gostynina położona na NW skrzydle antyklinorium śródpolskiego; (3) strefa krawędziowa kratonu EEC. Aby umożliwić odejmowanie efektów młodszych faz deformacji profilowanie prowadzono od góry profilu ku dołowi. W ten sam sposób będą opisywane rdzenie. Do badań zostały wybrane odcinki otworów (lokalizacja - patrz Fig. 4-1), przedstawione w Tabela 4-6.

[1] Występują tam struktury solankowe w utworach kredy Wartkowice, Strzelno i Trześniew z opracowania Wójcicki i in., 2013.

Tabela 4-6 Podsumowanie badań na rdzeniach z potencjalnie uszczelniających formacji kredy

	Marsze			Wydzielone poziomy mechaniczne						Całość analizowanego otworu	
Otwór/ilość rdzenia/Ilość skrzynek	Marsz	Długość [m]	Intensywność [m2/m3]	Stratygrafia	Litologia	Zasięg	Miąższość [m]	Sumaryczna długość odcinków rdzeniowanych [m]	Średnia intensywność [m^2/m^3]	Sumaryczna długość analizowanego rdzenia	Średnia intensywność dla otworu
Poddębice PIG 2 (Leszcze) – 57,8 m rdzenia (64 skrzynki)	972 - 978	6	0.00	santon	opoka zwięzła	972 - 1072	100	12.0	0.00	55	0.36
	1066 - 1072	6	0.00								
	1205 - 1210	5	0.00	koniak	opoka/margiel	1205 - 1210	5	5.0	0.00		
	1310 - 1312	2	0.00	koniak	opoka zwięzła	1310 - 1419	109	7.0	0.75		
	1414 - 1419	5	1.05								
	1520 - 1526	6	0.52	koniak-turon	opoka	1520 - 1675	155	14.0	0.27		
	1630 - 1634	4	0.00								
	1671 - 1675	4	0.16								
	1789 - 1793	4	2.03	turon	wapień marglisty	1789 - 1895	106	8.0	1.02		
	1891 - 1895	4	0.00								
	2001 - 2006	5	0.55	cenoman	wapień marglisty	2001 - 2006	5	5.0	0.55		
	2106 - 2110	4	0.00	alb	margiel ilasty	2106 - 2110	4	4.0	0.00		
Poddębice IG 1 (Leszcze) – 63,3 m rdzenia (72 skrzynki)	996 - 1001	5	3.00	santon	opoka ilasta	966 - 1003	7	7.0	2.23	54.8	1.28
	1001 - 1003	2	0.31								
	1140 - 1144	4	2.69	koniak	opoka zwięzła, ilasta	1140 - 1315	175	9.0	1.19		
	1310 - 1315	5	0.00								
	1455 - 1459,6	4.6	5.27	koniak-turon	opoka, iłowiec	1455 - 1459,6	4.6	4.6	5.27		
	1615 - 1619,2	4.2	0.00	turon	wapień	1615 - 1790	175	13.2	0.22		
	1765 - 1772	7	0.41								
	1788 - 1790	2	0.00								
	1892 - 1896	4	0.81	cenoman	wapień twardy	1892 - 1941	49	11.0	1.53		
	1896 - 1901	5	2.40								
	1938 - 1941	3	0.54								

	1985 - 1988	3	0.00	cenoman-alb	margiel ilasty	1985 - 1988	3	3.0	0.00		
	2005 - 2012	7	0.00	alb	iłowiec zwięzły	2005 - 2012	7	7.0	0.00		
Koło IG 3 (Leszcze) – 82,9 m rdzenia (147 skrzynek)	280 - 287	7	1.26	kampan	opoka twarda, zwięzła	280 - 396	116	31.0	1.16	112.30	0.69
	372 - 389	17	0.00								
	389 - 396	7	3.87								
	493 - 500	7	0.91	kampan	wapień marglisty	493 - 603,6	110.6	14.0	1.20		
	596,6 - 603,6	7	1.49								
	804 - 811	7	2.19	santon	opoka marglista	804 - 1136,7	332.7	40.3	0.53		
	904,5 - 911,5	7	0.00								
	1014 - 1021	7	0.00								
	1117,4 - 1124,5	7.1	0.83								
	1124,5 - 1126,5	2	0.00								
	1126,5 - 1133,5	7	0.00								
	1133,5 - 1136,7	3.2	0.00								
	1239,5 - 1246,5	7	0.00	koniak	opoka twarda	1239,5 - 1333,6	94.1	8.8	0.00		
	1331,8 - 1333,6	1.8	0.00								
	1436 - 1443	7	0.48	turon	wapień skrzemionkowany	1436 - 1635,6	199.6	12.2	0.28		
	1630,4 - 1635,6	5.2	0.00								
	1745,4 - 1751,4	6	0.00	cenoman	wapień masywny	1745,4 - 1751,4	6	6.0	0.00		
Polik IG 1 (Leszcze) – 12,2 m rdzenia (13 skrzynek)	402 - 408	6	3.60	mastrycht	wapień marglisty	402 - 408	6	6.0	3.60	16	3.21
	1195 - 1200	5	4.18	cenoman	wapień b. twardy	1195 - 1205	10	10.0	2.97		
	1200 - 1205	5	1.75								
Strzelno IG 1 (Leszcze) – 20,0 m rdzenia (rdzeń zredukowany – 20 skrzynek)	824,8 - 831,4	6.6	0.00	turon	opoka b.twarda	824,8 - 944,4	119.6	16.6	0.00	29.2	0.36
	934,4 - 944,4	10	0.00								
	968,4 - 974	5.6	0.00	turon	wapień marglisty	968,4 - 974	5.6	5.6	0.00		
	1021 - 1027	6	0.85	cenoman	iłowiec marglisty	1021 - 1028	7	7.0	1.50		

	1027 - 1028	1	5.46								
Koło IG 4 (Leszcze) – 51,5 m rdzenia (105 skrzynek)	246 - 253	7	0.00	kampan	opoka	246 - 369,5	123.5	13.6	0.11	64.2	0.26
	362,9 - 369,5	6.6	0.23								
	462,9 - 467,9	5	0.46	kampan	wapień marglisty	462,9 - 467,9	5	5.0	0.46		
	571 - 575	4	2.31	kampan	opoka zwięzła	571 - 673	102	12.0	0.77		
	665 - 673	8	0.00								
	673 - 679	6	0.19	santon	opoka ilasta	673 - 679	6	6.0	0.19		
	826,7 - 831,2	4.5	0.00	santon	opoka twarda	826,7 - 1044,6	217.9	15.6	0.15		
	831 - 836,3	5.3	0.44								
	836,3 - 838,5	2.2	0.00								
	1040,8 - 1044,6	3.8	0.00								
	1193 - 1196	3	0.00	koniak	opoka	1193 - 1300	107	5.0	0.00		
	1298 - 1300	2	0.00								
	1423,8 - 1425,8	2	0.00	turon	wapień marglisty	1423,8 - 1425,8	2	2.0	0.00		
	1552 - 1557	5	0.00	turon	margiel	1552 - 1557	5	5.0	0.00		
Banachów IG 1 (Leszcze) – 18,3 m rdzenia (20 skrzynek)	511 - 518	7	0.21	kampan	wapień	511 - 518	7	7.0	0.21	20	0.19
	891 - 898	7	0.21	turon	wapień marglisty	891 - 898	7	7.0	0.21		
	2045 - 2051	6	0.15	turon	iłowiec marglisty	2045 - 2051	6	6.0	0.15		
Gostynin IG 4 (Leszcze) – 29,9 m rdzenia (33 skrzynki)	260 - 266	6	0.00	mastrycht	opoka porowata	260 - 266	6	6.0	0.00	22	0.00
	393 - 399	6	0.00	kampan	wapień marglisty	393 - 399	6	6.0	0.00		
	549 - 559	10	0.00	kampan	opoka marglista	549 - 559	10	10.0	0.00		
Żychlin IG 3 (Leszcze) – 24,2 m rdzenia (32 skrzynki)	396 - 402	6	0.00	turon	wapień marglisty	396 - 402	7	7.0	0.00	18	0.29
	535 - 540	5	0.86	cenoman	wapień marglisty	535 - 577	42	11.0	0.48		
	571 - 577	6	0.10								
Grudziądz IG1 (Leszcze) – 71,5 m rdzenia (108	367 - 374	7	0.00	kampan	opoka zwięzła	367 - 507	140	14.0	0.00	88	0.02
	500 - 507	7	0.00								

skrzynek)	604 - 609	5	0.31	santon	opoka	604 - 716	112	12.0	0.13		
	709 - 716	7	0.00								
	811 - 818	7	0.05	koniak-turon	opoka twarda	811 - 924	113	45.0	0.01		
	838 - 845	7	0.00								
	845 - 851	6	0.00								
	851 - 881	11	0.00								
	910 - 917	7	0.00								
	917 - 924	7	0.00								
	954 - 961	7	0.00	cenoman	iłowiec marglisty	954 - 961	7	7.0	0.00		
	1000 - 1006	6	0.00	cenoman	margiel ilasty	1000 - 1006	6	6.0	0.00		
	1037 - 1041	4	0.00	cenoman-alb	wapień marglisty	1037 - 1041	4	4.0	0.00		
Gostynin IG 1 (Leszcze) – 49,9 m rdzenia (86 skrzynek)	138,9 - 145,6	6.7	0.00	kampan	mułowiec	144 - 148	4	4.0	0.00	72.6	0.02
	145,6 - 151,6	6	0.00	kampan - santon	wapień marglisty	148 - 427	279	37.6	0.00		
	191,6 - 198,6	7	0.00								
	240 - 246	6	0.00								
	276 - 282	6	0.00								
	312 - 317	5	0.00								
	367 - 372	5	0.00								
	422 - 427	5	0.00								
	477 - 482	5	0.00	koniak - turon	wapień marglisty twardy	477 - 625	148	20.0	0.00		
	532 - 537	5	0.00								
	587 - 592	5	0.00								
	620 - 625	5	0.00								
	652 - 658	6	0.00	cenoman	wapień	652 - 658	6	6.0	0.00		
	658 - 663	5	0.25	alb	wapień marglisty	658 - 663	5	5.0	0.25		

Strefa Poddębice-Strzelno

Strzelno IG-1

Otwór położony jest w sąsiedztwie uskoków w północnym skraju strefy Poddębice-Strzelno. Profilowanie tektoniczne wykonano na 29,2 m rdzenia wiertniczego. Warstwy mają upad maksymalnie do 20°.

W 22 m opok i wapieni turonu nie stwierdziliśmy obecności struktur tektonicznych.

W interwale iłowca marglistego cenomanu o długości 7 m występuje siedem luster tektonicznych o upadzie w granicach 30-50°. Dla trzech z nich stwierdzono przemieszczenie nasuwcze zgodne z kierunkiem zapadnia luster (Fig. 4-7 A), a w jednym przypadku nieco skośne do kierunku upadu lustra. Relief na pozostałych lustrach nie pozwolił na określenie kinematyki. Stwierdzono również 2 lustra o upadzie 70° (Fig. 4-7 B), które najprawdopodobniej są świadectwem ekstensji. Intensywność spękania wynosi tu 1,5 m^2/m^3 (Fig. 4-7 C).

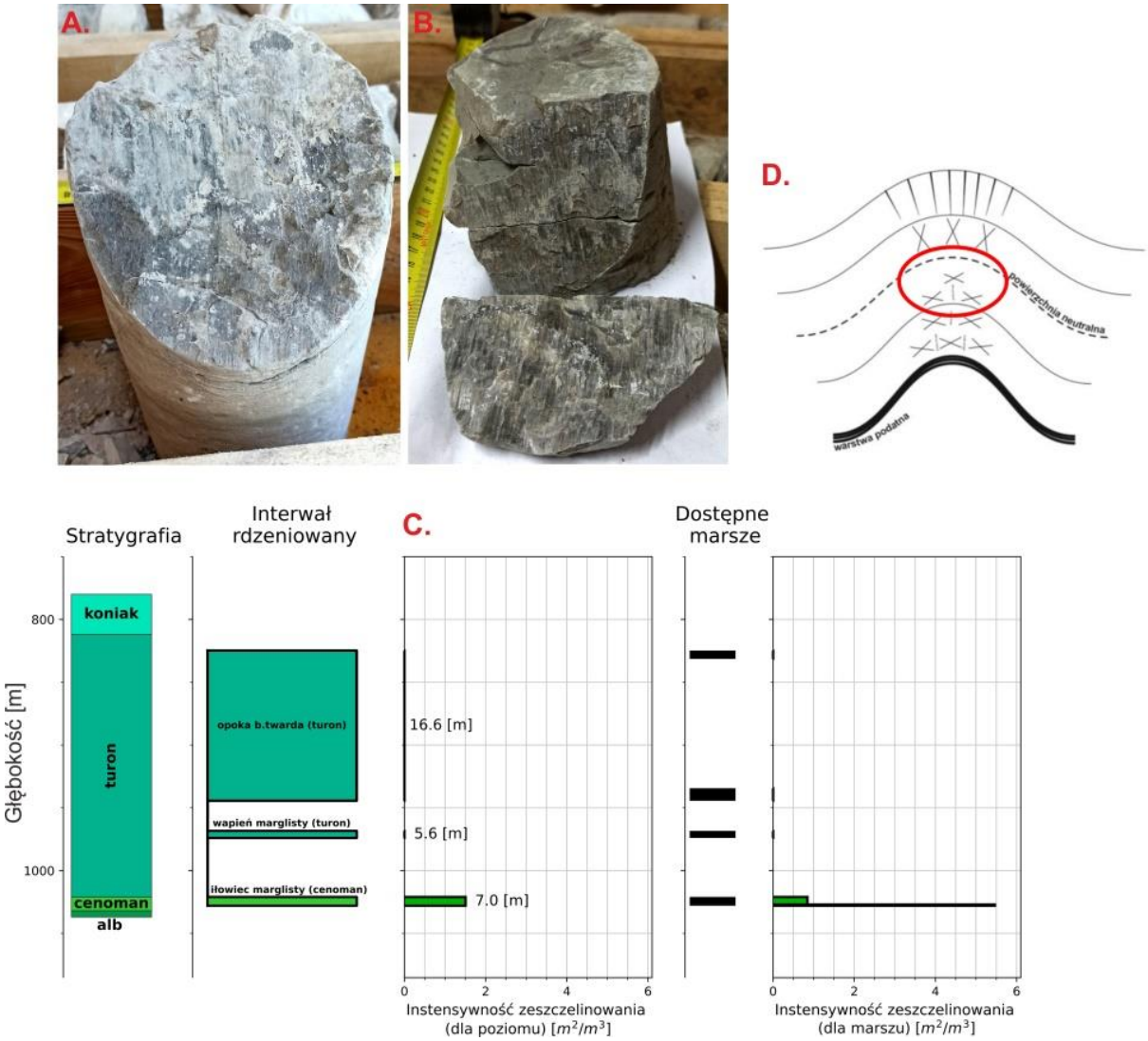


Fig. 4-7 Struktury tektoniczne obserwowane na rdzeniu wiertniczym z otworu Strzelno IG-1 (A i B), ich rozkład statystyczny w profilu otworu (C) oraz interpretacja ich genezy (D)

Generalnie, kumulacja struktur nasuwczych w spągu słabych mechanicznie iłowców marglistych cenomanu wskazuje, że mogły one służyć jako lokalny poziom odkłucia mechanicznego (Fig. 4-7 D). Zapisały się tu również ekstensyjne lustra tektoniczne, związane prawdopodobnie z przedłużeniem rowu Poddębic. Mimo znacznej intensywności spękania iłowców cenomanu, niskokątowe lustra tektoniczne reżimu nasuwczego nie powinny stanowić zagrożenia dla rozszczelnienia niższych kolektorów, zwłaszcza że w wyżej leżących wapieniach i opokach turonu nie stwierdzono struktur tektonicznych.

Banachów IG 1

Otwór zlokalizowany jest w obrębie strefy uskokowej Poddębic, położonej na SW od strefy tektonicznej i wysadu Kłodawy. Profilowanie tektoniczne przeprowadzono na rdzeniu o łącznej długości 20 m. Upad warstw w wapieniach kampanu wynosi 10-15°, a w wapieniach marglistych turonu warstwy zalegają połogo (0-5°).

W 7 m profilu kampanu i nie stwierdzono struktur tektonicznych. Występują tu jedynie poprzeczne pęknięcia technologiczne rdzenia, spośród których 3 niewyraźne pęknięcia siodłowe (CoD) i jedno miseczkowe (CoA) sugerują niewielką wartość współczesnego, poziomego naprężenia dyferencjalnego (S_H-S_h).

W 7 m wapieni marglistych turonu występuje tylko jedno spękanie otwarte o upadzie 45°.

W 7 m interwału iłowców marglistych turonu, nie stwierdzono spękań tektonicznych. Rdzeń ma jednak tendencję do pękania technologicznego, gdyż znajdują się tu 3 niewielkie pęknięcia centralne rdzenia, którym towarzyszą dwa pęknięcia siodłowe – wskazujące zgodnie na występowanie anizotropii S_H-S_h oraz 3 drobne pęknięcia miseczkowe sugerujące małą anizotropię S_H-S_h.

Generalnie, w badanych interwałach występują pojedyncze spękania dające średnią intensywność spękań 0,19 m^2/m^3, które nie stanowią zagrożenia dla rozszczelnienia kompleksu. Obecność licznych pęknięć technologicznych wskazuje, że skały kredowe są tu kruche i podatne na pękanie. Pośród pęknięć technologicznych stwierdziliśmy drobne i średnie pęknięcia centralne rdzenia o znikomej sumarycznej wysokości względem długości analizowanych interwałów rdzenia. Zatem, nie sugerują one podwyższonej podatności na pionowe pękanie hydrauliczne.

Poddębice PIG-2

Otwór zlokalizowany jest pomiędzy strefami uskokowymi Poddębic i Kłodawy. Profilowanie tektoniczne przeprowadzono na rdzeniu wiertniczym o łącznej długości 55 m. W tym otworze warstwy mają upad regionalny w zakresie od 10° do 15° ku SW.

W 17 m opok santonu i w stropie koniaku nie zaobserwowano spękań tektonicznych (Fig. 4-8 D). Występują tu jedynie pęknięcia technologiczne w postaci pęknięć siodłowych, dwóch pęknięć centralnych i pęknięcia płatkowego.

Poniżej w 21 m opok koniaku i stropu turonu, występują 3 spękania strome otwarte o łącznej wysokości 25 cm. Spośród pęknięć technologicznych występują pojedyncze siodłowe i płatkowe. Intensywność szczelinowania jest zmienna w zakresie 0,27-0,75 m^2/m^3 (Fig. 4-8 D).

W 13 m wapieni marglistych turonu i cenomanu występuje 10 otwartych i zamkniętych spękań o upadzie ok. 60° (Fig. 4-8 A, B) lub sporadycznie, wyższym. Niektóre z nich mają powierzchnie nierówne zabarwione na czarno (Fig. 4-8 A). Są to spękania reżimu tektonicznego uskoków normalnych. Wszystkie one przecinają cały rdzeń, co sugeruje ich kontynuację w pionie. Intensywność spękania jest tu zmienna w granicach 0,55-1,02 m^2/m^3 (Fig. 4-8 D). Pośród pęknięć technologicznych występują pojedyncze pęknięcia siodłowe oraz drobne i średnie centralne i płatkowe. Jest też skruszony interwał rdzenia bez śladów zlustrowania, z przewagą pęknięć pologich (Fig. 4-8 C), które nie sugerują uwarunkowań tektonicznych. Na podstawie relacji do orientacji pęknięcia siodłowego, bieg zespołu spękań tektonicznych został oszacowany jako tworzący kąt 45° względem S_H.

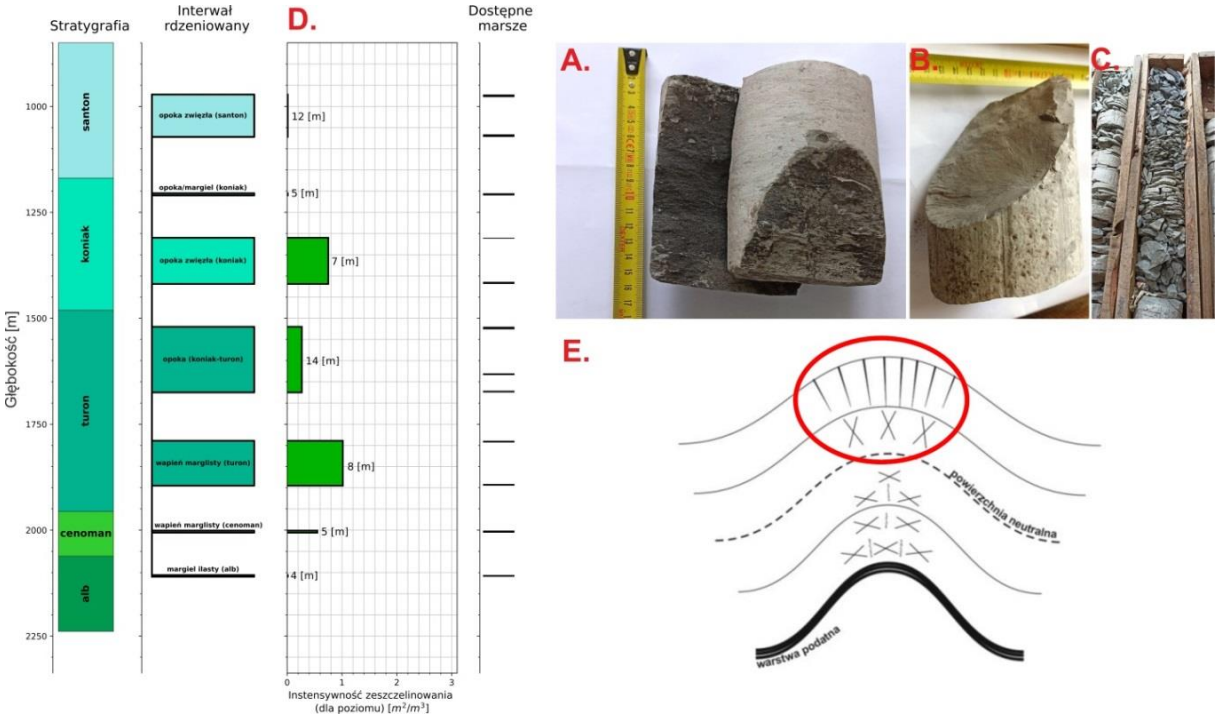


Fig. 4-8 Struktury tektoniczne na rdzeniu wiertniczym z otworu Poddębice PIG-2 (A, B, C), ich rozkład statystyczny w profilu (D) oraz interpretacja genezy struktur (E)

W 4 m marglu albu struktur tektonicznych nie stwierdzono.

Generalnie w sąsiedztwie dużej strefy uskokowej, przy której znajduje się otwór, w obrębie wapieni marglistych turonu występują seryjne spękania tektoniczne reżimu uskoków normalnych. Zaznacza się rozwarstwienie strukturalne na opoki, w których występują spękania strome (ekstensyjne?) i niżej leżące wapienie, w których występują spękania nachylone (ścięciowe?) reżimu uskoków normalnych (Fig. 4-8 E). Prawidłowość w rozwarstwieniu spękań może mieć związek ze wzrostem naprężenia SV w głąb kompleksu oraz spadkiem S_h w skałach bardziej kompetentnych (wapieniach). Kombinacja tych czynników sprzyja powstawaniu ścięć w kompetentnych wapieniach – na większych głębokościach. Spękania strome w płycej położonych opokach są świadectwem niskiej wytrzymałości tensyjnej i niedostatecznej wartości naprężeń ścięciowych. Należy jednak uwzględnić, że pojawienie się spękań ścięciowych na pewnej głębokości w otworze może nie być efektem rozwarstwienia strukturalnego, a jedynie wynikać z intersekcji otworu ze strefą nachylonych spękań. Mała średnia intensywność spękań dla otworu wynosząca 0,36 m^2/m^3 oraz ograniczenie otwartych spękań

stromych do konkretnego interwału głębokościowego nie sugerują możliwości rozszczelnienia seryjnymi spękaniami całego interwału górnej kredy.

Nieliczne i małe pęknięcia technologiczne rdzenia nie sugerują dużej skłonności do intensywnego współczesnego pękania hydraulicznego.

Poddębice IG-1

Otwór znajduje się w obrębie synkliny pomiędzy strukturami Poddębic i Kłodawy. Profilowanie tektoniczne wykonano na 55 m profilu rdzenia wiertniczego. Warstwy w koniaku i santonie mają tu upad w granicach 25-30°, a w cenomanie - przy nasunięciach - do 45°.

W 7 m opok santonu występuje 9 stromych spękań zamkniętych stanowiących żyłki (Fig. 4-9 B) o aperturze < 1 mm (większość ~0,1 mm). Mimo, że są one krótkie, to intensywność spękania osiąga tu 2,23 m^2/m^3 (Fig. 4-9 A).

Ku dołowi, w 13,6 m opok koniaku i stropu turonu występują spękania o upadzie 70° i bardziej strome, z których większość jest otwarta (Fig. 4-9 C). Niektóre mają czarne, nierówne powierzchnie. Intensywność tych spękań wynosi 2,6 m^2/m^3.

W 24 m profilu bardziej kompetentnych wapieni cenomanu i turonu przeważają spękania i lustra tektoniczne niskokątowe i zlustrowane powierzchnie warstw. Występują 4 lustra tektoniczne o upadach od 20 do 50° - systematycznie bardziej strome w górnej części profilu. Lustra zapadają w kierunku zapadania warstw. Wszystkie mają charakter nasuwczy, a ich powierzchnie są czarne (Fig. 4-9 D) lub pokryte mineralizacją kalcytową (Fig. 4-9 E) wskazującą na nasunięcie. Na niektórych rysy są zgodne z zapadaniem luster, a na innych skośne pod kątem 30° prawoskrętnie od kierunku upadu lustra (Fig. 4-9 E). Występują tu również spękania towarzyszące niskokątowym nasunięciom. Nasunięcia przecinają strome strefy spękań reżimu uskoków normalnych. Zaobserwowano tylko jedno spękanie pionowe. W twardym wapieniu cenomanu przeważają spękania otwarte, lustra tektoniczne i zlustrowane powierzchnie warstw o upadzie zbliżonym do 45°. Dwa otwarte spękania o upadach 60-70° mają nierówne, czarne powierzchnie. Występuje również małe spękanie pionowe wypełnione iłem. Dla tego interwału średnia intensywność spękań wynosi 0,8 m^2/m^3.

W marglach i iłowcach spągu cenomanu i albu nie stwierdziliśmy struktur tektonicznych, a występują tylko pęknięcia centralne rdzenia, o łącznej wysokości 40 cm, oraz rdzeń pokruszony bez zlustrowań.

Generalnie, zauważyć można rozwarstwienie strukturalne pomiędzy jednostkami litostratygraficznymi. W opokach santonu występują spękania strome, przechodzące ku dołowi – w opokach koniaku i stropu turonu – w spękania strome i nachylone. W bardziej kompetentnych wapieniach cenomanu i turonu przeważają nasunięcia, spękania niskokątowe i zlustrowane powierzchnie warstw, wskazujące na poziomą kompresję w reżimie nasunięć z SH w kierunku zapadania warstw lub odchylonym o 30° prawoskrętnie. W najniżej położonych marglach nie stwierdziliśmy struktur tektonicznych. Takie rozwarstwienie, w połączeniu ze wzrastającym ku dołowi upadem warstw sugeruje, że mamy do czynienia z ugięciem antyklinalnym (Fig. 4-9 F), z powierzchnią neutralną pomiędzy opokami i wapieniami turonu. Ponad tą powierzchnią występują struktury reżimu ekstensyjnego uskoków normalnych, zaś poniżej - w bardziej kompetentnych wapieniach – panował reżim tektoniczny nasunięć. W domenie ekstensyjnej zaznacza się – podobnie jak w otworze Poddębice PIG-2 - strefowość od spękań ekstensyjnych (wyżej) do ścięciowych (niżej).

Analiza intensywności spękań wskazuje, że gęściej spękane są opoki ponad powierzchnią neutralną, w których strome spękania mogą stanowić drogi pionowej migracji płynów. Niskokątowe spękania poniżej powierzchni neutralnej mają mniejszą intensywność i kinematykę nie sprzyjającą pionowej migracji płynów.

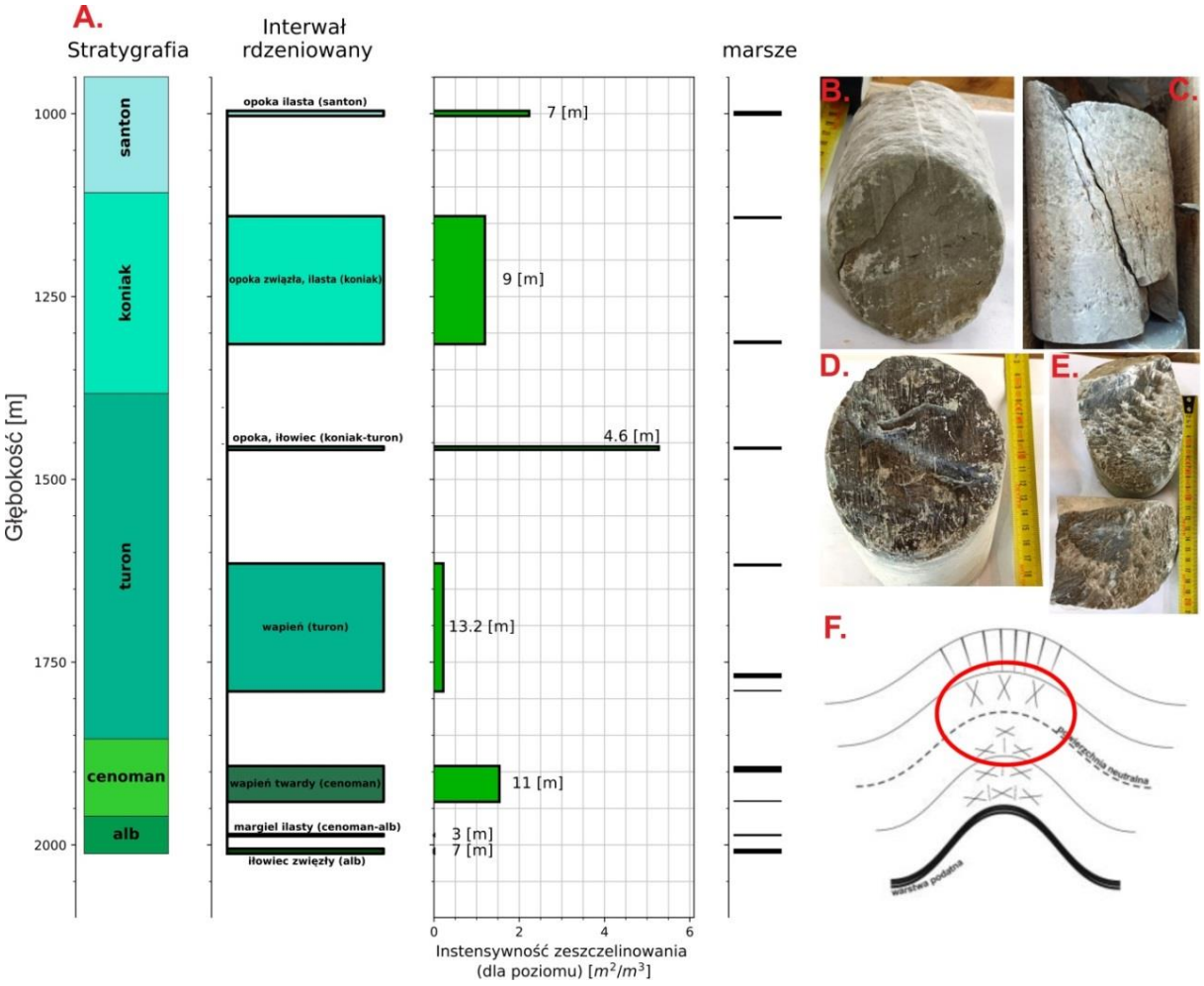


Fig. 4-9 Struktury tektoniczne na rdzeniu wiertniczym z otworu Poddębice IG-1 (B – E), ich rozkład statystyczny w profilu (A) oraz interpretacja genezy struktur (F)

Koło IG-3

Otwór zlokalizowany jest przy strefie uskokowej przebiegającej na zachód od antykliny Poddębic. Profilowanie tektoniczne przeprowadziliśmy na 112 m rdzenia. Upad warstw wynosi do 12°.

W 31 m twardych i zwięzłych opok kampanu występuje 9 otwartych spękań stromych oraz 5 o upadach w granicach 40-70°, w tym jedna żyła. Biegi spękań pochyłych różnią się o 30°. Intensywność spękania wynosi tu 1,16 m^2/m^3 (Fig. 4-10 A).

W 34 m wapienia marglistego kampanu i stropowej części opoki marglistej santonu występuje 15 otwartych spękań stromych i 1 lustro tektoniczne reżimu TF o upadzie 40° (Fig. 4-10 B). Intensywność spękań wynosi tu ok. 1,2 m^2/m^3 (Fig. 4-10 A). Stwierdziliśmy też 2 średnio wykształcone pęknięcia siodłowe rdzenia wskazujące na anizotropię naprężeń poziomych (Fig. 4-10 C).

Poniżej 1000 m głębokości, w twardym marglu, opoce marglistej santonu oraz w twardej opoce koniaku, wapieniach turonu i cenomanu występują jedynie 4 spękania strome. Średnia intensywność spękania spada tu poniżej 0,3 m^2/m^3. Liczne są natomiast pęknięcia technologiczne w postaci ok. 50 siodłowych pęknięć rdzenia (Fig. 4-10 C) o średnim wykształceniu oraz pęknięcia centralnego. W tym interwale występują również dwie długie strefy z talarkami.

W otworze tym zaznacza się wyraźne rozwarstwienie strukturalne. W górnej części profilu, w stropie opok marglistych santonu i w wapieniach kampanu o łącznej długości rdzenia 65 m występuje dużo stromych otwartych spękań ekstensyjnych (Fig. 4-10 D). Poniżej głębokości 1 km - spękania takie występują sporadycznie. Wskazuje to, że struktury ekstensyjne wygasają ku dołowi, co może być efektem gięcia antyklinalnego. W dolnym interwale wyjątkowo liczne występują pęknięcia poprzeczne rdzenia, co sugeruje podwyższone wartości współczesnych naprężeń poziomych (a obniżone – pionowe?). Może to być efektem współczesnej kontrakcji poziomej w obrębie antykliny.

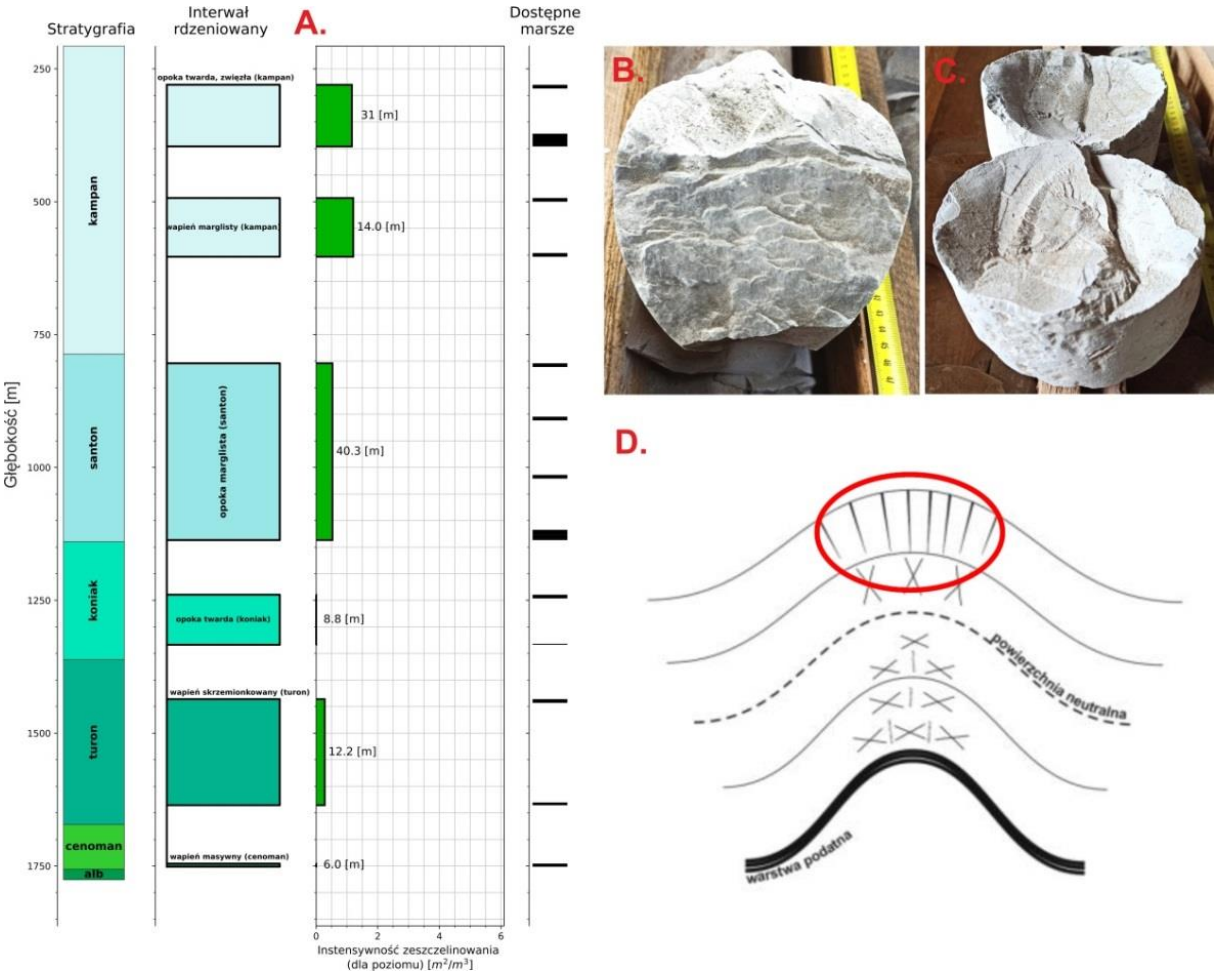


Fig. 4-10 Struktury tektoniczne na rdzeniu wiertniczym z otworu Koło IG-3 (B, C), ich rozkład statystyczny w profilu (A) oraz interpretacja genezy struktur (D)

Koło IG-4

Otwór zlokalizowany jest na SW skłonie antykliny Poddębic. Profilowanie tektoniczne przeprowadzono na 64 m rdzenia. Warstwy mają tu upad regionalny < 10° ku SW.

W 18,6 m opok i wapienia ze smugami marglistymi kampanu występuje jedno spękanie otwarte o upadzie 45°. Są tu też 2 strefy z gęstymi pęknięciami poprzecznymi rdzenia (talarki), strefa z pęknięciami skręconymi oraz 2 centralne pęknięcia rdzenia.

Poniżej, w 14 m opok kampanu i santonu stwierdziliśmy 8 otwartych spękań stromych o sumarycznej wysokości 2 m. Obserwowane są biegi spękań pod kątem 45° względem siebie. Występują też 2 strefy z talarkami (Fig. 4-11 C) i jedna z pęknięciami poskręcanymi, jak również pęknięcia spodeczkowe oraz siodłowe z charakterystycznymi grzbietami (Fig. 4-11 B). W 30,6 m wapieni i opok kampanu intensywność spękania wzrasta ku dołowi przy niedużej wartości średniej wynoszącej 0,4 m^2/m^3 (Fig. 4-11 A).

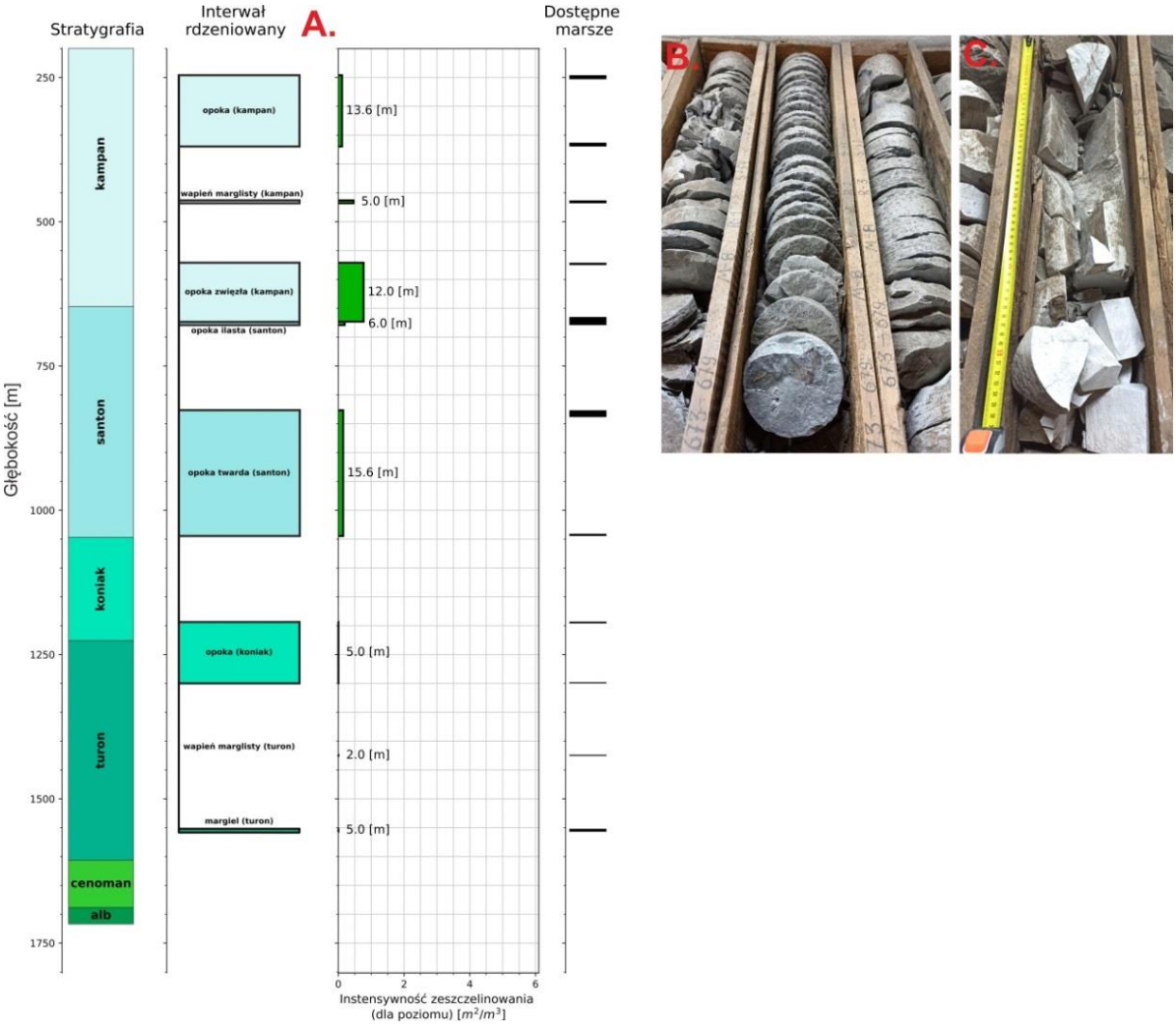


Fig. 4-11 Struktury tektoniczne na rdzeniu wiertniczym z otworu Koło IG-4 (B, C) i ich rozkład statystyczny w profilu otworu (A)

Poniżej, w 28 m skał santonu, koniaku i turonu spękania są sporadyczne, a ich intensywność spada do ok. 0,1 m2/m3. W dolnej połowie rdzenia, poniżej santonu, struktury tektoniczne nie występują.

Ze względu na małą liczbę struktur tektonicznych trudno wskazać w tym profilu rozwarstwienie strukturalne, choć nie jest ono wykluczone. Podobnie jak w otworze Koło IG-3 zaznacza się zanik spękania w dolnej połowie rdzenia (poniżej santonu). W całym otworze występują strefy

z poprzecznymi i centralnymi pęknięciami rdzenia wskazujące na podwyższone naprężenia poziome. Takich pęknięć jest również wiele w otworze Koło IG-3.

Struktura Gostynina

Gostynin IG-4

Otwór zlokalizowany jest ponad poduszką solną Gostynina, w obrębie niecki brzeżnej – na krawędzi EEC. Z otworu tego sprofilowano w sumie tylko 22 m rdzenia.

W opokach i wapieniach marglistych mastrychtu i kampanu nie odnotowaliśmy struktur tektonicznych. Stwierdziliśmy występowanie jednego stromego pęknięcia technologicznego (centralne?) o przełamie muszlowym, świadczącym o propagowaniu się spękania w kierunku pionowym.

Nic nie sugeruje możliwości rozszczelnienia kompleksu górnej kredy w tej lokalizacji.

Gostynin IG-1

Otwór zlokalizowany jest ponad poduszką solną Gostynina w obrębie niecki brzeżnej - na krawędzi EEC. W otworze tym sprofilowaliśmy 72,6 m rdzenia.

W 40 m wapieni marglistych santonu stwierdziliśmy występowanie tylko jednego lustra tektonicznego o upadzie 70°, wskazującego na ekstensję w reżimie uskoków normalnych.

W płytkim interwale 145-372 m występuje 5 odcinków z talarkami. Świadczą one prawdopodobnie o małej anizotropii naprężeń poziomych oraz o relatywnie małej wartości naprężenia pionowego S_V.

Prawie zupełny brak struktur tektonicznych w długim interwale głębokościowym oraz technologiczne pękanie poprzeczne rdzenia nie sugerują zagrożenia dla uszczelnienia kompleksów pod kredą górną.

Żychlin IG-3

Otwór zlokalizowany jest ponad poduszką solną Gostynina. Sprofilowaliśmy 18 m rdzenia.

W 11 m wapieni marglistych cenomanu występują cztery niewielkie lustra tektoniczne o upadzie w zakresie 50-70°. W jednym przypadku stwierdzono, że biegi luster tworzą kąt 60° względem siebie, co wskazuje na dwa kierunki ekstensji. Stwierdziliśmy również występowanie trzech otwartych spękań stromych o łącznej wysokości 25 cm. Średnia intensywność spękania w tym otworze wynosi 0,29 m^2/m^3.

Generalnie, występujące tu struktury ekstensyjne sugerują możliwość rozszczelnienia kompleksu cenomanu.

Krawędź kratonu EEC

Polik IG-1

Otwór ten jest zlokalizowany w obrębie antyklin naduskokowych ponad krawędzią kratonu EEC. W otworze tym sprofilowaliśmy 2 odcinki rdzenia o długości 6 i 10 m.

W obrębie wapieni marglistych mastrychtu występują 3 spękania otwarte i 1 zamknięte o upadach 70-90° i łącznej wysokości 2,2 m. Niektóre spękania są skręcone w pionie, a w ich sąsiedztwie skała jest dodatkowo spękana nieco skośnie, co sugeruje deformacje transtensyjne.

W obrębie twardych wapieni cenomanu występuje 6 stromych i 11 zapadających pod kątem 55-70° spękań otwartych. Większość spękań wychodzi poza rdzeń, co świadczy o ich większym zasięgu pionowym. Lustro tektoniczne o upadzie 65° wskazuje na zrzut normalny lub nieco skośny do kierunku upadu lustra.

Generalnie, w badanych dwóch odcinkach rdzenia intensywność spękania jest wyjątkowo wysoka. W 6 m wapieni marglistych mastrychtu wynosi ona 3,6 m^2/m^3, a w 10 m twardych wapieni cenomanu – 3 m^2/m^3. Spękania mogły powstać na skutek gięcia kompleksu w strefie antyklin nadprzesuwczych. ***Znaczny stopień spękania skał cenomanu i mastrychtu sugeruje brak własności uszczelniających.***

Grudziądz IG-1

Otwór zlokalizowany jest w głębi kratonu EEC. Profilowanie strukturalne przeprowadzono na 88 m rdzenia.

W opoce santonu stwierdziliśmy 1 spękanie strome otwarte i 3 pęknięcia centralne rdzenia.

W opoce mulastej i zwięzłej jest tylko jedno drobne spękanie otwarte o upadzie 50° oraz 6 pęknięć centralnych rdzenia o genezie technologicznej.

W górnej części otworu do głębokości 851 m występują 4 interwały, w których rdzeń pęka muszlowo. Poniżej tej głębokości występują 4 interwały, w których rdzeń pęka poprzecznie w talarki. Mimo, że spękań tektonicznych jest w tym otworze mało, to liczne pęknięcia technologiczne świadczą o skłonności opoki do pękania hydraulicznego, również w kierunku pionowym.

4.3.3 Podsumowanie

Na podstawie fragmentarycznych odcinków rdzenia, którymi dysponowaliśmy, geneza obserwowanych struktur tektonicznych nie jest możliwa do odtworzenia. Można natomiast stwierdzić jaki scenariusz genetyczny nie jest sprzeczny z obserwacjami. Kompleks kredowy był zaangażowany w dwa epizody deformacji tektonicznych. W późnej kredzie podlegał procesom związanym z kompresyjną inwersją basenu polskiego. Proces inwersji był poprzedzony uruchomieniem uskoków przesuwczych w reżimie transtensyjnym i transpresyjnym, co sprzyjało powstawaniu uskoków i antyklin naduskokowych wzdłuż głównych stref tektonicznych. Interpretacja profili sejsmicznych wskazuje, że inwersja rozpoczęła się najpóźniej w kampanie (Stachowska i Krzywiec, 2021). Efektem inwersji jest wielkoskalowe przefałdowanie litosfery w postaci wału śródpolskiego i okalających go niecek. Poduszki solne o biegu NW-SE zostały w tym okresie podpiętrzone na skutek mniejszej skali fałdowania kompresyjnego kompleksu mezozoicznego, skompensowanego w solach cechsztynu. Podczas inwersji również sól z wysadów solnych została wypchnięta ku górze, co spowodowało ugięcie antyklinalne kompleksu kredowego ponad wysadami.

Spośród 11 analizowanych otworów tylko w 4 długość profilu rdzeniowanego i ilość obserwowanych struktur były wystarczające dla wykonania analiz statystycznych intensywności szczelinowania poszczególnych jednostek litostratygraficznych. Mimo, że otwory penetrują kompleks kredy ponad

wysadami i poduszkami solnymi oraz w sąsiedztwie uskoków w podłożu kredy, widocznych w profilach sejsmicznych, w analizowanych interwałach rdzeni nie obserwowaliśmy stref uskokowych. Zatem opisywane struktury traktujemy jako seryjne, niekoniecznie stowarzyszone z większymi strefami uskokowymi.

Strefa Poddębice-Strzelno

Występuje tu antyklina Poddębic w obrębie kredy, która rozwinęła się ponad wysadem solnym przebijającym się przez trias i prawdopodobnie dolną jurę. Na profilu sejsmicznym widać, że zachodnie skrzydło antykliny, na którym zlokalizowane są otwory Koło IG - 3 i Koło IG - 4, ma upad < 10° ku SW i nie jest zaburzone uskokami. Obszar pomiędzy antykliną Poddębic a strukturą solną Kłodawy, w którym zlokalizowany jest otwór Poddębice IG-1, jest zaburzony uskokami. Otwór Poddębice PIG-2 znajduje się na W od antykliny Poddębic - na SW skłonie antyklinorium wału śródpolskiego, gdzie warstwy mają upad > 10° ku SW.

Mimo rozwarstwienia strukturalnego obserwowanego w poszczególnych otworach, w obrębie całej strefy nie dostrzegliśmy regularnego rozwarstwienia seryjnych struktur tektonicznych pomiędzy jednostki litostratygraficzne. W najbardziej na N wysuniętych otworach – Strzelno IG-1 i Banachów IG-1 struktury ekstensyjne są nieliczne, a w pierwszym z tych otworów, w marglistych iłowcach cenomanu, występują jedynie nasunięcia. Struktury te nie sugerują tektonicznego rozszczelnienia kompleksu K2, choć pęknięcia technologiczne rdzenia wskazują na jego kruchość. W pozostałych otworach, zlokalizowanych w sąsiedztwie antykliny Poddębic, zaznacza się tendencja do występowania struktur ekstensyjnych – w górnych interwałach otworów oraz braku tych struktur lub obecności struktur kompresyjnych – w dolnych interwałach. Taka sekwencja jest charakterystyczna dla ugięć antyklinalnych, w których powyżej powierzchni neutralnych dochodzi do ekstensji, a poniżej – do kompresji. Spąg domen ekstensyjnych, w zależności od otworu, przebiega w turonie lub, częściej – w koniaku. W obrębie domeny ekstensyjnej zaznacza się tendencja do występowania, płycej – stromych spękań ekstensyjnych, a głębiej – spękań i luster o charakterze ścięć grawitacyjnych. To zjawisko można wyjaśnić wzrostem S_v wraz ze wzrostem głębokości. Poniżej domen ekstensyjnych, spękania i lustra niskokątowe, charakterystyczne dla reżimu nasunięć występują bądź w obrębie kompetentnych wapieni cenomanu i turonu, efektywnie przenoszących kompresję, lub jak we wspomnianym wcześniej Strzelnie IG-1, w podatnych iłowcach marglistych cenomanu, w których wyodrębnić można poziom odkłucia mechanicznego. Obserwacje te wskazują, że górne interwały K2 – najczęściej do koniaku – są rozszczelnione seryjnymi spękaniami stromymi. Niższe kompleksy nie noszą śladów takiego rozszczelnienia. Takie rozwarstwienie struktur seryjnych przemawia za ich genezą jednoczesną z reaktywacją dużych struktur uskokowych i deformacji z nimi związanych.

Wyniki analiz strukturalnych w otworze Pabianice-1 wykazały (rozdział **7.4**), że poniżej w kompleksie jurajskim zdecydowanie przeważają struktury kompresyjne reżimu TF z niskokątowymi nasunięciami i stylolitami z lineacją poziomą. Analizy geomechaniczne w tym otworze wykazały, że strefa uskokowa przedłużająca się w wysad Kłodawy, jest współcześnie reaktywowana przesuwczo. Jeżeli równoległa do niej strefa Poddębic jest również reaktywowana przesuwczo, to wówczas strome spękania górnej kredy o odpowiedniej orientacji względem uskoków głównych podłoża mogą być rozwierane transtensyjnie. Wniosek ten może być ważny, gdy będziemy dysponować bardziej kompletnymi profilami strukturalnymi ze strefy Poddębic.

Struktura Gostynina

Struktura Gostynina w obrębie kredy jest bardzo łagodną antykliną, która rozwinęła się ponad poduszką solną. Poduszka ta formowała się przed kredą na krawędzi EEC, dlatego jej SW skłon był jednocześnie skłonem basenu czynnym co najmniej do K2. W K2 poduszka solna została nieco spiętrzona od NE strony. Otwory Gostynin IG-4 oraz IG-1/A są położone na NE skłonie tej struktury, która na poziomie kredy nie ma widocznych w sejsmice uskoków. Poniżej, w triasie i jurze, najprawdopodobniej, uskoki występują.

W obrębie struktury Gostynina, tylko w jednym otworze (Żychlin IG-3), o krótkim profilu rdzeni (18 m) stwierdziliśmy grawitacyjne lustra tektoniczne mogące rozszczelnić profil cenomanu. W pozostałych otworach nie występują seryjne struktury tektoniczne mogące rozszczelnić kompleks K2. Talarki w utworach kampanu sugerują możliwość współczesnego zaciskania tektonicznego górnej części profilu kredy. W obrębie tej struktury nie obserwujemy sekwencji struktur charakterystycznych dla gięcia antyklinalnego – takich jak w strefie tektonicznej Pabianic. Deficyt struktur tektonicznych przemawia za minimalnymi deformacjami tektonicznymi w K2.

Kraton EEC

Strefa uskokowa (rów Bodzanowa) ponad kratonem EEC, w której znajduje się otwór Polik IG-1 rozwinęła się ponad poduszką solną wynoszoną głównie przed kredą i tylko łagodnie podpiętrzoną w K2. Wyraźnie widoczne w sejsmice uskoki normalne były głównie aktywne w jurze. Dla większości z nich nie widać śladów aktywności w kredzie.

W otworze Polik IG-1, mimo zaledwie 16 m analizowanego rdzenia, stwierdziliśmy występowanie licznych struktur ekstensyjnych w interwałach cenomanu i mastrychtu. Obserwacja ta przemawia za rozszczelnieniem strukturalnym sekwencji K2 powyżej albu.

Otwór Grudziądz znajduje się na przedłużeniu tej strefy ku NW, gdzie nie występują już poduszki solne, niemniej strefa krawędziowa EEC jest porozcinana uskokami, reaktywowanymi w jurze. W otworze tym, mimo znacznie dłuższego analizowanego interwału rdzeniowego (88 m), nie stwierdziliśmy występowania seryjnych struktur tektonicznych. Występują natomiast pęknięcia technologiczne rdzenia: talarki (cenoman – turon) i różnokierunkowe pęknięcia o przełamie muszlowym (santon i kampan). Wskazują one na kruchość skały i sugerują relaksację współczesnych naprężeń poziomych w górę profilu.

4.4 Profilowania podatności magnetycznej skał (ręcznym podatnościomierzem) oraz promieniowania gamma (spektrometrem polowym) na rdzeniach

(Kinga Bobek, Joanna Roszkowska-Remin)

W ramach prac nad uszczelnieniem górnokredowym wykonano profilowania podatności magnetycznej i profilowania spektrometrem polowym na wybranych odcinkach rdzeni. Prace skupiły się na przetestowaniu korelacji ręcznych pomiarów geofizycznych (podatności magnetycznej i spektrometrii gamma) na rdzeniach wiertniczych w celu porównania z profilowaniem gamma z geofizyki otworowej. Porównanie wartości uzyskanych z profilowań gamma z badań polowych i geofizyki wiertniczej jest stosowane powszechnie m.in. w przemyśle naftowym w celu dopasowania głębokościowego rdzeni wiertniczych do głębokości geofizycznych. Ma to szczególne znaczenie w przypadku analiz wyników laboratoryjnych wykonywanych na rdzeniu i zastosowania ich do kalibracji krzywych geofizycznych.

Drugim celem profilowań była próba identyfikacji zailonych przewarstwień, które mogłyby mieć dodatkowe właściwości uszczelniające w monotonnych litologicznie skałach osadowych kredy górnej.

Zaproponowane badania podatności magnetycznej miały na celu weryfikację czy podatność magnetyczna mogłaby być również w tym celu wykorzystana. Za tymi badaniami przemawia fakt, że są one wykonywane niskim kosztem i bardzo szybko.

4.4.1 Metodyka badań

Wybór otworów i interwałów stratygraficznych

Otwory do profilowań zostały wybrane z grupy 11 otworów z centralnego obszaru Niżu Polskiego w wybranych strukturach solankowych, które były przedmiotem szczegółowych analiz laboratoryjnych i profilowań rdzeni (rozdziały **4.2** i **4.3**). Docelowo miały być sprofilowane, zarówno podatnościomierzem magnetycznym jak i spektrometrem gamma, odcinki kredy górnej będącej przedmiotem analiz pod kątem uszczelnień struktur. Jednakże w toku prac rozszerzono zakres badań o wybrane interwały z kredy dolnej, m.in pod kątem ewentualnej oceny jakości parametrów zbiornikowych, a także dla weryfikacji głębokości rdzeni wiertniczych.

Zestawienie otworów, stratygrafii i wykonanych profilowań podatności magnetycznej i promieniowania gamma przedstawia Tabela 4-7.

Tabela 4-7 Zestawienie wykonanych profilowań na rdzeniach z analizowanych otworów

Otwór	Interwały głębokościowe na rdzeniu	Piętro stratygraficzne	Oddział stratygraficzny	Podatność na rdzeniu	Gamma na rdzeniu
Banachów IG-1	511 - 518	kampan	kreda górna	+	+
	891-898	kampan		+	+
	2045-2051	turon		+	+
	2311-2319	apt	kreda dolna		+
	2351-2358	barrem/hoteryw górny			+
Gostynin IG-1/1A	138.9-151.6	kampan górny - kampan dolny	kreda górna	+	+
	240-246	kampan górny - kampan dolny		+	+
	276-282	kampan górny - kampan dolny		+	
	312-317	kampan dolny - santon górny		+	
	367-372	santon górny		+	+
	422-427	santon dolny		+	
	477-482	koniak		+	
	532-537	turon		+	
	587-592	turon		+	
	620-625	turon		+	
	650-663	turon - cenoman		+	
	738-757.5	alb górny	kreda dolna	+	+
	791-837.7	alb środkowy - barrem			+
	927.5-946.7	hoteryw dolny - walanżyn górny		+	+

	960-980.6	walanżyn dolny		+	+
Gostynin IG-4	260-265	mastrycht dolny	kreda górna	+	
	393-399	kampan		+	
	549.3-556	kampan		+	
	737.5-739.5	santon górny		+	
	902.2-907.7	turon		+	
	1063.0-1068	cenoman - alb górny	kreda górna/dolna	+	
	1228.9-1276.10	alb środkowy - barrem	kreda dolna		+
	1422.40-1435.0	walanżyn dolny			+
Grudziądz IG-1	367-374	kampan	kreda górna	+	
	500-506.5	kampan		+	
	604-609	santon		+	
	709-716	santon		+	
	811-818	turon		+	
	838-892	turon		+	
	910-924	turon - cenoman		+	
	954-961	cenoman		+	+
	1000-1005.7	cenoman		+	
	1037-1041	cenoman - alb górny	kreda górna/dolna	+	+
	1115-1121	hoteryw górny - hoteryw dolny	kreda dolna		+
Koło IG-3	280-285	kampan	kreda górna	+	
	390-392	kampan		+	

	1880-1894	alb środkowy - barrem	kreda dolna	+	+
	1951.7-1972.7	walanżyn dolny		+	+
	1987.4-1994.4	walanżyn dolny - berias		+	+
Poddębice IG-1	996-1003.4	santon	kreda górna	+	
	1140-1144	koniak		+	
	1310-1315	koniak		+	
	1455-1459.6	turon		+	
	1615-1619.5	turon		+	
	1765-1722	turon		+	
	1788-1790	turon		+	
	1892-1900	cenoman		+	
	1938-1941	cenoman		+	
	1985-1997	alb górny	kreda dolna	+	
	2005-2012	barrem		+	
Poddębice PIG-2	972-978	santon	kreda górna	+	
	1066-1072	santon		+	
	1205-1210	koniak		+	
	1310-1312	koniak		+	
	1414-1419	koniak		+	
	1520-1526	turon		+	
	1630-1634	turon		+	
	1671-1675	turon		+	+

	1789-1793	turon		+	+
	1891-1895	turon		+	+
	2001-2006	cenoman		+	+
	2106-2110	alb górny	kreda dolna	+	+
	2264-2275	apt		+	+
	2295-2304	walanżyn dolny		+	+
Polik IG-1	402-408	mastrycht górny	kreda górna	+	
	1195-1205	cenoman		+	
	1351-1357	hoteryw górny	kreda dolna		+
Strzelno IG-1	824.8-880.9	turon	kreda górna	+	
	934.4-944.4	turon		+	
	968.4-974	turon		+	
	1021-1028	cenoman		+	
	1358-1376.90	berias	kreda dolna	+	
Koło GT-1	2680-2688.65	alb środkowy - alb dolny	kreda dolna	+	+
	2738-2739.45	apt - barrem		+	+
	2740-2743.33	barrem		+	+
	2744-2749.84	barrem - hoteryw górny		+	+

Profilowania podatności magnetycznej

Podatność magnetyczna została zmierzona w wybranych interwałach z kredy górnej oraz kredy dolnej w archiwalnych otworach: Banachów IG-1, Gostynin IG-1/1A, Gostynin IG-4, Grudziądz IG-1, Koło IG-3, Poddębice IG-1, Poddębice PIG-2, Polik IG-1, Strzelno IG-1, a także w nowym otworze geotermalnym: Koło GT-1.

Wszystkie otwory zostały przebadane przenośnym podatnościomierzem MS3 firmy Bartington Instruments. Dodatkowo otwór Strzelno IG-1 został sprofilowany testowo również podatnościomierzem SM30 GF Instruments.

Badania podatnościomierzem MS3 wykonuje się bardzo szybko, co pozwala na wykonanie dużej ilości pomiarów i sprofilowanie długich odcinków rdzenia. Jednakże sprzęt ten charakteryzuje się wysoką czułością, ale i bardzo ograniczonym zasięgiem wgłębnym pomiarów, przez co wyniki mogą być zaburzone przez niedokładne przyłożenie części pomiarowej, czy zanieczyszczenia na rdzeniu. Warto podkreślić, że czujnik pomiarowy w tym sprzęcie to walec o średnicy ok. 1 cala. Prawdopodobny zasięg w głąb skały to kilkanaście milimetrów. Jest to szczególnie istotne w przypadku skał słabych magnetycznie, gdzie za zmienność w wartościach podatności magnetycznej będą odpowiadać minerały paramagnetyczne (np. minerały ilaste). Przyjęto zatem dużą gęstość pomiarów (średnio co ok. 10 cm w skrzynce) w celu wychwycenia generalnych trendów, a nie tylko poszczególnych, niedających się zinterpretować wahań w wartościach podatności magnetycznej.

Profilowania polowym spektrometrem gamma

Jak to podaje Tabela 4-7, profilowanie polowym spektrometrem gamma zostało wykonane w interwałach kredy górnej w archiwalnych otworach: Banachów IG-1 i Gostynin IG-1/1A, Poddębice PIG-2 i Grudziądz IG-1. W kredzie dolnej wykonano pomiary spektrometryczne w archiwalnych otworach: Banachów IG-1, Gostynin IG-1/1A, Gostynin IG-4, Grudziądz IG-1, Koło IG-3, Poddębice PIG-2, Polik IG-1, a także w nowym otworze geotermalnym: Koło GT-1.

Otwór geotermalny Koło GT-1 pełni istotną funkcję reperowego otworu ze względu na nowe profilowania geofizyki otworowej i niezniszczone fragmenty rdzenia.

Profilowania wykonywano polowym spektrometrem promieniowania gamma RS-230 BGO Super-SPEC firmy Radiation Solutions Inc.

Właściwy dobór parametrów pomiarowych ma kluczowe znaczenie dla jakości pozyskiwanych danych, dlatego w pierwszej kolejności przeprowadzono szereg badań testowych mających na celu wypracowanie właściwej metodyki pomiarowej. Ze względu na czasochłonność tych badań istotnym było określenie minimalnych czasów i ilości pomiarów na skrzynkę, tak aby wyniki były wiarygodne i możliwe do porównania.

Pierwotnie założono, że czas pojedynczego pomiaru powinien wynosić 1 minutę, jednakże przeprowadzone testy pokazały, że jest to zbyt krótki czas i odczyty są zbyt chaotyczne. Ustalono, że pojedynczy pomiar powinien wynosić 3 minuty, a na jedną skrzynkę z pełnym rdzeniem powinny być wykonane min. 4 pomiary.

Przetestowano również, czy pomiary powinny być wykonywane na powierzchni rdzeni, czy w przekroju poprzecznym. Zdecydowano, że odczyty z powierzchni rdzenia będą bardziej odpowiadały pomiarom wykonywanym sondą geofizyczną. Dostępne rdzenie wiertnicze, w większości przypadków, były nieprzecięte, jednakże ich duża średnica pozwalała na wiarygodne analizy nawet pomimo lekkiej krzywizny powierzchni pomiaru.

Najistotniejszym aspektem wiarygodności badań okazała się być lokalizacja skrzynek w trakcie profilowania. W toku analiz okazało się bowiem, że sprzęt jest bardzo czuły na wpływy tła

pomiarowego, a szczególnie bliskość ściany profilatorni istotnie wpływa na wartości toru (Th), uranu (U) i potasu (K) oraz parametru Total gamma. Dlatego przyjęto rygorystyczne warunki, w których każda skrzynka była przenoszona i ustawiana pod okno, zawsze w ten sam sposób, z daleka od ściany. To znacząco spowolniło prace, ale dawało pewność, że zmiany odczytów spektrometru wynikają ze specyfiki profilowanych skał, a nie otoczenia. Jest to istotna, często bagatelizowana kwestia metodyczna.

4.4.2 Wyniki profilowań

Profilowania podatności magnetycznej

W wyniku profilowań podatnościomierzem magnetycznym otrzymano odcinkowe krzywe zmienności podatności w dostępnych interwałach. Profile te wykonano na rdzeniach wiertniczych kredy górnej w otworach: Banachów IG-1, Gostynin IG-1/1A, Gostynin IG-4, Grudziądz IG-1, Koło IG-3, Poddębice IG-1, Poddębice PIG-2, Polik IG-1, Strzelno IG-1. Po sprofilowaniu tych rdzeni (co wykonano w archiwum rdzeni w Leszczach) i analizie wyników już w Warszawie, została podjęta decyzja o zarzuceniu dalszych badań w tym interwale stratygraficznym.

Kreda górna wykształcona jest w postaci monotonnych interwałów głównie skał węglanowo-krzemionkowych, które charakteryzują się bardzo niskimi parametrami magnetycznymi. Otrzymane profile podatności magnetycznej charakteryzują się dużym rozproszeniem wartości, co zostało wyinterpretowane jako szum pomiarowy związany ze stanem zachowania i zanieczyszczeniem rdzeni, a nie ma związku z realnymi zmianami litologicznymi w ich obrębie. Poniżej przedstawiono przykładowy, charakterystyczny również dla pozostałych otworów zapis punktowy wyników otrzymanych w interwale kredy górnej w otworze Grudziądz IG-1 (Fig. 4-12).

Dodatkowo nie znaleziono reperowego odcinka krzywych geofizycznych z poziomu kredy górnej o charakterystycznej zmienności, którą można by również wychwycić pomiarami na rdzeniu. Związane jest to zarówno z obserwowaną dużą monotonnością krzywej gamma w całym tym interwale, ale również z faktem, że z interwałów o widocznych odchyleniach nie został pobrany rdzeń wiertniczy.

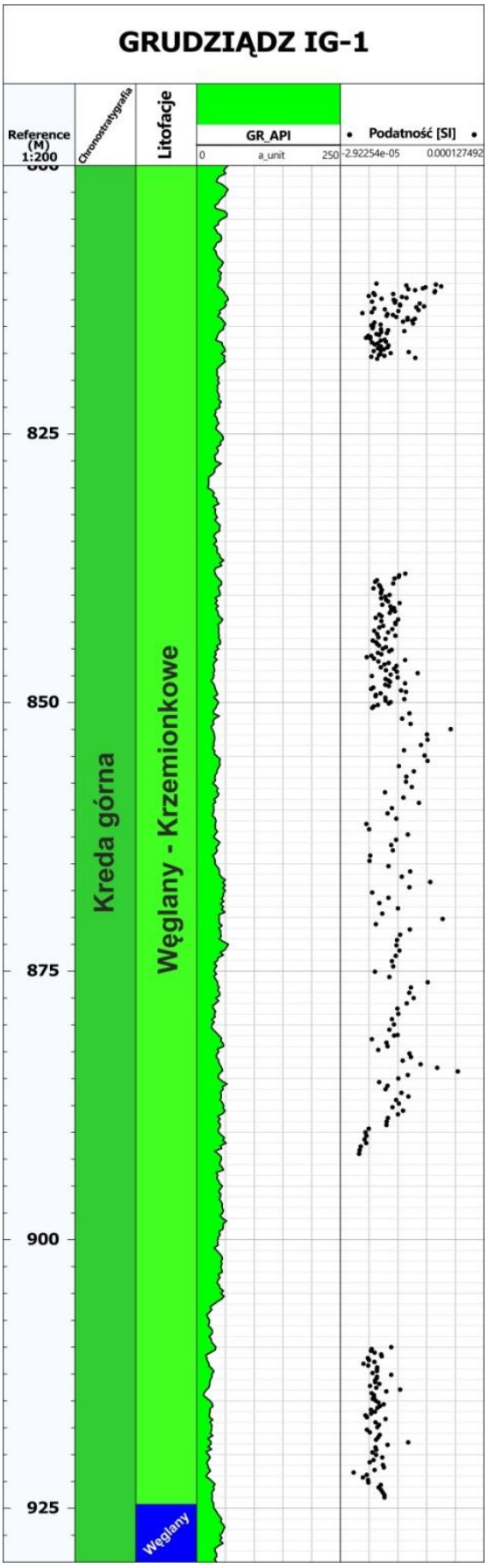


Fig. 4-12 Przykład zapisu wyników profilowań podatnościomierzem dla formacji węglanowo – krzemionkowych górnej kredy w otworze Grudziądz IG-1

Dlatego też zdecydowano o przetestowaniu pomiarów podatności magnetycznej w kredzie dolnej, charakteryzującej się innym wykształceniem litologicznym, m.in. przejściami od mułowców, margli i węglanów do piaskowców. Tego typu zmiany powinny być zauważalne w trendach podatności magnetycznej i z założenia pozwolić na wykonanie kalibracji głębokości rdzeni do widocznych zmian na krzywej gamma z geofizyki otworowej. Jednak zaskakująco, nawet wyniki otrzymane z odcinków z kredy dolnej nie odzwierciedlają zmian litologicznych na tyle, by móc je prawidłowo powiązać z krzywą gamma. Podatność magnetyczna w profilowanych odcinkach charakteryzuje się dużym, chaotycznym rozrzutem wartości, którego nie da się powiązać nawet z zauważalnymi zmianami litologicznymi (Fig. 4-13 i Fig. 4-14).

Badane skały charakteryzują się bardzo słabymi parametrami magnetycznymi. To, w zestawie z czułym sprzętem, ale o bardzo małej powierzchni pomiarowej, powoduje, że wynik jest wypadkową subtelnych zmian mineralnych, zanieczyszczeń rdzenia i innych niezidentyfikowanych czynników zewnętrznych związanych z tłem pomiarowym, a nie z właściwościami samej skały.

Dodatkowo należy pamiętać o fakcie, że podatność magnetyczna jest miarą właściwości magnetycznych minerałów. Korelacja z krzywą promieniowania gamma opiera się na założeniu, że w skałach osadowych o słabych własnościach magnetycznych zmiany podatności magnetycznej mogą odpowiadać za zmiany zawartości paramagnetycznych minerałów ilastych, jednakże, zwłaszcza w skałach piaskowcowych, nie można wykluczyć obecności innych minerałów magnetycznych, które dadzą sygnał na krzywych podatności magnetycznej, ale pozostaną niewidoczne na krzywych profilowania gamma.

Analiza profilowania podatnościomierzem SM30 GF Instruments, który charakteryzuje się mniejszą czułością i większą powierzchnią pomiarową (czujnik ma średnicę ok. 5 cm) pokazała, że wyniki są nieco mniej chaotyczne, jednakże w dalszym ciągu nie nadają się do analizy porównawczej i dopasowań głębokościowych. Dodatkowo, pomiary sprzętem SM30 są znacznie dłuższe niż MS3, a wyniki nie przewyższają jakością wyników badań polowym spektrometrem gamma.

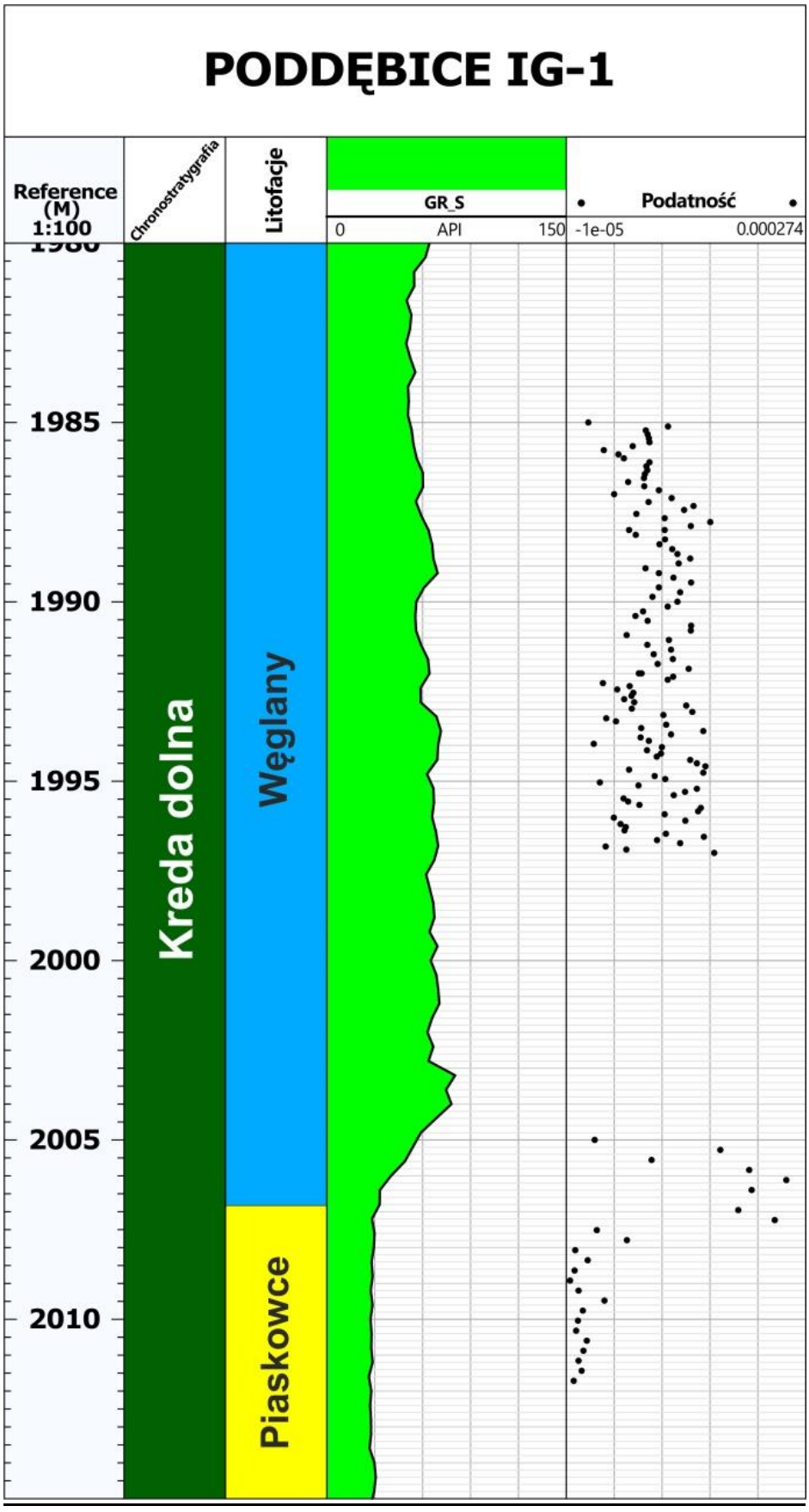


Fig. 4-13 Przykład zapisu wyników profilowań podatnościomierzem dla formacji węglanowych i piaskowcowych kredy dolnej w otworze Poddębice IG-1

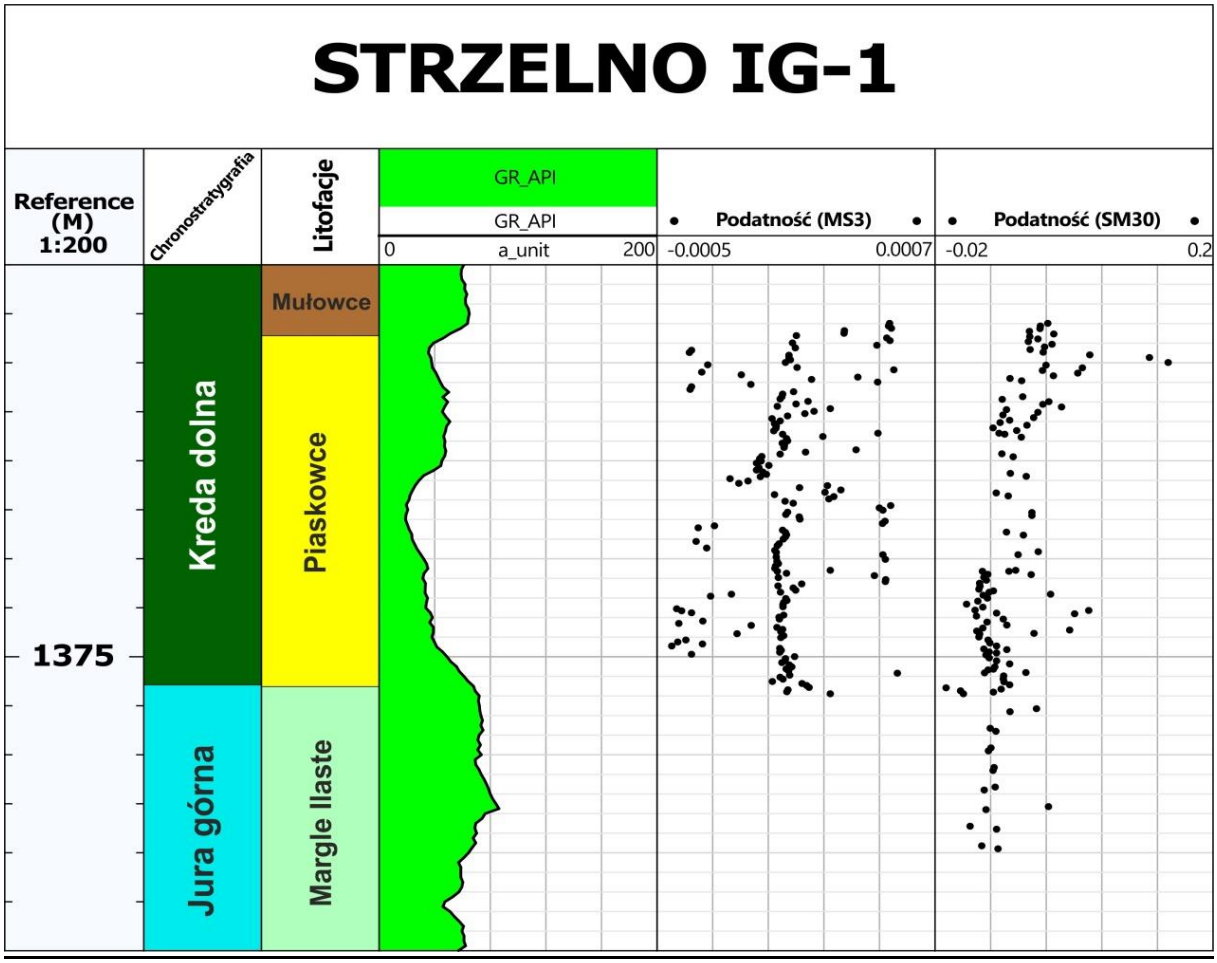


Fig. 4-14 Porównanie zapisu wartości podatności magnetycznej otrzymanej w wyniku pomiaru urządzeniem MS3 oraz SM30 w otworze Strzelno IG-1

Profilowania gamma

Analogicznie do profilowań podatności magnetycznej, w pierwszej kolejności wykonano pomiary spektrometrem gamma w otworach Banachów IG-1, Gostynin IG-1/1A, Poddębice PIG-2 i Grudziądz IG-1 w kredzie górnej, jednak bez zadawalających rezultatów (Fig. 4-15)

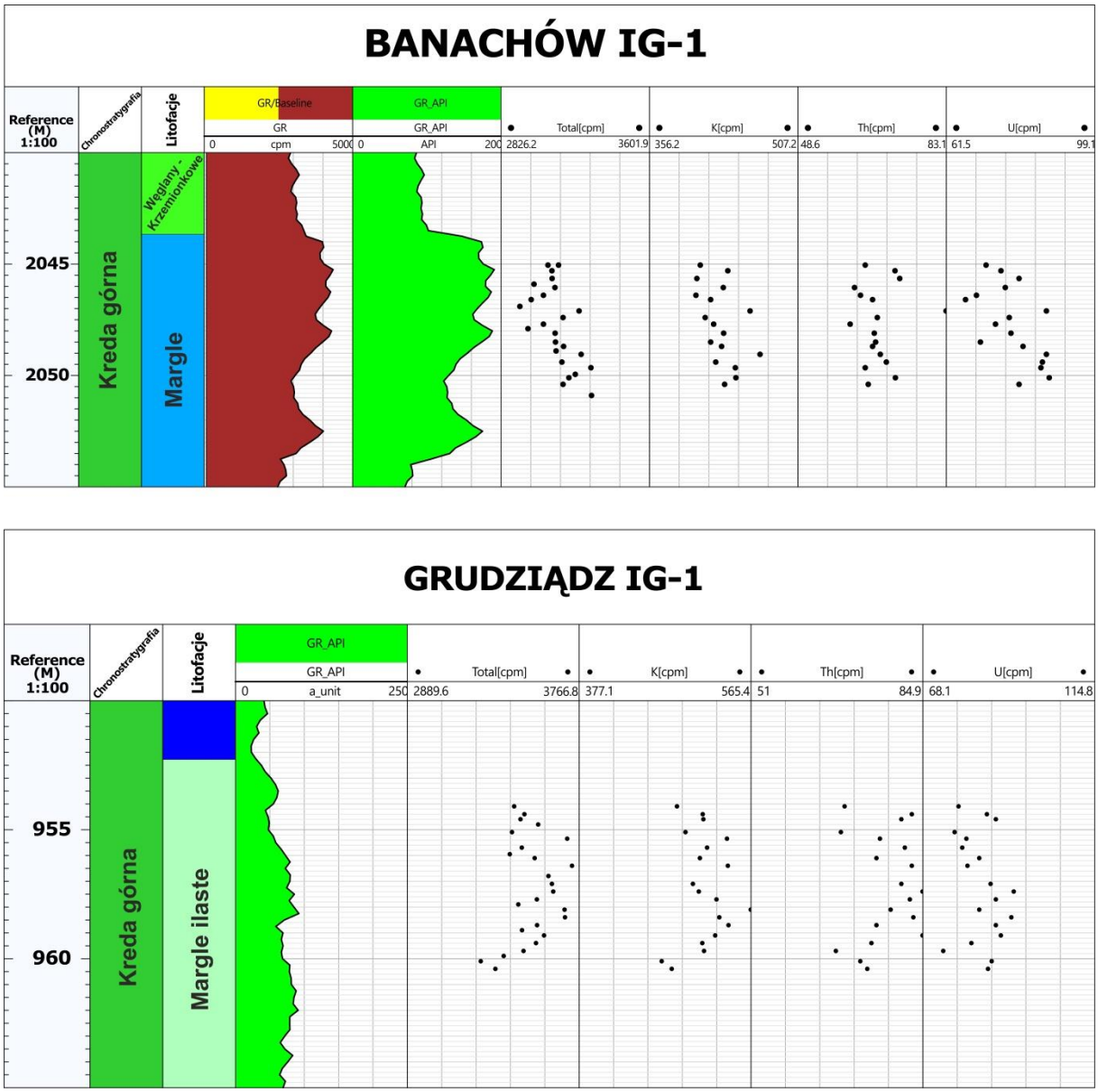


Fig. 4-15 Zapis pomiarów wykonanych ręcznym spektrometrem gamma w kredzie górnej w otworach Banachów IG-1 oraz Grudziądz IG-1. W kolumnie „Total" znajduje się zapis całkowitej ilości pomierzonego naturalnego promieniowana gamma w skale, natomiast w kolejnych kolumnach odpowiednio: zawartość potasu (K), toru (Th) oraz uranu (U)

Rdzeniowane odcinki są zbyt krótkie i zbyt chaotycznie rozłożone względem monotonnie wykształconej krzywej gamma z geofizyki otworowej, aby móc je skorelować i porównać. Dodatkowo nie zauważono zmian w wartościach gamma, które świadczyłyby o lokalnych zaileniach profilowanych interwałów. Dlatego do kolejnego etapu prac na rdzeniach wybrano odcinki z kredy dolnej, które charakteryzują się zmianami na krzywych geofizycznymi związanymi ze zmianami litologicznymi. W przypadku tego poziomu, ze względu na liczne przeławicenia piaskowców i mułowców, możliwe było powiązanie trendów zmienności krzywej gamma z geofizyki otworowej oraz tej pomierzonej na rdzeniach wiertniczych w kilku otworach (Fig. 4-16).

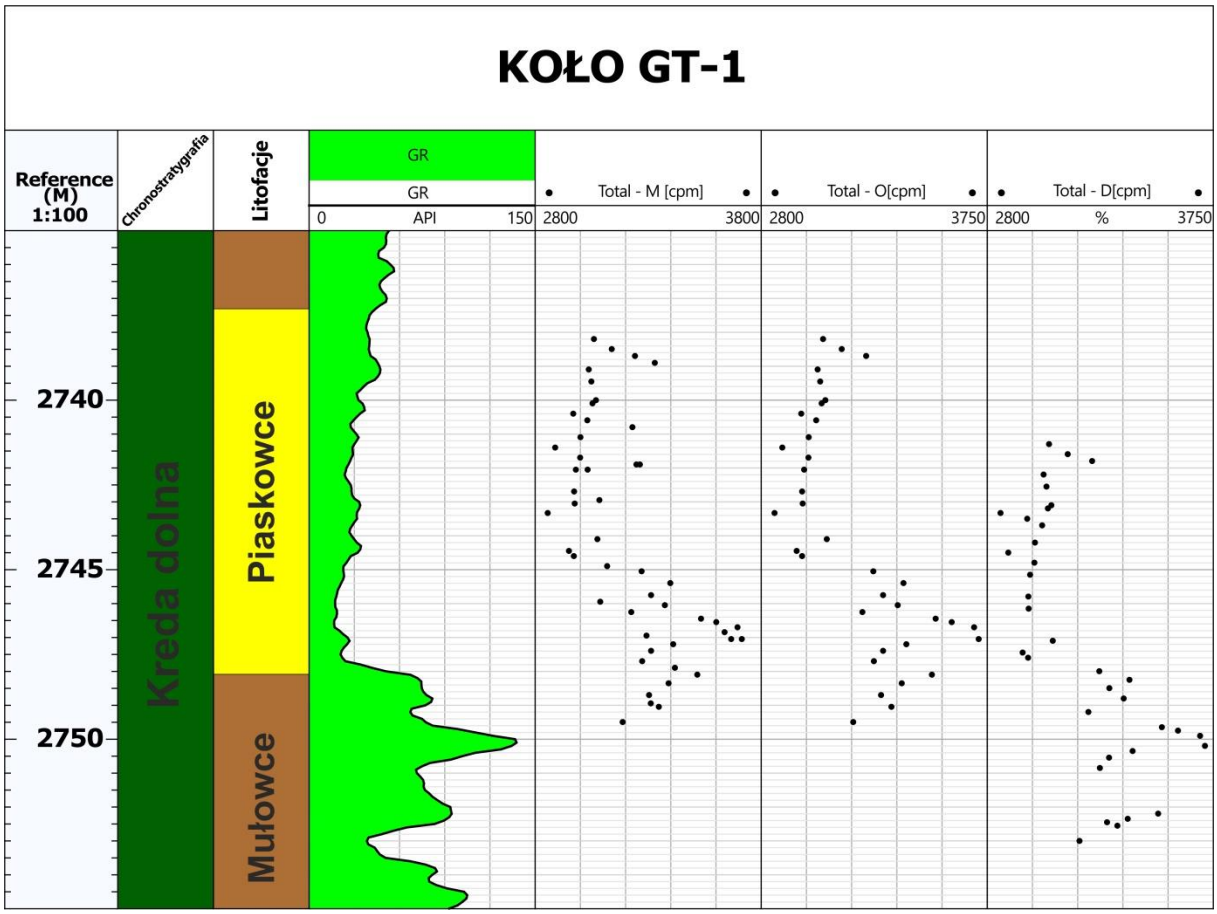


Fig. 4-16 Powiązanie wielkości naturalnego promieniowania gamma pomierzonych w rdzeniu wiertniczym i geofizyce otworowej w otworze Koło GT-1. Total – M – wartość całkowitego promieniowania gamma w rdzeniu wiertniczym, Total – O – wartości oczyszczone z wykrytych błędów pomiarowych, Total – D – wielkości po dopasowaniu głębokościowym do krzywej geofizycznej

W wyniku zestawienia krzywej gamma pomierzonej w otworze wiertniczym z pomiarami wykonanymi na rdzeniu możliwe było skorelowanie głębokościowe obu zestawów danych w wybranych otworach. Wielkość wykrytego przesunięcia waha się od kilkudziesięciu centymetrów do prawie 9 metrów i jest mocno zróżnicowana zarówno pomiędzy badanymi otworami jak i w obrębie jednego otworu na różnych fragmentach rdzenia. W zależności od badanego poziomu oraz zmienności litologicznej w danym otworze poziom pewności przeprowadzonych korelacji jest jednak zróżnicowany. Pełne zestawienie wykonanych korelacji wraz z oznaczeniem poziomów niepewnych przedstawiono w załączniku na DVD (plik *dopasowania głębokościowe.xlsx* w katalogu **/Baza danych/Profilowania rdzeni dla analizowanych otworów**). W dołączonym pliku dla każdego z analizowanych otworów przestawiono głębokość wiertniczą wykonanego pomiaru, głębokość według miary geofizycznej (jeśli jest nieznana to oznaczono ją znakiem zapytania) oraz wielkość przesunięcia głębokości wiertniczej względem głębokości geofizycznej. Przesunięcia najbardziej niepewne oznaczono w osobnej kolumnie znakami zapytania.

4.4.3 Wnioski i rekomendacje

W toku prac wykonano profilowania podatności magnetycznej i profilowania gamma na odcinkach rdzeni z wybranych otworów z obszaru centralnej części Niżu Polskiego. Badania te miały na celu przetestowanie użyteczności powyższych profilowań do wyznaczenia przesunięć głębokościowych pomiędzy rdzeniem a głębokością geofizyczną, a także wyznaczenia interwałów o wyższym zaileniu, które stanowiłby dodatkowe uszczelnienia zbiorników pod magazyny solankowe w kredzie dolnej i jurze.

Otrzymane wyniki z **profilowania podatności magnetycznej** wskazują na niewielką ich użyteczność w przypadku analiz dopasowań głębokościowych w skałach osadowych kredy i lokalnych zaileń. Pomimo iż jest to szybka, nieinwazyjna metoda, to ze względu na bardzo słabe parametry magnetyczne tych skał, a także ograniczenia sprzętowe, niemożliwa jest poprawna interpretacja i korelacja wyników do krzywych geofizycznych, a także wskazań obszarów o wyższym zaileniu.

Otrzymane wyniki z **profilowania polowym spektrometrem gamma**, wskazują na wysoką użyteczność tych profilowań, nawet na starych, archiwalnych rdzeniach, o ile spełnione są poniższe warunki:

- na krzywych geofizycznych znajdują się wyraźne odchylenia, wskazujące na zmienność litologiczną;
- profilowane odcinki rdzeni są wystarczająco ciągłe, aby wychwycić zmienności litologiczne z krzywych (to duży problem w przypadku starych archiwalnych rdzeni wiertniczych, o różnym stanie zachowania i krótkich interwałach rdzeniowanych);
- pomiary wykonywane są w jednolitych warunkach pomiarowych (z dostosowaniem czasu i kroku pomiarowego do litologii i organizacji jednego stanowiska pomiarowego – testy wyboru metodyki pokazały, że nie można profilować w sposób ciągły rdzeni zgodnie z ich rozłożeniem w skrzynkach wzdłuż profilatorni).

W przypadku pomiarów spektrometrem gamma rdzeni skał osadowych rekomendujemy stosowanie następujących praktyk:

1) jednorazowy pomiar powinien trwać nie krócej niż 3 minuty;
2) w przypadku pełnej skrzynki z rdzeniem powinny zostać wykonane min. 4 pomiary na skrzynkę;
3) pomiary powinny być wykonywane konsekwentnie albo na nieprzeciętej płaszczyźnie rdzenia, albo jeśli istnieje taka możliwość na rdzeniu przeciętym. Ważne, by w trakcie pomiarów nie zmieniać rodzaju powierzchni pomiarowej;
4) należy przygotować stanowisko pomiarowe z daleka od elementów, które mogą zaburzać odczyty, a następnie przenosić na nie każdą skrzynkę i w tak przygotowanym miejscu wykonywać pomiary.

Dzięki otrzymanym wynikom udało się wyliczyć przesunięcia głębokościowe w odcinkach, w 8 otworach (plik *dopasowania głębokościowe.xlsx* na DVD). Otrzymane wyniki korelacji pomiarów polowych do krzywej gamma wskazują na miejscami duże przesunięcia głębokościowe (np. w otworze Koło IG-3, czy Gostynin IG-4), które należy uwzględnić w przypadku interpretacji krzywych geofizyki wiertniczej w odniesieniu do pozyskanych z tych odcinków rdzenia wyników badań laboratoryjnych.

Ocena stopnia zailenia tylko na podstawie danych uzyskanych z pomiarów ręcznym spektrometrem gamma wydaje się być słabo wiarygodna ze względu na brak ciągłości pobieranego rdzenia, co uniemożliwia wybranie odpowiedniego punktu odniesienia względem zmian litologicznych. Pomiary spektrometrem na rdzeniu nie wykazały również wyższej wrażliwości na obecność cienkich przewarstwień ilastych niż krzywa uzyskana z geofizyki otworowej. Dlatego też, ocenę stopnia zailenia należy jednak opierać głównie na danych geofizycznych, skalibrowanych pomiarami zawartości poszczególnych minerałów (np. XRD), a pomiary spektrometrem wykorzystywać jedynie w celu wykonania dopasowania głębokościowego.

4.5. Charakterystyka petrograficzna i petrofizyczna osadów kredy górnej (z albem górnym)

(Aleksandra Kozłowska, Marta Kuberska)

Zbadano skały wieku kreda górna oraz alb górny z obszaru centralnej części Niżu Polskiego. Należą one do sekwencji węglanowej i węglanowo-krzemionkowej, która stanowić może uszczelnienie potencjalnych podziemnych magazynów i składowisk substancji w utworach piaskowcowych kredy dolnej (formacja mogileńska). Pobrano 63 próbki z 11 otworów wiertniczych: Banachów IG 1 (6 próbek), Gostynin IG 1/1A (5 próbek), Gostynin IG 4 (5 próbek), Grudziądz IG 1 (9 próbek), Koło IG 3 (7 próbek), Koło IG 4 (4 próbki), Poddębice IG 1 (8 próbek), Poddębice PIG 2 (11 próbek), Polik IG 1 (2 próbki), Strzelno IG 1 (2 próbki) i Żychlin IG 3 (4 próbki) (Tabela 4-8).

Tabela 4-8 Spis badanych próbek

L.p.	Nazwa otworu	Wiek	Głębokość [m]	Nazwa skały	Wykonane badania					
					PL	CL	SEM	XRD	Petro-fizyka	Mikro-szcze-lino-watość
1	Banachów IG 1	kampan	513,50-513,57	wapień	+	+	+		+	+
2		kampan	893,40-893,47	wapień	+				+	+
3		kampan	2046,20-2046,24	iłowiec wapnisty	+					
4		koniak dolny - turon	2048,20-2048,24	wapień marglisty/ iłowiec wapnisty	+	+	+	+		
5		koniak dolny - turon	2049,20-2049,23	iłowiec wapnisty	+					
6		koniak dolny - turon	2050,20-2050,24	wapień marglisty/ iłowiec wapnisty	+			+		
7	Gostynin IG1/1A	kampan	146,90-146,96	wapień marglisty	+				+	+
8		kampan	278,50-278,56	wapień marglisty	+					
9		santon górny	368,50-368,58	iłowiec wapnisty /wapień marglisty	+				+	
10		koniak górny - środkowy	587,10-587,16	wapień	+	+	+		+	+
11		koniak	659,10-	wapień	+				+	+

		dolny - turon	659,17							
12	Gostynin IG 4	mastrycht dolny	262,50-262,56	opoka	+	+				
13		kampan	395,60-395,67	wapień marglisty	+				+	
14		kampan	553,10-553,17	wapień marglisty/ opoka	+				+	
15		koniak górny - środkowy	903,40-903,47	wapień marglisty	+		+		+	+
16		koniak górny - środkowy	1067,20-1067,28	wapień marglisty	+	+			+	
17	Grudziądz IG 1	mastrycht	372,90-372,97	wapień	+	+			+	
18		mastrycht	604,50-604,57	opoka	+				+	+
19		santon	713,50-713,58	geza/opoka	+		+		+	
20		koniak dolny - turon	815,20-815,26	geza/opoka	+				+	+
21		koniak dolny - turon	841,20-841,26	geza/opoka	+					
22		koniak dolny - turon	890,60-890,67	geza/opoka	+		+		+	+
23		cenoman	956,70-956,76	mułowiec wapnisty	+		+		+	+
24		cenoman	1004,50-1004,56	mułowiec wapnisty/ margiel	+			+		
25		alb górny	1040,80-1040,86	wapień	+	+			+	+
26	Koło IG 3	kampan	282,70-282,76	opoka	+				+	
27		kampan	597,80-597,87	wapień	+	+	+		+	
28		santon	1015,60-1015,67	wapień margisty/ margiel	+	+	+		+	+
298		koniak górny - środkowy	1241,70-1241,76	opoka	+		+		+	+

30		koniak dolny - turon	1630,70-1630,76	wapień	+	+				
31		cenoman	1747,60-1747,67	wapień	+				+	
32		alb górny	1775,60-1775,62	wapień marglisty/ margiel	+			+		
33	Koło IG 4	kampan	573,20-573,27	opoka	+		+		+	+
34		santon	933,60-933,63	wapień marglisty/ opoka	+	+			+	+
35		koniak dolny - turon	1425,00-1425,07	wapień	+				+	+
36		koniak dolny - turon	1554,10-1554,17	wapień marglisty/ margiel	+	+		+		
37	Poddębice IG 1	santon	1001,50-1001,56	opoka	+		+		+	
38		koniak górny - środkowy	1140,10-1140,16	opoka	+			+		
39		koniak dolny - turon	1455,60-1455,63	iłowiec wapnisty	+			+		
40		koniak dolny - turon	1770,40-1770,44	wapień	+			+		
41		cenoman	1893,40-1893,45	wapień	+	+			+	
42		alb górny	1986,80-1986,84	wapień marglisty/ margiel	+					
43		alb górny	1994,50-1994,53	wapień marglisty/ margiel	+		+	+		
44		alb górny	1996,60-1996,63	wapień marglisty/ margiel	+	+				
45	Poddębice PIG 2	santon	975,30-975,38	opoka	+	+			+	+
46		santon	1068,30-1068,36	opoka	+		+		+	+
47		koniak górny - środkowy	1207,50-1207,57	opoka	+				+	+
48		koniak	1416,80-	opoka	+	+			+	+

		górny - środkowy	1416,86							
49		koniak dolny - turon	1522,50-1522,57	opoka	+		+		+	
50		koniak dolny - turon	1789,10-1789,15	wapień	+				+	
51		koniak dolny - turon	1891,30-1891,35	wapień	+	+				
52		koniak dolny - turon	1892,50-1892,54	wapień	+		+			
53		cenoman	2004,40-2004,46	wapień marglisty	+			+		
54		cenoman	2006,20-2006,23	iłowiec wapnisty/ margiel	+			+		
55		cenoman	2008,10-2008,13	iłowiec wapnisty/ margiel	+		+			
56	Polik IG 1	mastrycht górny	402,80-402,87	wapień	+		+		+	
57		cenoman	1196,50-1196,57	wapień	+	+			+	+
58	Strzelno IG 1	koniak dolny - turon	971,10-971,15	wapień marglisty	+		+		+	+
59		cenoman	1025,40-1025,49	wapień marglisty/ margiel	+	+			+	
60	Żychlin IG 3	koniak dolny - turon	397,10-397,16	wapień	+				+	
61		koniak dolny - turon	506,70-506,77	wapień marglisty	+		+		+	+
62		cenoman	541,70-541,77	wapień	+					
63		cenoman	571,50-571,57	wapień	+	+			+	+

4.5.1 Metodyka

Wykonano 63 płytki cienkie ze skał nasączonych niebieską żywicą w celu identyfikacji porów. Wszystkie preparaty badane były w mikroskopie polaryzacyjnym (analiza petrograficzna, PL) przy użyciu mikroskopu polaryzacyjnego Optiphot 2 Pol firmy Nikon. 20 płytek cienkich poddano

analizie w katodoluminescencji (CL) przy użyciu zimnej katody, model CITL MK5, wyposażonej w EDX, firmy Cambridge Image Technology Ltd. Obserwacje w CL były pomocne w identyfikacji minerałów węglanowych oraz ziarn detrytycznych. Zbadano 20 odłupków skał w skaningowym mikroskopie elektronowym (SEM) typu LEO 1430, wyposażonym w mikrosondę energetyczną EDS ISIS firmy Oxford Instruments. Badania te wykonano w celu analizy szkieletu ziarnowego skały oraz jej przestrzeni porowej. 12 próbek poddano analizie rentgenowskiej (XRD) na dyfraktometrze rentgenowskim firmy Bruker D8, z lampą Co, wyposażonym w szybki detektor Vantec-1. Badania te wykonał M. Szczerba z PAN w Krakowie i przedstawił w raporcie „Wykonanie analizy rentgenowskiej (XRD) w 12 próbkach skał drobnoklastycznych" (zamieszczony na DVD w katalogu **/Prace podwykonawców/Analiza rentgenowska**). W zbadanych próbkach uzyskano ilościowy skład mineralny skały (Tabela 4-9). W 40 próbkach wykonano badania petrofizyczne, które obejmowały oznaczenia porowatości, przepuszczalności i charakterystykę systemu porów przy pomocy porozymetrii rtęciowej (Tabela 4-10). W 25 płytkach cienkich przeprowadzono badania mikroszczelinowatości (Tabela 4-12). Badania petrofizyczne i mikroszczelinowatości zostały wykonane przez G. Leśniaka z zespołem w Instytucie Nafty i Gazu-PIB w Krakowie i zostały przedstawione w opracowaniu p.t. „Wykonanie badań petrofizycznych w 40 próbkach skał kredowych i analiza mikroszczelinowatości w 20 szlifach" (zamieszczone na DVD w katalogu **/Prace podwykonawców/Badania petrofizyczne**).

4.5.2 Wyniki badań

4.5.2.1 Charakterystyka petrograficzna

Wśród badanych skał większość reprezentuje wapienie, przeważnie margliste. Ponadto występują iłowce/mułowce wapniste i margle oraz skały wapienno-krzemionkowe (opoki i gezy) (Tabela 4-8) (Fig. 4-17 A-H, Fig. 4-18 A-H). Skały te przechodzą w siebie wzajemnie tworząc wiele różnych odmian.

Wapienie reprezentują wapienie i wapienie margliste, które występują od albu górnego do mastrychtu górnego (Tabela 4-8) (Fig. 4-17 A-H). Głównym składnikiem skały jest mikryt i mikrospar kalcytowy, z domieszką substancji ilastej i krzemionki, w którym tkwią szczątki organiczne. Zawartość minerałów ilastych wynosi od kilku do >30%. Wśród nich zidentyfikowano: illit, minerał mieszanopakietowy illit/smektyt (>50% i >75% illitu) oraz kaolinit, lokalnie chloryty (Tabela 4-9). Krzemionka występuje w postaci pyłu kwarcowego oraz ziarn frakcji aleurytowej i psamitowej, w ilości kilku %. Obserwowano również ziarna skaleni (skalenie potasowe, plagioklazy), blaszki muskowitu oraz glaukonit. Ponadto występują dolomit, piryt oraz materia organiczna. Wapienie różnią się zawartością bioklastów, wśród których wyróżniono: skorupki otwornic, fragmenty muszli małży i małżoraczków, kokkolity, kalcysfery oraz igły gąbek. Według klasyfikacji Dunhama (nieco zmieniona) (Jaworowski, 1987) wapienie reprezentują madstony, wakstony i pakstony. Jedna próbka wapienia sparytowego (Grudziądz IG 1, głęb. 1040,8 m) jest greinstonem – alb górny (Tabela 4-8).

Iłowce/mułowce wapniste występują w cenomanie, turonie-koniaku dolnym, santonie górnym i kampanie (Tabela 4-8, Fig. 4-18 A,B). Iłowce charakteryzują się teksturą kierunkową podkreśloną ułożeniem blaszek minerałów ilastych i muskowitu, którym niekiedy towarzyszą materia organiczna i piryt. Zbudowane są głównie z minerałów ilastych, krzemionki oraz mikrytu i mikrosparytu

kalcytowego stanowiącego tło skalne, w którym tkwią: fragmenty bioklastów, ziarna kwarcu frakcji aleurytowej i psamitowej, ziarna skaleni, glaukonit i fosforany. Stwierdzono też występowanie dolomitu. Analiza rentgenowska iłowców/mułowców wapnistych wykazała zawartość kwarcu i skaleni od około 15 do 50%, a kalcytu od około 16 do 44% (Tabela 4-9).

Margle to skały ilaste o zawartości węglanów w granicach 35-65% (Manecki i Muszyński, red., 2008), które charakteryzują się zróżnicowanymi cechami litologicznymi. Ze względu na podobieństwo składu wapieni marglistych, margli i iłowców/mułowców wapnistych oraz na trudność dokładnego oszacowania ilości węglanów w tych skałach nie wydzielono margli. W opisach skał stosowano nazwy wapienie margliste oraz iłowce/mułowce wapniste, wśród których mogą być skały nazywane wcześniej marglami.

Opoki to skały powszechne w kredzie górnej, od turonu po mastrycht (Tabela 4-8). Są to skały przejściowe między skałami krzemionkowymi a wapieniami. Zbudowane są z mikrosparu kalcytowego i krzemionki (opal, chalcedon) oraz szczątków organicznych (kokkolity, otwornice, małże, szkarłupnie, igły gąbek). Ponadto zawierają minerały ilaste, ziarna kwarcu frakcji aleurytowej, ziarna skaleni (skaleń potasowy i plagioklaz) oraz blaszki muskowitu i glaukonit. Widoczne są puste przestrzenie w skorupkach bioklastów.

Gezy zostały rozpoznane od turonu do santonu w otworze Grudziądz IG 1 (Tabela 4-8, Fig. 4-18 C-F). Są to skały o mieszanym składzie stojące na pograniczu skał krzemionkowych, klastycznych i węglanowych. Charakteryzują się teksturą bezładną lub kierunkową podkreśloną ułożeniem blaszek minerałów ilastych i muskowitu, którym towarzyszy materia organiczna i piryt. Tło skalne zbudowane jest z krzemionki (opal) i mikrytu kalcytowego. Liczne są blaszki muskowitu. Pozostałe składniki reprezentowane są przez ostrokrawędziste ziarna kwarcu, ziarna skaleni, glaukonit oraz kalcytowe fragmenty bioklastów (fragmenty muszli małżów, skorupki otwornic, kokkolity, spikule gąbek). Ponadto obserwowano materię organiczną, piryt i dolomit.

Tabela 4-9 Wyniki badań XRD próbek skał z analizowanych otworów

Nazwa Otworu	Głębo-kość [m]	Nazwa skał	Kwarc	Skaleń pota-sowy	Plagio-klaz	Kalcyt	Ca-ankeryt	Baryt	Piryt	Anataz	Rutyl	Kaoli-nit	Musko-wit 2M1	Illit-smektyt *	Sme-ktyt **	Chlo-ryt
Banachów IG 1	2048,20-2048,24	wapień marglisty/ iłowiec wapnisty	7,0		0,6	74,8			2,3	0,1		1	2,6	4,3	6,6	0,7
Banachów IG 1	2050,20-2050,24	wapień marglisty/ iłowiec wapnisty	10,5		0,4	63,2		0,4	1,3	0,2		2	3,1	9,8	8,5	0,6
Grudziądz IG 1	1004,50-1004,56	mułowiec wapnisty/ margiel	40,6	7,9	1,5	16,5			0,5			1,4	7,2	15,8	7,4	1,2
Koło IG 3	1775,60-1775,62	wapień marglisty/ margiel	7,0			57,2	0,4			0,1	0,1	2,9	6,5	18,8	6,3	0,7
Koło IG 4	1554,10-1554,17	wapień marglisty/ margiel	7,5			86,3						0,7	2,1		3,4	
Poddębice IG 1	1140,10-1140,16	opoka	29,7	0,8	0,5	48,1	0,6		0,2	0,1		0,5	1,4	10,9	7,2	
Poddębice IG 1	1455,60-1455,63	iłowiec wapnisty	27,5	1,2	0,6	42,8	0,2		0,2	0,2		1,3	4,8	7,7	13,5	
Poddębice IG 1	1770,40-1770,44	wapień	9,8	0,6	0,3	74,0						0,8	2,4	4,5	7,6	
Poddębice IG 1	1994,50-1994,53	wapień marglisty/ margiel	7,8			85,3			0,2			0,5		2,2	4	
Poddębice IG 1	1996,60-1998,63	wapień marglisty/ margiel	7,0	0,4		61,9	1,5			0,1		2,9	4,4	15,9	5,9	
Poddębice	2004,40-	wapień marglisty	5,1		0,3	80,2						0,5	1,2	7,8	4,9	

PIG 2	2004,46															
Poddębice PIG 2	2006,20-2006,23	iłowiec wapnisty/ margiel	14,3	0,9	0,5	43,6	1,5			0,2		1,3	3,5	25,8	8,4	

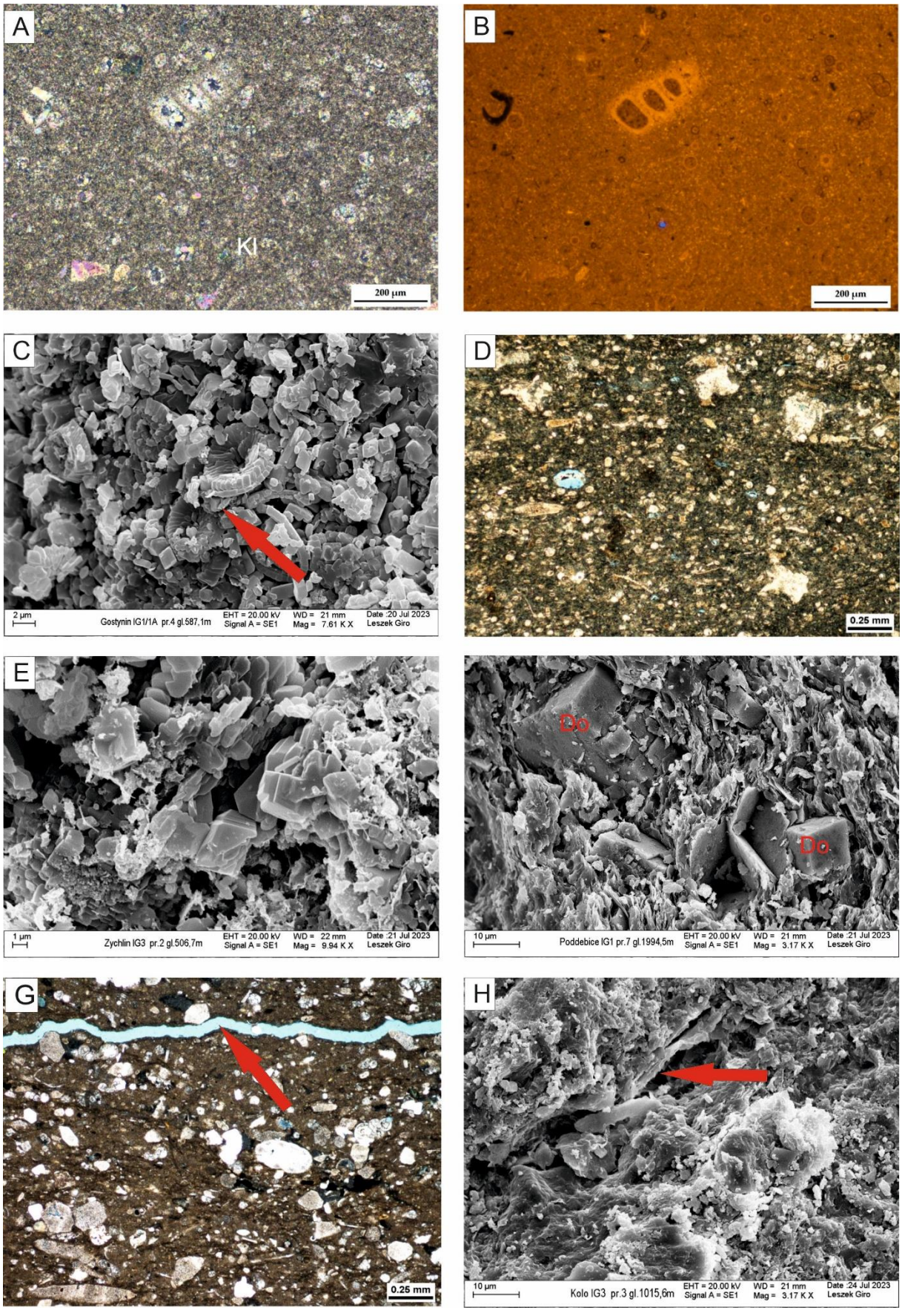


Fig. 4-17 Mikrofotografie wykonane w mikroskopie polaryzacyjnym (PL), katodoluminescencji (CL) i skaningowym mikroskopie elektronowym (SEM)

A. *Wapień zawierający fragmenty bioklastów; widoczna skorupka otwornicy. Polik IG 1, głęb. 1196,57 m, PL, nikole skrzyżowane.* ***B.*** *Wapień z fot. A w obrazie CL; spoiwo kalcytowe świeci na pomarańczowo.* ***C.*** *Wapień zbudowany z mikrytowych i mikrosparytowych kryształów kalcytu i kokkolitów (strzałka). Gostynin IG 4, głęb. 587,1 m, obraz SEM.* ***D.*** *Wapień marglisty; widoczne pory (niebieska barwa) wewnątrz skorupek bioklastów; próbka impregnowana niebieską żywicą na porowatość. Żychlin IG 1, głęb. 506,7 m, PL, bez analizatora.* ***E.*** *Wapień marglisty z fot. D w obrazie SEM; masa podstawowa skały zbudowana z mikrytowych i mikrosparytowych kryształów kalcytu oraz minerałów ilastych.* ***F.*** *Wapień marglisty/margiel; romboedry dolomitu (Do) tkwiące w masie kalcytowo-ilastej. Poddębice IG 1, głęb. 1994,5m, obraz SEM.* ***G.*** *Szczelina (strzałka, niebieska barwa) w wapieniu marglistym/marglu; próbka impregnowana niebieską żywicą na porowatość. Koło IG 3, głęb. 1015,6 m, PL, bez analizatora.* ***H.*** *Wapień marglisty/margiel z fot. G w obrazie SEM; widoczna szczelina w skale (strzałka).*

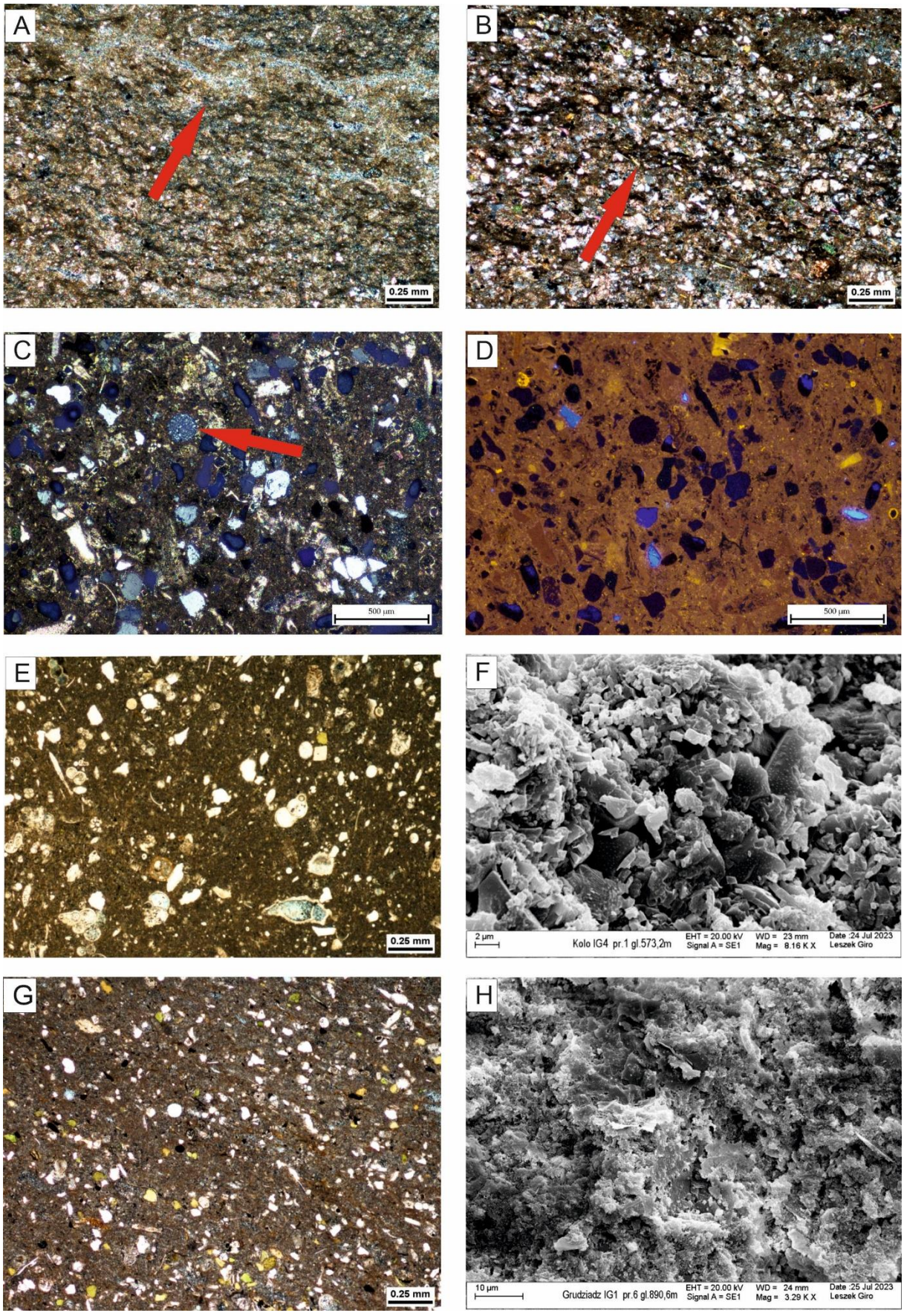


Fig. 4-18 Mikrofotografie wykonane w mikroskopie polaryzacyjnym (PL), katodoluminescencji (CL) i skaningowym mikroskopie elektronowym (SEM)

A. *Iłowiec wapnisty o teksturze kierunkowej (strzałka). Poddębice PIG 2, głęb. 2008,13 m, PL, nikole skrzyżowane.* ***B.*** *Mułowiec wapnisty o teksturze kierunkowej (strzałka). Grudziądz IG 1, głęb. 956,76 m, PL, nikole skrzyżowane.* ***C.*** *Opoka; widoczna igła gąbki wypełniona krzemionką (strzałka) oraz ziarna kwarcu i skaleni. Gostynin IG 1, głęb. 262,5 m, PL, nikole skrzyżowane.* ***D.*** *Opoka z fot. A w obrazie CL; masa podstawowa kalcytowo-krzemionkowa świeci na brunatno; skalenie potasowe wykazują niebieską luminescencję.* ***E.*** *Opoka; widoczne pory (niebieska barwa) wewnątrz skorupek bioklastów; próbka impregnowana niebieską żywicą na porowatość. Koło IG 4, głęb. 573,2 m, PL, bez analizatora.* ***F.*** *Opoka z fot. G w obrazie SEM; masa podstawowa skały zbudowana z kalcytu, krzemionki i minerałów ilastych.* ***G.*** *Geza/opoka; widoczny glaukonit oraz pory (niebieska barwa) wewnątrz skorupek bioklastów; próbka impregnowana niebieską żywicą na porowatość. Grudziądz IG 1, głęb. 890,6 m, PL, bez analizatora.* ***H.*** *Geza/opoka z fot. G w obrazie SEM; masa podstawowa skały zbudowana z krzemionki oraz minerałów ilastych i kalcytu.*

4.5.2.2 Przestrzeń porowa i mikroszczelinowatość skał

Charakterystykę przestrzeni porowej wraz z oznaczeniem przepuszczalności przedstawiają Tabela 4-10 i Tabela 4-11. Większość badanych skał charakteryzuje się bardzo wysokimi porowatościami efektywnymi, których średnie wartości oscylują około 20%. We wszystkich badanych skałach występuje wyraźny trend spadku porowatości wraz z głębokością. Wielkość średnicy progowej (wyznacza rozmiar porów, w których zaznacza się ciągły przepływ płynów przez próbkę) najczęściej nie przekracza 0,20 µm. Udział procentowy porów >1 µm jest zerowy. Analizowane próbki charakteryzują się silnie nanoporowatym systemem porów (dominuje frakcja <0,1 µm) (Tabela 4-10). W badanych skałach udział nanoporów jest wysoki (przeciętnie 69%); posiadają one również znaczny udział mikroporów (0,5 – 0,1 µm), których przeciętne wartości sięgają 30%. Pozostałe frakcje porów prawie nie występują.

Histereza, przeciętnie około 60%, wskazuje na słabe właściwości filtracyjne skał, a ich przepuszczalność jest bardzo niska (mediany <0,1 mD).

Tabela 4-10 Właściwości petrofizyczne próbek skał z analizowanych otworów

Otwór	Głębokość [m]	Nazwa skały	Porowatość całkowita [%]	Porowatość efektywna [%]	Gęstość szkieletowa [g/cm3]	Gęstość objętościowa [g/cm3]	Średnica progowa [µm]	Średnica średnia [µm]	Powierzchnia właściwa SSA [m2/g]	Pory > 1 µm	Histereza [%]	Frakcje porów [%]					Przepuszczalność [mD]			
												mega >10 µm	macro 10-2 µm	meso 2-0,5 µm	micro 0,5-0,1 µm	nano < 0,1 µm	k_KT	k_Swanson	k_Purcell	k abs.
Banachów IG 1	513,5	wapień	31.99	30.32	2.67	1.82	0.45	0.07	9.90	0.00	56.81	0.00	0.00	1.01	71.65	27.33	0.115	0.383	0.170	n.o.
Banachów IG 1	893,4	wapień	16.59	14.97	2.70	2.25	0.18	0.06	4.49	0.00	63.89	0.00	0.00	0.00	54.78	45.22	0.015	0.047	0.018	0.009
Gostynin IG 1/1A	146,9	wapień marglisty	46.12	43.65	2.59	1.40	0.30	0.04	31.10	0.51	39.96	0.00	0.10	1.63	40.16	57.60	0.118	0.173	0.444	n.o.
Gostynin IG 1/1A	368,5	iłowiec wapnisty/ wapień marglisty	33.35	32.20	2.62	1.75	0.14	0.04	20.59	0.00	31.47	0.00	0.00	0.00	19.35	80.65	0.016	0.055	0.017	n.o.
Gostynin IG 1/1A	587,1	wapień	20.86	19.63	2.71	2.14	0.60	0.23	1.56	0.00	44.77	0.00	0.00	6.64	86.59	6.77	0.189	0.693	0.255	0.217
Gostynin IG 1/1A	659,1	wapień	16.97	15.77	2.70	2.24	0.23	0.05	5.53	0.00	64.62	0.00	0.00	0.45	27.34	72.21	0.002	0.019	0.016	0.018
Gostynin IG 4	395,6	wapień marglisty	40.78	39.14	2.64	1.56	0.30	0.05	19.49	0.00	30.47	0.00	0.00	0.23	56.38	43.39	0.099	0.288	0.112	n.o.
Gostynin IG 4	553,1	wapień marglisty/opoka	32.42	31.14	2.69	1.82	0.35	0.08	8.20	0.00	33.07	0.00	0.00	0.00	76.27	23.73	0.076	0.490	0.179	0.199
Gostynin IG 4	903,4	wapień marglisty	19.63	17.14	2.74	2.20	0.25	0.11	2.73	0.00	47.62	0.00	0.00	0.00	83.42	16.58	0.030	0.163	0.062	0.043
Gostynin IG 4	1067,2	wapień marglisty	10.54	8.68	2.72	2.44	0.12	0.05	3.01	0.00	68.61	0.00	0.00	0.00	7.92	92.08	0.001	0.006	0.003	0.012
Grudziądz IG 1	372,9	wapień	36.74	35.83	2.57	1.62	0.14	0.03	33.38	0.00	38.53	0.00	0.00	0.00	11.92	88.08	0.022	0.040	0.012	0.004
Grudziądz IG 1	604,5	opoka	42.27	37.41	2.41	1.39	0.02	0.02	57.27	0.00	38.55	0.00	0.00	0.25	23.97	75.78	0.027	0.053	0.036	n.o.
Grudziądz IG 1	713,5	geza/opoka	32.73	30.48	2.55	1.72	0.30	0.03	25.63	0.00	42.37	0.00	0.00	0.16	31.94	67.90	0.018	0.057	0.046	n.o.
Grudziądz IG 1	815,2	geza/opoka	40.44	37.77	2.39	1.43	0.31	0.02	49.27	0.00	40.59	0.00	0.00	2.35	18.28	79.37	0.023	0.055	0.088	0.030
Grudziądz IG 1	890,6	geza/opoka	37.52	35.56	2.55	1.60	0.09	0.04	24.43	0.00	25.42	0.00	0.00	0.00	3.14	96.86	0.001	0.050	0.010	0.021
Grudziądz IG 1	956,7	mułowiec wapnisty	24.13	20.51	2.70	2.05	0.12	0.04	10.75	0.00	58.79	0.00	0.00	0.52	6.73	92.75	0.002	0.019	0.013	n.o.
Grudziądz IG 1	1040,8	wapień	8.99	7.28	2.65	2.42	0.29	0.10	1.23	0.03	64.14	0.00	1.28	1.26	72.17	25.27	0.040	0.027	0.206	0.006
Koło IG 3	282,7	opoka	36.61	35.10	2.61	1.65	0.09	0.04	22.62	0.00	36.76	0.00	0.00	0.00	6.52	93.48	0.002	0.042	0.014	n.o.
Koło IG 3	597,8	wapień	20.56	19.29	2.70	2.15	0.18	0.06	5.80	0.00	51.29	0.00	0.00	0.00	52.84	47.16	0.017	0.069	0.022	0.017
Koło IG 3	1015,6	wapień marglisty/margiel	11.69	9.77	2.70	2.39	0.05	0.02	7.44	0.00	67.29	0.00	0.00	0.36	2.64	97.00	0.001	0.002	0.005	n.o.
Koło IG 3	1241,7	opoka	11.88	9.66	2.68	2.37	0.03	0.01	13.31	0.00	76.52	0.00	0.00	0.00	0.50	99.50	0.000	0.001	0.001	0.000
Koło IG 3	1747,6	wapień	4.37	2.26	2.72	2.61	0.02	0.01	3.75	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.000	0.000	0.000	0.000
Koło IG 4	573,2	opoka	17.22	15.39	2.70	2.23	0.25	0.09	3.14	0.00	56.61	0.00	0.00	0.00	80.58	19.42	0.025	0.125	0.054	0.030

Koło IG 4	933,6	opoka	11.60	9.21	2.70	2.39	0.03	0.01	12.32	0.00	73.61	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.000	0.001	0.000	0.000
Koło IG 4	1425.0	wapień	6.98	5.12	2.71	2.52	0.05	0.02	4.14	0.00	90.79	0.00	0.00	0.00	0.38	99.62	0.000	0.001	0.001	0.000
Poddębice IG 1	1001,5	opoka	10.92	8.76	2.70	2.40	0.03	0.01	12.96	0.00	76.57	0.00	0.00	0.00	0.11	99.89	0.000	0.000	0.000	0.000
Poddębice IG 1	1893,4	wapień	6.99	4.72	2.71	2.53	0.03	0.01	5.36	0.00	94.57	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.001	0.000	0.000	0.000
Poddębice PIG 2	975,3	opoka	14.07	11.64	2.65	2.28	0.02	0.01	20.19	0.00	55.05	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.000	0.001	0.000	n.o.
Poddębice PIG 2	1068,3	opoka	16.29	12.45	2.63	2.20	0.02	0.01	21.73	0.00	53.63	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.000	0.001	0.000	n.o.
Poddębice PIG 2	1207,5	opoka	17.69	14.52	2.68	2.21	0.09	0.02	12.15	0.00	68.56	0.00	0.00	0.00	0.56	99.44	0.002	0.004	0.002	0.001
Poddębice PIG 2	1416,8	opoka	12.14	9.71	2.69	2.36	0.05	0.01	13.10	0.00	77.46	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.000	0.001	0.000	n.o.
Poddębice PIG 2	1522,5	opoka	13.36	10.88	2.66	2.30	0.09	0.03	6.77	0.00	69.46	0.00	0.00	0.00	1.37	98.63	0.002	0.004	0.002	0.001
Poddębice PIG 2	1789,1	wapień	6.59	3.57	2.69	2.52	0.02	0.01	5.80	0.00	95.57	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.000	0.000	0.000	0.000
Polik IG 1	402,8	wapień	40.34	39.72	2.64	1.58	0.60	0.08	12.07	1.50	33.23	0.00	0.85	7.29	69.32	21.05	0.115	1.087	0.965	n.o.
Polik IG 1	1196,5	wapień	13.75	12.99	2.71	2.34	0.20	0.10	2.14	0.00	57.94	0.00	0.00	0.00	78.38	21.62	0.017	0.070	0.027	0.020
Strzelno IG 1	971,1	wapień marglisty	10.96	9.09	2.64	2.35	0.05	0.02	8.93	0.89	79.35	0.00	0.00	0.33	0.00	98.78	0.008	0.001	0.013	n.o.
Strzelno IG 1	1025,4	wapień marglisty/margiel	6.78	4.65	2.72	2.53	0.02	0.01	6.81	0.00	89.41	0.00	0.00	0.00	1.59	98.41	0.000	0.000	0.001	0.000
Żychlin IG 3	397,1	wapień	34.97	33.90	2.69	1.75	0.30	0.08	9.58	0.00	39.06	0.00	0.00	0.03	71.84	28.13	0.113	0.316	0.124	n.o.
Żychlin IG 3	506,7	wapień marglisty	27.57	26.12	2.68	1.94	0.30	0.07	7.97	0.00	54.59	0.00	0.00	0.25	61.68	38.07	0.056	0.144	0.079	0.040
Żychlin IG 3	571,5	wapień	21.56	19.97	2.72	2.13	0.25	0.11	3.49	0.00	49.02	0.00	0.00	0.00	79.00	21.00	0.026	0.163	0.062	n.o.

Tabela 4-11 Zbiorcze parametry przestrzeni porowej dla głównych typów skał

Parametry przestrzeni porowej	Typy skał		
	Wapienie	Iłowce/mułowce wapniste/margle	Opoki/gezy
Porowatość całkowita [%]	20,61	28,74	22,48
Porowatość efektywna [%]	18,95	26,36	19,90
Średnica progowa [µm]	0,20	0,13	0,10
Średnica przeciętnej kapilary [µm]	0,06	0,04	0,03
Powierzchnia właściwa SSA [m^2/g]	8,50	15,67	21,06
Pory >1 µm [%]	0,12	0,00	0,00
Histereza [%]	60,61	45,13	56,51
Przepuszczalność [mD]	0,015	0,108	0,080

Analiza mikroszczelinowatości w płytkach cienkich wykazała, że rozwartość obserwowanych mikroszczelin w płytkach cienkich wynosi od 0,003 do 0,11 mm (Tabela 4-12 i Tabela 4-13). Wartość średnia użyta do obliczeń wynosiła 0,007 mm. W części próbek obserwowano porowatość wtórną wzdłuż szczelin, która powstała w wyniku działania krążących roztworów.

Tabela 4-12 Wyniki badań mikroszczelinowatości na płytkach cienkich

L.p.	Nazwa otworu	Głębokość [m]	Nazwa skały	Wskaźnik objętościowy szczelin [1/cm]	Porowatość szczelinowa [%]	Przepuszczalność szczelinowa [mD]
1	Banachów IG 1	513,5	wapień	0	0	0
2		893,4	wapień	0,128	0,057	0,048
3	Gostynin IG 1/1A	146,9	wapień marglisty	2,006	0,894	0,749
4		587,1	wapień	1,042	0,465	0,389
5		659,1	wapień	0	0	0
6	Gostynin IG 4	903,4	wapień marglisty	0,843	0,376	0,315
7	Grudziądz IG 1	604,5	opoka	3,355	1,496	1,253
8		713,5	geza/ opoka	2,292	1,022	0,856
9		815,2	geza/ opoka	0,112	0,050	0,042
10		890,6	geza/ opoka	0,200	0,089	0,075
11		956,7	iłowiec wapnisty	1,402	0,625	0,524
12		1040,8	wapień	0	0	0

13	Koło IG 3	1015,6	wapień marglisty/ margiel	2,229	0,994	0,833
14		1241,7	opoka	0,402	0,179	0,150
15	Koło IG 4	573,2	opoka	1,167	0,520	0,436
16		933,6	opoka	0	0	0
17		1425,0	wapień	0,177	0,079	0,066
18	Poddębice PIG 2	975,3	opoka	0,207	0,092	0,077
19		1068,3	opoka	0,116	0,052	0,043
20		1207,5	opoka	0,419	0,187	0,156
21		1416,8	opoka	0	0	0
22	Polik IG 1	1196,5	wapień	0	0	0
23	Strzelno IG 1	971,1	wapień marglisty	7,624	3,399	2,848
24	Żychlin IG 3	506,7	wapień marglisty	0,166	0,074	0,062
25		571,5	wapień	0	0	0

Tabela 4-13 Zbiorcze zestawienie parametrów szczelinowatości dla głównych typów skał z analizowanych otworów

Parametry mikroszczelinowatości	Typy skał		
	Wapienie	Iłowce/mułowce wapniste/margle	Opoki/gezy
Wskaźnik objętościowy szczelin [1/cm]	1,093	1,402	0,752
Porowatość szczelinowa [%]	0,536	0,625	0,335
Przepuszczalność szczelinowa [mD]	0,449	0,524	0,281

4.5.2.3 Diageneza

Główne procesy diagenetyczne działające w skałach to: kompakcja, cementacja, rozpuszczanie, zastępowanie oraz przeobrażanie i neomorfizm.

Kompakcja zaznaczyła się w różnym stopniu w osadach kredy, co ma związek z głębokością ich zalegania, od około 150 m do około 2050 m. Na działanie kompakcji mechanicznej wskazują pofalowane, cienkie laminki ilaste i towarzyszące im drobne fragmenty bioklastów, które uległy reorientacji. W wapieniach z dużą ilością bioklastów można obserwować większe ich upakowanie oraz kierunkowe ułożenie. Efektem kompakcji mogą być również spękania i mikroszczeliny. Kompakcja chemiczna zaznaczyła się w postaci struktur stylolitowych i mikrostylolitowych w osadach głębiej pogrzebanych.

Wśród cementów do najważniejszych należą minerały węglanowe, które są głównym składnikiem skał węglanowych, i mają przeważający udział w osadach kredy. Głównym minerałem węglanowym

jest mikrokrystaliczny kalcyt, o niskiej zawartości magnezu (Połońska, 1999). W katodoluminescencji spoiwo mikrytowe i mikrosparytowe kalcytu wykazuje świecenie w barwach od pomarańczowej do brunatnej, co związane jest z obecnością mikroskamieniałości i substancji ilastej. W niewielkiej ilości występuje dolomit, który zaobserwowano w skaningowym mikroskopie elektronowym. Kryształy dolomitu wykształcone w postaci drobnych romboedrów tkwią w tle kalcytowym. W zmiennych ilościach minerałom węglanowym towarzyszą inne minerały autigeniczne, takie jak: kwarc, chalcedon, opal, glaukonit i piryt. Krzemionka pochodzenia organicznego impregnuje opoki, wapienie i gezy. W eodiagenezie miała miejsce sylifikacja skorup bioklastów zbudowanych z węglanu wapnia oraz gąbek. Miejscami powstały nodule krzemieni i czertów. Chalcedon i opal wypełniają puste przestrzenie w skorupkach otwornic oraz igły gąbek. Glaukonit stwierdzono we wszystkich typach skał. Tworzy on owalne formy w masie skalnej, a niekiedy wypełnia mikropory w bioklastach. Piryt występuje w formie rozproszonej w skale, niekiedy towarzyszy materii organicznej oraz wypełnia pustki w bioklastach.

Rozpuszczanie nie miało większego znaczenia w badanych osadach. Miejscami obserwowano efekty rozpuszczania igieł gąbek czy skorup małży i ponowną ich cementację. Widoczne są również pustki po igłach gąbek oraz innych organizmach. Analiza w skaningowym mikroskopie elektronowym ujawniła występowanie drobnych zagłębień korozyjnych na ziarnach i kryształach minerałów węglanowych.

Efektem zastępowania jest pirytyzacja, a przeobrażania fosfatyzacja skorupek bioklastów. Neomorfizm agradacyjny zaznaczył się wzrostem kryształów węglanowych budujących spoiwo. W miejsce kryształów wielkości submikroskopowej powstał mikrospar.

4.5.2.4 Diageneza a porowatość

Porowatość osadów kredy górnej uległa modyfikacji na skutek zmian diagenetycznych. Na redukcję porowatości miała wpływ kompakcja mechaniczna, w mniejszym stopniu chemiczna. Zmniejszenie porów spowodowała również cementacja głównie węglanami oraz krzemionką. Neomorfizm agradacyjny ograniczył pierwotną porowatość międzykrystaliczną. Pozytywny wpływ na porowatość miało rozpuszczanie igieł gąbek i cementów węglanowych, czego efektem było powstanie wtórnej porowatości. Porowatość efektywna analizowanych skał waha się od 2,26 do 43,65%, a przepuszczalność od 0 do 0,217 mD (Tabela 4-10 i Tabela 4-11). Generalnie, na skutek diagenezy w osadach kredy górnej nastąpiło zmniejszenie porowatości i prawie całkowite ograniczenie przepuszczalności. Większość skał jest (praktycznie) nieprzepuszczalna.

4.5.2.5 Wnioski

Osady kredy górnej, głównie wapienie, iłowce/mułowce wapniste, margle oraz opoki i gezy charakteryzują się wysoką porowatością efektywną – około 20%. Jednakże przestrzeń porowa tych skał ma charakter mikroporowaty (dominuje frakcja <0,1 μm). Rozbudowany system nanoporów znacznie obniża zdolności transportowe badanych skał, których przepuszczalność jest bardzo niska (mediany <0,1 mD). Pomimo bardzo dobrej i dobrej porowatości, ekstremalnie niskie przepuszczalności wraz ze słabym potencjałem transportowym mikroszczelin nie pozwalają na zaklasyfikowanie tych skały do grupy skał zbiornikowych. Natomiast analizowane skały kredy górnej wraz z albem górnym mogą być rozważane jako poziom uszczelniający.

4.6 Podsumowanie

(Krzysztof Leszczyński, Kinga Bobek, Marek Jarosiński, Aleksandra Kozłowska, Grzegorz Leśniak[2], Joanna Roszkowska-Remin, Marek Szczerba[3])

Analizie została poddana węglanowa i węglanowo-krzemionkowa sekwencja górnej kredy (łącznie z albem górnym) w centralnej Polsce w 11 otworach wiertniczych niecki mogileńsko-uniejowskiej i niecki brzeżnej (płockiej): Banachów IG1, Gostynin IG1/1A, Gostynin IG4, Grudziądz IG1, Koło IG3, Koło IG4, Poddębice IG1, Poddębice PIG2, Polik IG1, Strzelno IG1 i Żychlin IG3. Wykonano następujące czynności:

- weryfikacyjne profilowania litologiczne oraz profilowania sedymentologiczne fragmentów rdzeni, oraz sporządzono ogólną charakterystykę litologiczną, stratygraficzną i sedymentologiczną sekwencji;

- kwerendę danych archiwalnych dotyczących węglanowości (zawartość $CaCO_3$), porowatości i przepuszczalności skał;

- badania petrograficzne, petrofizyczne (w tym badania mikroszczelinowatości skał) i XRD;

- profilowania podatności magnetycznej skał (ręcznym podatnościomierzem) oraz promieniowania gamma (spektrometrem polowym) celem identyfikacji m. in. zailonych przewarstwień oraz korelacji z profilowaniem gamma z geofizyki otworowej;

- profilowania strukturalne rdzeni.

Sukcesja węglanowa i węglanowo-krzemionkowa górnej kredy (łącznie z albem górnym) na obszarze centralnej Polski ma w analizowanych otworach wiertniczych miąższość od 510,5 m (Żychlin IG3) do 2159,5 m (Banachów IG1), a w niektórych strefach synklinalnych na pograniczu niecki mogileńskiej i niecki uniejowskiej przekracza 2500 m. Zmienność własności petrofizycznych i chemicznych skał w profilu kredy górnej jest przeważnie niewielka i na ogół obserwuje się bardzo stopniowe przejścia pomiędzy poszczególnymi litologicznymi typami skał. Podstawowe litofacje to: węglanowe (wapienie, wapienie margliste), iłowcowe (iłowce margliste, wapniste), mułowcowe (mułowce margliste), margliste (margle, margle ilaste), węglanowo-krzemionkowe (opoki, gezy), piaszczyste (piaskowce).

Skały kredy górnej wykazują zróżnicowane zailenie w profilu pionowym. Jednakże poza spągiem turonu w niecce mogileńsko-uniejowskiej, gdzie występują niewielkiej miąższości ciemnoszare i czarne iłowce o pokroju płytkowym z przewarstwieniami margli i opok, oraz górną częścią cenomanu w otworze Grudziądz IG1, gdzie stwierdzono serię ciemnoszarych iłowców marglistych, nie spotyka się miąższych przewarstwień iłowców, a laminacja ilasto-marglista jest nieliczna; raczej występuje smugowanie materiałem ilasto-marglistym.

Badania geologiczne, w tym głównie sejsmika refleksyjna, wskazują, że węglanowa i węglanowo-krzemionkowa sekwencja kredy górnej w Polsce centralnej nie jest intensywnie zuskokowana. Główne uskoki przebiegają w rejonie struktur solnych oraz w strefach związanych z synsedymentacyjnymi rowami tektonicznymi, które w późnej kredzie uległy inwersji: w strefie Gopła (na wschód od otworu Strzelno IG1) oraz w strefie Ponętów-Wartkowice-Poddębice (w rejonie

[2] Podwykonawca (INiG-PIB)
[3] Podwykonawca (IG PAN)

otworów Banachów IG1 – Koło IG4). Wszystkie te struktury tektoniczne zlokalizowane są po południowo-zachodniej stronie antyklinorium śródpolskiego, w nieckach mogileńskiej i uniejowskiej. Po stronie północno-wschodniej, w niecce płockiej, tektonika jest spokojniejsza.

Zawartość węglanu wapnia w skałach kredy górnej jest zmienna, na ogół dość wysoka i najczęściej zawiera się w przedziale 50-90%, ale występują także skały silnie margliste i zailone z zawartością węglanu wapnia poniżej 40%. Kompleksy o najwyższych zawartościach węglanu wapnia (wapienie pelityczne i organogeniczne/organodetrytyczne) występują w cenomanie oraz w turonie-koniaku dolnym. W otworach zlokalizowanych w niecce płockiej wartości powyżej 80% notowane są również w kampanie. Maksymalne pomierzone zawartości $CaCO_3$ wynoszą 92,8% dla białych wapieni z interwału koniak dolny-turon w otworze Gostynin IG1/1A oraz 92,2% dla wapieni cenomanu w otworze Grudziądz IG1. Zawartości węglanu wapnia nieco powyżej 90% stwierdzono również w cenomanie w otworze Koło IG3. Najniższe wartości notowane są w piaskowcach i iłowcach.

Analizowane skały jako mało perspektywiczne dla akumulacji węglowodorów, nie były obiektem szczegółowych oznaczeń parametrów porowatości i przepuszczalności. Zebrane dane archiwalne wskazują, że skały z otworów wiertniczych położonych w niecce brzeżnej wykazują generalnie nieco wyższe wartości porowatości. Wysoką porowatość i przepuszczalność mają też piaskowce santonu w otworze Poddębice PIG2 oraz wapienie kampanu w otworze Poddębice IG1. Wyjątkowo wysoką wartość przepuszczalności pomierzono w niecce łódzkiej w piaskowcu santońskim z otworu Poddębice PIG2 (7500 mD). Poza tym, wartości są stosunkowo wyrównane, a przepuszczalność w utworach węglanowych i węglanowo-krzemionkowych jest niska i zawiera się przeważnie w przedziale <0,10 – 0,32 mD. Ciężar objętościowy skał zawiera się w przedziale 1,52-2,69 g/cm^3, a najcięższymi skałami są zwięzłe i zbite wapienie pelityczne oraz niektóre odmiany opok.

Profilowania strukturalne rdzeni miały za zadanie określenie na ile kruche struktury tektoniczne w obrębie potencjalnie uszczelniających warstw kredy mogą przyczynić się do rozszczelnienia zbiorników w obrębie kompleksu kredowego.

Na antyklinie Poddębic i jej przedłużeniu ku NW, w najbardziej na N wysuniętych otworach - Strzelno IG-1 i Banachów IG-1 struktury ekstensyjne są nieliczne, a w pierwszym z tych otworów, w marglistych iłowcach cenomanu, występują jedynie nasunięcia. Struktury te nie sugerują tektonicznego rozszczelnienia kompleksu K2, choć pęknięcia technologiczne rdzenia wskazują na jego kruchość. W pozostałych otworach zaznacza się tendencja do występowania struktur ekstensyjnych - w górnych interwałach otworów, oraz braku tych struktur lub obecności struktur kompresyjnych - w dolnych interwałach. Spąg domen ekstensyjnych, w zależności od otworu, przebiega w turonie lub częściej - w koniaku. W obrębie domeny ekstensyjnej zaznacza się tendencja do występowania, płycej - stromych spękań ekstensyjnych, a głębiej - spękań i luster o charakterze ścięć grawitacyjnych. To zjawisko można wyjaśnić wzrostem S_v wraz ze wzrostem głębokości. Obserwacje te wskazują, że górne interwały K2 – najczęściej do koniaku – są rozszczelnione seryjnymi spękaniami stromymi. Niższe kompleksy nie noszą śladów takiego rozszczelnienia.

Wyniki analiz strukturalnych w otworze Pabianice-1 wykazały, że w kompleksie jurajskim zdecydowanie przeważają struktury kompresyjne reżimu TF z niskokątowymi nasunięciami i stylolitami z lineacją poziomą. Analizy geomechaniczne w tym otworze wykazały, że strefa uskokowa przedłużająca się w wysad Kłodawy, jest współcześnie reaktywowana przesuwczo. Jeżeli równoległa do niej strefa Poddębic jest również reaktywowana przesuwczo, to wówczas strome

spękania górnej kredy o odpowiedniej orientacji względem uskoków głównych podłoża mogą być rozwierane transtensyjnie.

W obrębie struktury Gostynina, tylko w jednym otworze (Żychlin IG-3), o krótkim profilu rdzeni (18 m) stwierdziliśmy grawitacyjne lustra tektoniczne mogące rozszczelnić profil cenomanu. W pozostałych otworach nie występują seryjne struktury tektoniczne mogące rozszczelnić kompleks K2. Talarki w utworach kampanu sugerują możliwość współczesnego zaciskania tektonicznego górnej części profilu kredy. Deficyt struktur tektonicznych przemawia za minimalnymi deformacjami tektonicznymi w K2.

W otworze Polik IG-1, mimo zaledwie 16 m analizowanego rdzenia, stwierdziliśmy występowanie licznych struktur ekstensyjnych w interwałach cenomanu i mastrychtu. Obserwacja ta przemawia za rozszczelnieniem strukturalnym sekwencji K2 powyżej albu.

W otworze Grudziądz IG-1 nie stwierdzono występowania seryjnych struktur tektonicznych. Występują natomiast pęknięcia technologiczne rdzenia: talarki (cenoman – turon) i różnokierunkowe pęknięcia o przełamie muszlowym (santon i kampan). Wskazują one na kruchość skały i sugerują relaksację współczesnych naprężeń poziomych w górę profilu.

W toku prac wykonano profilowania podatności magnetycznej i profilowania gamma na odcinkach rdzeni z wybranych otworów z Niżu Polskiego. Badania te miały na celu przetestowanie użyteczności powyższych profilowań do wyznaczenia przesunięć głębokościowych pomiędzy rdzeniem a głębokością geofizyczną, a także wyznaczenia interwałów o wyższym zaileniu, które stanowiłby dodatkowe uszczelnienia zbiorników pod magazyny solankowe.

Otrzymane wyniki z profilowania podatności magnetycznej wskazują na niewielką ich użyteczność w przypadku analiz dopasowań głębokościowych w skałach osadowych kredy i lokalnych zaileń.

Dzięki otrzymanym wynikom z profilowania polowym spektrometrem gamma udało się wyliczyć przesunięcia głębokościowe w odcinkach w 8 otworach wiertniczych. Wyniki korelacji pomiarów polowych do krzywej gamma wskazują na miejscami duże przesunięcia głębokościowe (np. w otworze Koło IG-3, czy Gostynin IG-4), które należy uwzględnić w przypadku interpretacji krzywych geofizyki wiertniczej w odniesieniu do pozyskanych z tych odcinków rdzenia wyników badań laboratoryjnych.

Ocena stopnia zailenia tylko na podstawie danych uzyskanych z pomiarów ręcznym spektrometrem gamma wydaje się być słabo wiarygodna ze względu na brak ciągłości pobieranego rdzenia, co uniemożliwia wybranie odpowiedniego punktu odniesienia względem zmian litologicznych. Pomiary spektrometrem na rdzeniu nie wskazały również wyższej wrażliwości na obecność cienkich przewarstwień ilastych niż krzywa uzyskana z geofizyki otworowej. Dlatego też, ocenę stopnia zailenia należy jednak opierać głównie na danych geofizycznych, skalibrowanych pomiarami zawartości poszczególnych minerałów (np. XRD), a pomiary spektrometrem wykorzystywać jedynie w celu wykonania dopasowania głębokościowego.

Badania petrofizyczne w 40 próbkach skalnych i analiza mikroszczelinowatości w 20 szlifach wskazują, że utwory kredy górnej i albu górnego, głównie wapienie, iłowce/mułowce wapniste, margle oraz opoki i gezy, charakteryzują się wysoką porowatością efektywną – około 20%. Jednakże przestrzeń porowa tych skał ma charakter mikroporowaty (dominuje frakcja <0,1 µm). Dla próbek iłowców-

mułowców-margli średnie wartości frakcji nanoporów sięgają 86%. Podobne wartości można zaobserwować dla próbek reprezentujących opoki (84%). Próbki wapieni poza silnie rozbudowanym systemem nanoporów (średnia 54%) posiadają również znaczący udział mikroporów (0,5-0,1um), którego średnie wartości sięgają 45%. We wszystkich badanych litotypach występuje wyraźny trend spadku porowatości wraz z głębokością. Rozbudowany system nanoporów znacznie obniża zdolności transportowe badanych skał, których przepuszczalność jest bardzo niska (mediany <0,1 mD).

Rozwartość obserwowanych mikroszczelin wynosi od 0,003 do 0,11 mm, a wartość średnia użyta do obliczeń wynosiła 0,007 mm. W części próbek zaobserwowano porowatość wtórną wzdłuż szczelin.

Pomimo bardzo dobrej i dobrej porowatości, bardzo niskie przepuszczalności wraz ze słabym potencjałem transportowym mikroszczelin nie pozwalają na zaklasyfikowanie tych skał do grupy skał zbiornikowych. Natomiast analizowane skały kredy górnej wraz z albem górnym mogą być rozważane jako poziom uszczelniający.

Należy, jednakże mieć na uwadze, że rozpuszczanie skał wapiennych polega na reakcji $CaCO_3$ z CO_2 i wodą. W wyniku tej reakcji powstaje rozpuszczalny wodorowęglan wapnia o wzorze $Ca(HCO_3)_2$, zgodnie z równaniem

$$CaCO_3 + CO_2 + H_2O \rightarrow Ca(HCO_3)_2$$

Dlatego też skały węglanowe w zasadzie nie są rekomendowane jako uszczelnienie dla składowania dwutlenku węgla. Jednak w przypadku sekwencji węglanowej i węglanowo-krzemionkowej górnej kredy mamy do czynienia z dużą jej miąższością, a ponadto w przestrzeni porowej mogą zachodzić inne reakcje, także wytrącanie związków chemicznych. Jeśli chodzi o magazynowanie innych substancji (np. gaz ziemny, wodór), sekwencję tę w centralnej Polsce można uznać za dość dobre uszczelnienie. W każdym przypadku rolę odgrywa miąższość tej sekwencji oraz obecność/lub nieobecność stref uskokowych.

5. Opracowanie kryteriów wyboru optymalnych lokalizacji magazynów/składowisk w strukturach solankowych i ranking przydatności struktur

5.1 Kryteria wyboru struktur solankowych

(Adam Wójcicki)

Przeanalizowano zinwentaryzowane w rozdziale **1.1** (Tabela 1-5) publikacje i dokumentacje pod kątem występowania w nich informacji na temat kryteriów wyboru optymalnych lokalizacji – struktur solankowych, odpowiednich dla magazynowania/składowania różnych substancji (tzn. magazynowania gazu ziemnego, wodoru, mieszanin wodoru i gazu ziemnego, sprężonego powietrza oraz składowania dwutlenku węgla).

Zestawiono, na podstawie tych informacji, tabelarycznie kryteria dotyczące magazynów gazu ziemnego, wodoru oraz mieszanin wodoru i gazu ziemnego, a także magazynów sprężonego powietrza oraz składowisk dwutlenku węgla (Tabela 5-1, Tabela 5-2 i Tabela 5-3). Zasadniczo są to kryteria charakteryzujące przydatność struktury jako potencjalnego magazynu/składowiska rozpatrywanej substancji, obejmujące parametry geometryczne (i pojemność), parametry kolektora i parametry uszczelnienia. Podano kryteria optymalne, charakteryzujące najbardziej pożądane własności rozpatrywanych struktur oraz kryteria graniczne, których niespełnienie zasadniczo dyskwalifikuje rozpatrywane struktury z dalszych rozważań. Należy przy tym nadmienić, że w przypadku struktur solankowych ich stopień rozpoznania może okazać się niewystarczający do wiarygodnego określenia, w oparciu o dostępne informacje, czy spełnione jest dane kryterium.

W przypadku potencjalnych składowisk dwutlenku węgla przyjęto zasadniczo kryteria stosowane w przedsięwzięciu „Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO_2 wraz z ich programem monitorowania" (Wójcicki i in., 2013), wykorzystujące w szczególności rekomendacje podręcznika najlepszych praktyk z projektów międzynarodowych SACS i CO_2STORE (Chadwick i in., 2008). Kryteria dla podziemnych magazynów gazu ziemnego (PMG) przyjęto zasadniczo za dokumentacją archiwalną (Górecki i in., 2004), przy czym są one podane tamże w dość ogólnej formie (w szczególności, jeśli chodzi o uszczelnienie), zaś oparte są one na bogatych doświadczeniach światowych w zakresie funkcjonujących PMG. Natomiast kryteria dla podziemnych magazynów wodoru przyjęto za raportem z projektu unijnego HYSTORIES (Bouteldja i in., 2021) i publikacją (Zivar i in., 2021) – kryteria te dotyczą także mieszanin wodoru z gazem ziemnym. Jak wspomniano w rozdziale **1.1** (Tabela 1-3) magazynów funkcjonujących (obecnie lub do niedawna) lub będących w trakcie uruchamiania magazynów wodoru oraz mieszanin wodoru z gazem ziemnym jest w Europie i na świecie stosunkowo niewiele i stąd kryteria te mają charakter orientacyjny. Kryteria dotyczące magazynowania sprężonego powietrza przyjęto za archiwalnym raportem (Allen i in., 1983).

Tabela 5-1 Kryteria wyboru – geometria (i pojemność)

Substancja/kryteria	Dwutlenek węgla (Wójcicki i in., 2013 na podstawie Chadwick et al., 2006, 2008)		Gaz ziemny (Górecki i in., 2004)		Wodór (+ CH_4, CO_2…) (Bouteldja et al., 2021; Zivar et al., 2021)		Sprężone powietrze (Allen i in., 1983)	
	optymalne	graniczne	optymalne	graniczne	optymalne	graniczne	optymalne	graniczne
Pojemność struktury	wyraźnie większa od całkowitej emisji CO_2 zakładu przemysłowego	zbliżona do całkowitej emisji CO_2 zakładu przemysłowego	>1 mld Nm3 gazu	0,1-1 mld Nm3 gazu	wyraźnie większa od aktualnego zapotrzebowania	b.d.	b.d.	30 mln Nm3 powietrza
Głębokość (strop)	>800m(faza nadkrytyczna),<=2500m	ok. 800m(faza ciekła), <=3000m(zależnie od własności zbiornikowych)	>300 m, <1600 m	>1600 m (struktury zamknięte/izolowane – przyjęto za CO_2 max. 2500m)	>500 m, <=2500 m (czysty wodór)	200-500 m (dotyczy zasadniczo mieszanin z przewagą gazu ziemnego na istniejących magazynach)	200-800 m	<1500 m
Amplituda struktury	b.d.	b.d.	>30 m	b.d.	>20 m	b.d.	b.d.	10 m
Miąższość kolektora	>30m	20-30m	>40m (piaskowce lub węglany o jak najniższym zaileniu)	20-40m	b.d. (należałoby przyjąć za gazem ziemnym?)(najlepiej piaskowce o jak najniższej zawartości siarczków, zwłaszcza pirytu i siarczanów, w tym anhydrytu)	>3 m (3-40 m?)	b.d.	10 m

Tabela 5-2 Kryteria wyboru – kolektor (zbiornik)

Substancja/kryteria	Dwutlenek węgla (Wójcicki i in., 2013 na podstawie Chadwick et al., 2006, 2008)		Gaz ziemny (Górecki i in., 2004)		Wodór (+ CH_4, CO_2…) (Bouteldja et al., 2021; Zivar et al., 2021)		Sprężone powietrze (Allen i in., 1983)	
	optymalne	graniczne	optymalne	graniczne	optymalne	graniczne	optymalne	graniczne
Porowatość kolektora	>20% (ośrodek porowy)	10-20% (może być nieco mniej niż 10% jeśli ośrodek szczelinowo-porowy)	>20% (ośrodek porowy)	10-20% (minimum 8% jeśli ośrodek szczelinowo-porowy)	b.d. (należałoby przyjąć za gazem ziemnym?)	piaskowce >10% (ośrodek porowy), węglany >5% (ośrodek szczelinowo-porowy)	>>10%	10%
Przepuszczalność kolektora	>300 mD (ośrodek porowy), >100 mD (porowo-szczelinowy)	10-100 mD (ośrodek szczelinowo-porowy)	>200 mD (ośrodek porowy)	50-200 mD (minimum 30-50 mD jeśli ośrodek szczelinowo-porowy)	b.d. (należałoby przyjąć za gazem ziemnym?)	piaskowce >50 mD (ośrodek porowy), węglany >10 mD (ośrodek szczelinowo-porowy)	>400 mD	300 mD
Zasolenie (mineralizacja)	>30 g/l (i potwierdzony brak kontaktu z użytkowymi wodami słodkimi)	10-30 g/l (wiemy z innych przesłanek, że kontakt z użytkowymi wodami słodkimi najprawdopodobniej nie ma miejsca)	b.d. (należałoby przyjąć za CO_2)	b.d. (należałoby przyjąć za CO_2)	b.d. (należałoby przyjąć za CO_2 i gazem ziemnym)	b.d. (należałoby przyjąć za CO_2 i gazem ziemnym)	b.d.	b.d.

Tabela 5-3 Kryteria wyboru – uszczelnienie

Substancja/kryteria	Dwutlenek węgla (Wójcicki i in., 2013 na podstawie Chadwick et al., 2006, 2008)		Gaz ziemny (Górecki i in., 2004)		Wodór (+ CH_4, CO_2…) (Bouteldja et al., 2021; Zivar et al., 2021)		Sprężone powietrze (Allen i in., 1983)	
	optymalne	graniczne	optymalne	graniczne	optymalne	graniczne	optymalne	graniczne
Jakość uszczelnienia	nadkład (podstawowe uszczelnienie) pozbawiony uskoków, nieprzepuszczalny, integralny, (preferowane iły, iłowce, sole, anhydryty), integralny), dodatkowe 1-2 uszczelnienia powyżej	wkładki piaskowców i przepuszczalnych mułowców; silnie zailone węglany i margle mogą stanowić w miarę dobre uszczelnienie jeśli mają bardzo niską przepuszczalność i odpowiednio dużą miąższość	nadkład (podstawowe uszczelnienie) pozbawiony uskoków, nieprzepuszczalny (preferowane iły, iłowce, sole, anhydryty), integralny	wkładki piaskowców i przepuszczalnych mułowców; silnie zailone węglany i margle mogą stanowić w miarę dobre uszczelnienie jeśli mają bardzo niską przepuszczalność	b.d. (należałoby przyjąć za gazem ziemnym?)	b.d. (należałoby przyjąć za gazem ziemnym?)	nadkład (podstawowe uszczelnienie) pozbawiony uskoków, nieprzepuszczalny, integralny,	b.d.
Miąższość nadkładu (podstawowe uszczelnienie)	>100 m	50-100 m	b.d. (należałoby przyjąć za CO_2)	b.d. (należałoby przyjąć za CO_2)	b.d. (należałoby przyjąć za CO_2 i gazem ziemnym)	b.d. (należałoby przyjąć za CO_2 i gazem ziemnym)	>10 m	6-10 m

Ciśnienie złożowe	ciśnienie kapilarne przebicia w podstawowym uszczelnieniu dużo wyższe niż efekt wyporności kolumny zatłoczonego CO_2 o maksymalnej przewidywanej wysokości	ciśnienie kapilarne przebicia w podstawowym uszczelnieniu zbliżone do efektu wyporności kolumny zatłoczonego CO_2 o maksymalnej przewidywanej wysokości	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	ciśnienie kapilarne przebicia (c.k.p.) w uszczelnieniu >6,6 MPa; ciśnienie zatłoczonego powietrza <<50% c.k.p.	ciśnienie kapilarne przebicia (c.k.p.) w uszczelnieniu 5,0 MPa; ciśnienie zatłoczonego powietrza 50% c.k.p.

5.1.1 Kryteria wyboru - podsumowanie

Jeśli chodzi o parametry geometryczne (i pojemności; Tabela 5-1) rozpatrywanych struktur to można zaobserwować tu zróżnicowanie, w zależności od substancji (dwutlenek węgla, gaz ziemny, wodór oraz mieszaniny wodoru i gazu ziemnego, sprężone powietrze), zwłaszcza jeśli chodzi o przedziały głębokości, w mniejszym stopniu miąższości kolektora. Parametry geometryczne wynikają z wymaganych pojemności magazynowych. Chociaż składowanie CO_2 może odbywać się nieco głębiej niż magazynowanie pozostałych substancji to jednak odnośne przedziały głębokościowe mogą się częściowo pokrywać. W tym przypadku największą gęstością w warunkach złożowych charakteryzuje się dwutlenek węgla (wysokogęstościowa faza nadkrytyczna, ewentualnie ciekła, na głębokości co najmniej 800 m, co odpowiada hydrostatycznemu ciśnieniu złożowemu rzędu 8 MPa), gęstość gazu ziemnego (Fig. 5-1) może być 3-9 mniejsza niż CO_2, gęstość wodoru 30-40 mniejsza (Fig. 5-2), a gęstość sprężonego powietrza (Fig. 5-3) o rząd wielkości mniejsza niż CO_2 w tych samych warunkach złożowych. Stąd w tej samej objętości przestrzeni porowych można odpowiednio mniej zmieścić danej substancji (masy). Ale i tak typowe wielkości dla magazynów gazu ziemnego, a zwłaszcza wodoru są nieporównywalnie mniejsze niż składowisk dwutlenku węgla.

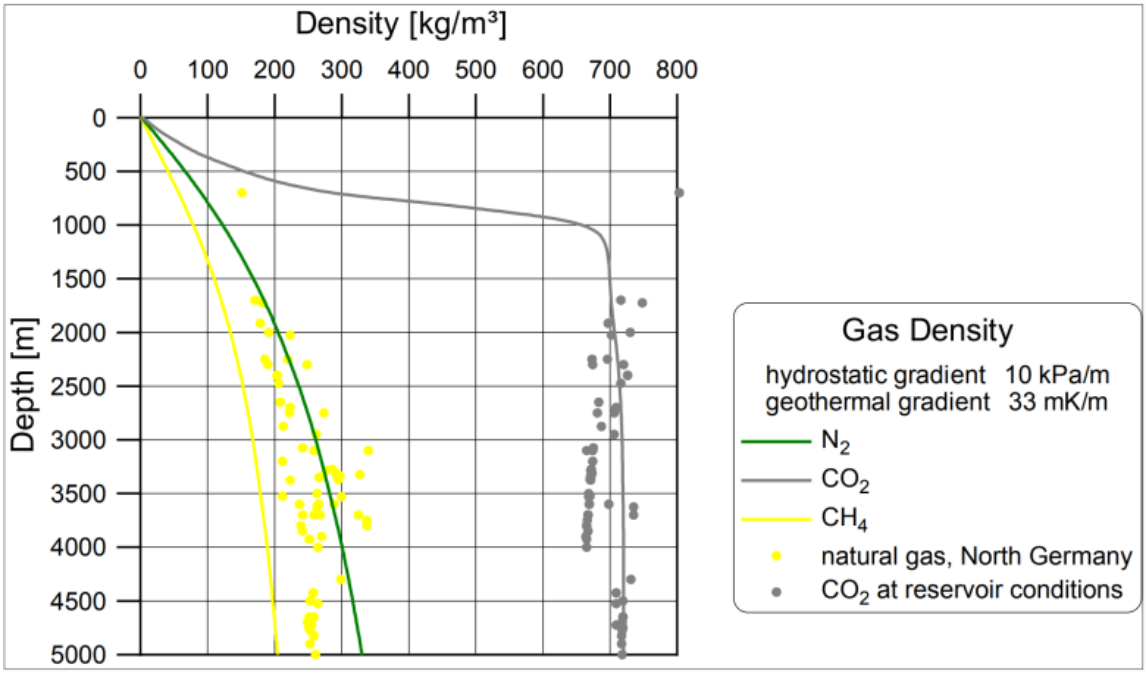


Fig. 5-1 Porównanie gęstości dwutlenku węgla i gazu ziemnego w warunkach złożowych (Schuppers i in., 2003)

Jeśli chodzi o własności kolektora to dla magazynowania wodoru niewskazana jest obecność minerałów, z którymi ten gaz reaguje i jest wiązany. Według najnowszych publikacji (Aslannezhad i in., 2003; Gholani, 2023), obecność znaczących zawartości pirytu w skałach zbiornikowych przewidzianych do magazynowania wodoru jest niewskazana dla głębiej występujących kolektorów (temperatura złożowa >90°C), niewskazana jest też znacząca zawartość anhydrytu i kalcytu, jak również wysoka mineralizacja solanki (>100 g/l) oraz obecność mikroorganizmów „konsumujących" wodór i kwasów organicznych (także kwasu węglowego). Natomiast porowatości kolektora są analogiczne dla poszczególnych substancji, podobnie przepuszczalności (tylko dla sprężonego powietrza wyższe; Tabela 5-2). Jeśli chodzi o jakość uszczelnienia (Tabela 5-3) to dla CO_2 i gazu ziemnego są analogiczne wymogi (z tym, że dla CO_2 preferowane są dodatkowe uszczelnienia w nadkładzie, a jeśli są węglany to miąższe), podobnie dla

sprężonego powietrza i zapewne też dla wodoru. Miąższość uszczelnienia jest porównywalna, za wyjątkiem sprężonego powietrza (wyraźnie niższa). Dopuszczalny wzrost ciśnienia wskutek zatłaczania poszczególnych substancji jest porównywalny (przy analogicznych masach).

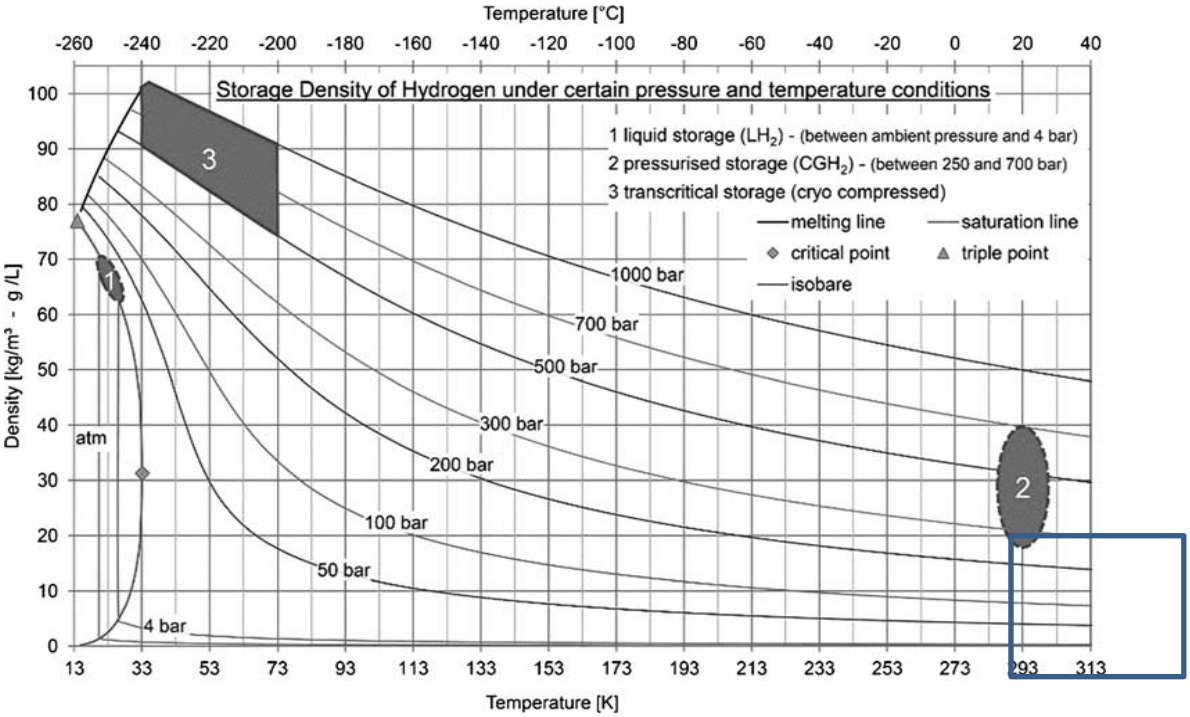


Fig. 5-2 Zależność gęstości wodoru od ciśnienia i temperatury (Taccani i in. 2020) – prostokąt w kolorze niebieskim odpowiada magazynowaniu w strukturach geologicznych w typowym przedziale głębokości, wymienionym w Tabeli 5-1

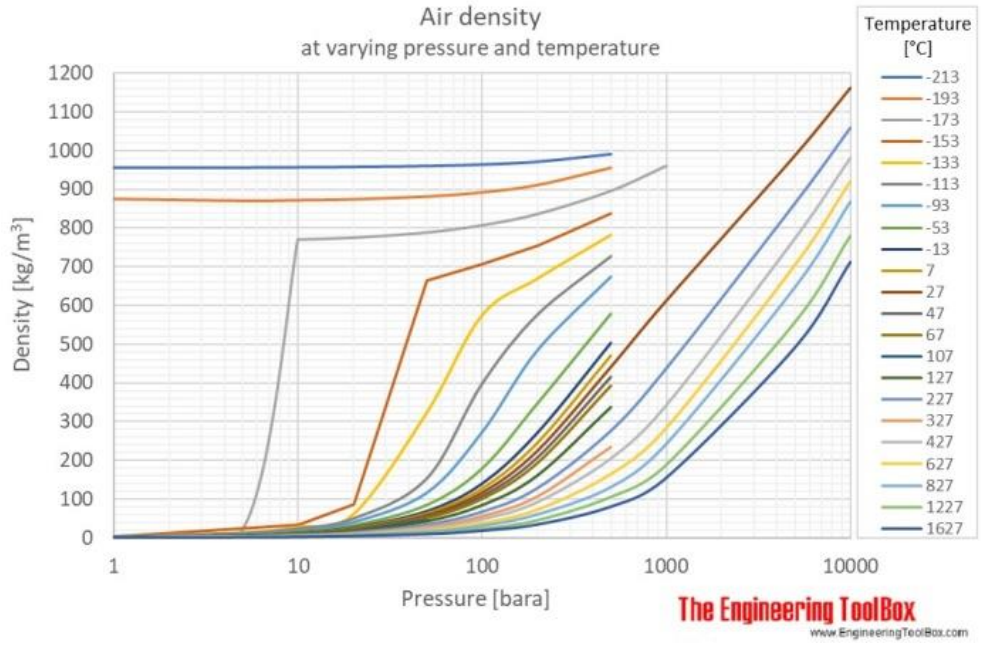


Fig. 5-3 Zależność gęstości powietrza od ciśnienia i temperatury (za www.EngineeringToolbox.com)

Podsumowując jako podstawę do rankingu w części dotyczącej parametrów złożowych przyjęto zasadniczo kryteria złożowe dla CO_2 (gdyż są one na ogół porównywalne lub ostrzejsze niż dla pozostałych substancji).

5.2 Kryteria rankingu struktur solankowych

(Adam Wójcicki)

Ranking dotyczył struktur spełniających przynajmniej odnoszące się do parametrów złożowych kryteria graniczne przedstawione wyżej (Tabela 5-1, Tabela 5-2 i Tabela 5-3).

Kryteria rankingu były ogólnie zdefiniowane w karcie niniejszego zadania, obejmując (m.in.) parametry złożowe z kryteriów wyboru, a także problematykę dostępności danych, wykonalności magazynowania/składowania oraz związanych z tym ewentualnych zagrożeń i konfliktów interesów w zakresie wykorzystania górotworu.

W ramach przedsięwzięcia „Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO_2 wraz z ich programem monitorowania" (Wójcicki i in., 2013) oraz nawiązującej do niego monografii IGSMiE PAN, tzn. jednego z partnerów konsorcjum realizujących to przedsięwzięcie, (Tarkowski, red., 2010) prowadzono takie rankingi dla struktur solankowych – potencjalnych składowisk dwutlenku węgla na obszarze Niżu Polskiego. Jednakże skupiono się tam, jeśli chodzi o wskaźniki rankingu, na parametrach złożowych, ponadto brano pod uwagę rozpoznanie struktury otworami i dostępność emitentów CO_2, zaś zagadnienia wykonalności składowania oraz ewentualnych zagrożeń i konfliktów interesów były tam generalnie analizowane jakościowo. Z kolei w niepublikowanej ekspertyzie wykonanej dla Ministerstwa Klimatu i Środowiska (Wójcicki i in., 2021), obejmującej m.in. weryfikację struktur z ww. przedsięwzięcia pod kątem dostępności nowych danych, został sporządzony ranking struktur solankowych odnoszący się do wszystkich tych zagadnień, lecz wykonano go w formie syntetycznej, z uwagi na krótkie ramy czasowe realizacji raportu. Natomiast w ramach innego przedsięwzięcia, dotyczącego PMG (Górecki i in., 2004) były typowane potencjalne magazyny gazu ziemnego w strukturach naftowych i solankowych, generalnie w oparciu o parametry złożowe, w mniejszym stopniu uwzględniono też wykonalność przedsięwzięcia (w tym dostępność infrastruktury przesyłowej gazu ziemnego).

Informacje te zostały wykorzystane do doprecyzowania kryteriów rankingu ogólnie zdefiniowanych w karcie niniejszego zadania, w tym do określenia wskaźników rankingu struktur solankowych.

Przyjęto w sumie 9 podstawowych kryteriów obejmujących od 1 do 4 zagadnień i odpowiadające im wskaźniki. (Tabela 5-4, Tabela 5-5 i Tabela 5-6). Dla tych 9 podstawowych kryteriów przyjęto trójstopniową punktację (3 – bardzo korzystne parametry, 2 – korzystne, 1 – mało korzystne), zaś w przypadku, gdy brak było danych nt. parametru przyjmowano 0 punktów. Suma punktów otrzymanych dla wszystkich 9 kryteriów dawała w rezultacie pozycję danej struktury w rankingu.

5.2.1 Charakterystyka kryteriów rankingu struktur solankowych

Kryteria rankingu zestawiono generalnie w trzech blokach tematycznych.

Pierwszy blok dotyczył dostępnych danych geologiczno-geofizycznych i warunków geologicznych (Tabela 5-4). W szczególności chodziło tu o informacje, ile profili sejsmicznych przecina daną strukturę, czy są to nowe czy stare profile, czy też ewentualnie na obszarze struktury wykonano sejsmikę 3D, ile otworów nawierca strukturę oraz jej bezpośrednie sąsiedztwo, czy są to nowe otwory z bogatymi danymi oraz jak gęste jest pokrycie pomiarami grawimetrycznymi i czy są to nowe, bardzo dokładne pomiary. Warunki geologiczne dotyczą charakterystyki kolektora (uszczelnienia są

analizowane w kolejnym bloku tematycznym), jego parametrów takich jak głębokość występowania, miąższość, porowatość i przepuszczalność, w tym na ile parametry te spełniają kryteria optymalne, czy też tylko graniczne jak to podają Tabela 5-1 i Tabela 5-2.

Tabela 5-4 Kryteria i wskaźniki rankingu struktur w zakresie dostępnych danych geologiczno-geofizycznych i warunków geologicznych kolektorów

					1		2				
l.p.	Nazwa	Województwo	Stratygrafia (fm zbiornikowe)	Powierzchnia struktury [km2]	Dostępne dane geol-geof (P - profile sejsm, O - otwory, G - grawimetria pkty/km2)	Punktacja 1	Warunki geologiczne (fm zbiornikowe)				Punktacja 2
							strop [m]	miąższość [m]	porowatość ef. [%]	przepuszczalność [mD]	

W drugim bloku, dotyczącym głównie zagadnień związanych z bezpieczeństwem składowania (Tabela 5-5) analizowany jest rozkład ciśnienia w kolektorze, na ile jego gradient jest wyższy (lub niższy) w stosunku do ciśnienia hydrostatycznego (Bojarski, red., 1996 oraz dokumentacje hydrogeologiczne z otworów wykonanych po 1996 roku), następnie pojemność magazynowania/składowania (objętość dostępnych przestrzeni porowych w obrębie struktury jaką mógłby zająć zatłaczany CO_2 lub inna substancja w warunkach złożowych przy określonym współczynniku efektywności i udziale wody nieredukowalnej w przestrzeni porowej kolektora – na podstawie Wójcicki i in., 2013). Kolejne kryterium dotyczy jakości i integralności uszczelnienia, w tym miąższości podstawowego uszczelnienia i ew. występowania dodatkowych warstw uszczelniających w nadkładzie, składu mineralno-petrograficznego (tzn. czy przeważają skały klastyczne ilaste, potencjalnie nieprzepuszczalne, jakie inne skały występują, w tym węglany mogące reagować z CO_2 rozpuszczonym w solance) oraz ewentualnego występowania uskoków przecinających kompleks uszczelniający, mogących stanowić drogi migracji płynów złożowych. Ostatnie kryterium w tym bloku dotyczy efektywności pułapkowania w tym, co najistotniejsze, możliwości ucieczki zatłoczonej substancji w kierunku pionowym (ewentualne zagrożenia dla użytkowych poziomów wodonośnych – określone pośrednio na podstawie typów genetycznych wód złożowych w kolektorze, tzn. czy są to wody reliktowe, czy infiltracyjne czy też pośrednie oraz ewentualnego występowania uskoków przecinających ten kompleks mogących stanowić drogi migracji płynów złożowych) jak również w kierunku poziomym (geometria kompleksu składowania na podstawie opracowań archiwalnych wymienionych w rozdziale **1.1**, Tabela 1-5 – w szczególności Razowska-Jaworek [w:] Wójcicki i in. (2013) i Tarkowski (red., 2010), oraz obrazu sekcji sejsmicznych dostępnych w zasobach PIG-PIB/NAG).

Tabela 5-5 Kryteria i wskaźniki rankingu struktur w zakresie bezpieczeństwa magazynowania/składowania

3		4		5				6		
Rozkład ciśnienia; gradient ciśnienia złożowego [MPa/10m]	Punktacja 3	Pojemność magaz/skład [mln m3]	Punktacja 4	Jakość i integralność uszczelnienia			Punktacja 5	Pułapkowanie - możliwości migracji		Punktacja 6
				miąższość [m]	skład miner-petro	uskoki		w pionie (1 - wysoka; 6 - brak)	w poziomie	

W trzecim bloku (Tabela 5-6) oceniana była dostępność (lub możliwości budowy) infrastruktury przesyłowej i odbiorczej dla danej substancji, w tym obecność tras gazociągów w obrębie lub bezpośrednim sąsiedztwie struktury oraz czy zlokalizowane w obrębie struktury otwory możliwe byłyby do wykorzystania. Kolejne kryterium dotyczyło zagrożeń dla użytkowych poziomów wodonośnych, w tym możliwości migracji płynów złożowych do wód użytkowych, zaś konflikty interesów dotyczyły występowania w obrębie lub bezpośrednim sąsiedztwie struktury obszarów ochrony przyrody, obszarów górniczych kopalin, w tym wód termalnych, wód leczniczych i solanek, a także lokalizacji zakładów geotermalnych.

Tabela 5-6 Kryteria i wskaźniki rankingu struktur w zakresie wykonalności ewentualnych zagrożeń i konfliktów interesów przy wykorzystaniu górotworu

7	Punktacja 7	8	Punktacja 8	9	Punktacja 9	Ranking (punktacja 1-9 sumarycznie)
Dostępność (ewentualnej) infrastruktury magazynu		Zagrożenia dla wód użytkowych		Konflikty interesów		

5.3 Analiza struktur, ranking i wybór struktur do dalszych analiz

(Adam Wójcicki, Anna Feldman-Olszewska, Anna Becker, Sylwia Kijewska, Krzysztof Leszczyński, Olga Rosowiecka, Lidia Razowska-Jaworek)

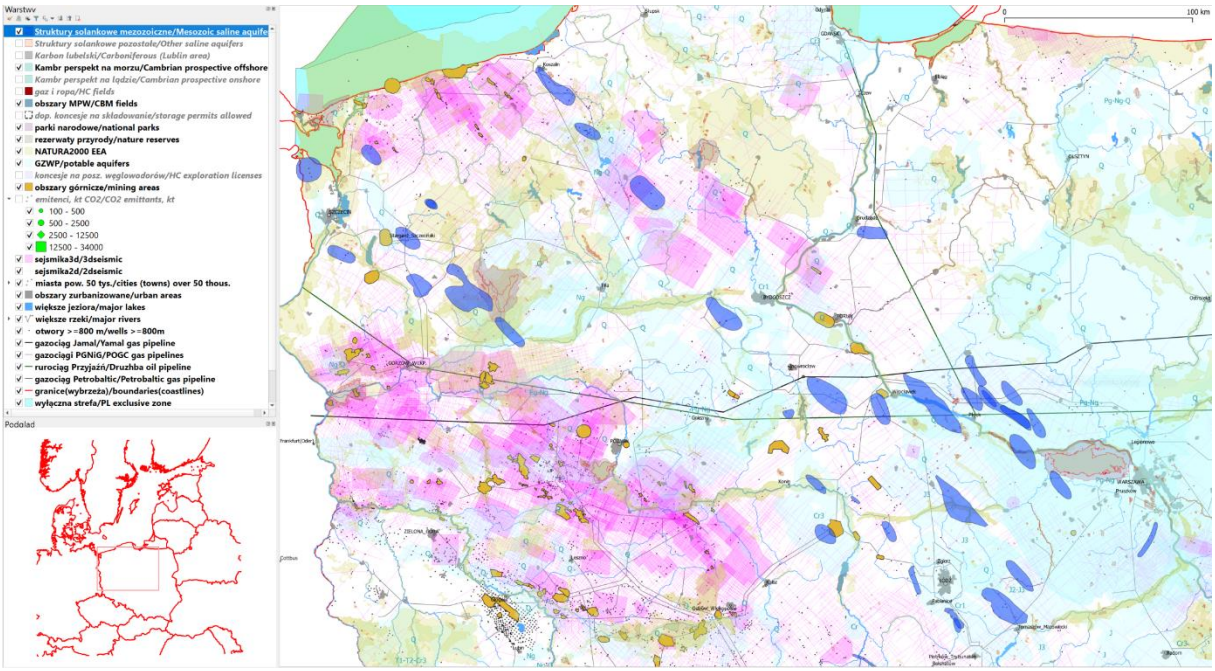


Fig. 5-4 Struktury mezozoiczne na obszarze Niżu Polskiego (zaznaczone kolorem ciemnoniebieskim)

5.3.1 Analiza danych dla struktur solankowych

Przyjęto do analiz wszystkie struktury solankowe w utworach kredy i jury na obszarze Niżu Polskiego zinwentaryzowane (patrz rozdział **1.1**) na podstawie wyników wcześniejszych przedsięwzięć finansowanych ze środków NFOŚiGW/publicznych. W sumie dało 47 struktur, w tym rekomendowane lub odrzucone we wcześniejszych opracowaniach jako potencjalne składowiska CO_2 lub magazyny gazu), dla których następnie, w oparciu o zestawione wyżej kryteria, prowadzono kwerendę i analizę materiałów archiwalnych pod kątem ich przydatności do magazynowania i składowania substancji.

Prowadzono analizę materiałów archiwalnych (w tym danych sedymentologicznych, złożowych, geofizycznych, hydrogeologicznych i hydrogeochemicznych) dla ww. 47 struktur solankowych (Fig. 5-4; niektóre z nich położone są w tej samej lokalizacji, lecz w obrębie różnych formacji geologicznych) pod kątem ich przydatności do magazynowania i składowania substancji.

Analiza danych sedymentologicznych polegała na weryfikacji i w miarę potrzeby aktualizacji lub uszczegółowieniu opracowanych w ramach przedsięwzięcia „Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO_2 wraz z ich programem monitorowania" (Feldman -Olszewska, Becker i Leszczyński [w:] Wójcicki i in., 2013) wydzieleń (korelacji międzyotworowych) kolektorów i uszczelnień dla formacji mezozoicznych w obrębie poszczególnych struktur solankowych.

Analogicznie analiza danych złożowych objęła weryfikację i w miarę potrzeby aktualizację odnośnych danych zgromadzonych w ramach ww. przedsięwzięcia. Analiza danych geofizycznych obejmowała przegląd i analizy dostępnych w zasobach PIG-PIB/NAG sekcji sejsmicznych przecinających

poszczególne struktury, odnośnych otworów oraz danych grawimetrycznych dostępnych na obszarach struktur.

Analiza danych hydrogeologicznych i hydrogeochemicznych polegała na weryfikacji i aktualizacji prac wykonanych w ramach ww. przedsięwzięcia (Razowska-Jaworek [w:] Wójcicki i in., 2013; gdzie takie prace zostały wykonane dla obszaru całej Polski) w zakresie charakterystyki warunków hydrogeologicznych i ewentualnych zagrożeń dla użytkowych poziomów wodonośnych na obszarach występowania struktur solankowych.

5.3.2 Ranking i wybór struktur solankowych do dalszych prac

W oparciu o powyższe informacje, odnoszące się do kryteriów i wskaźników rankingu (Tabela 5-4, Tabela 5-5 i Tabela 5-6) sporządzono tabelę charakteryzującą na potrzeby rankingu wszystkie 47 struktur (Tabela 5-7).

W ten sposób, na podstawie scharakteryzowanych wyżej (rozdział **5.2**) kryteriów rankingu struktur solankowych do magazynowania i składowania substancji (magazynowania gazu ziemnego, wodoru, mieszanin wodoru i gazu ziemnego, sprężonego powietrza oraz składowania dwutlenku węgla) oraz analiz zgromadzonych i opracowanych dla rozpatrywanych struktur materiałów archiwalnych dokonano oceny każdej ze struktur. Polegało to na tym, że po wprowadzeniu i analizie informacji dotyczących danej struktury dla każdego z 9 podstawowych kryteriów zastosowano trójstopniową punktację (3 – bardzo korzystne parametry, 2 – korzystne, 1 – mało korzystne), zaś w przypadku, gdy brak było danych nt. parametru przyjmowano 0 punktów. Suma punktów otrzymanych dla wszystkich 9 kryteriów dała w rezultacie pozycję danej struktury w rankingu.

W rezultacie wybrano trzy struktury w utworach jury (Wojszyce – stosunkowo nowe i bogate dane – oraz Konary i Budziszewice-Zaosie – dane archiwalne z ubiegłego wieku) oraz jedną w utworach kredy (Bielsk-Bodzanów – dane archiwalne z ubiegłego wieku) (Tabela 5-7).

Dla każdej z trzech wybranych struktur rozpoznanych archiwalnymi danymi sejsmicznymi z ubiegłego wieku, tzn. Budziszewic-Zaosia, Konar i Bielska-Bodzanowa (Fig. 5-5, Fig. 5-6, Fig. 5-7) wytypowano po 4 profile o niedostatecznej jakości obrazu sejsmicznego i uruchomiono stosowne procedury pozyskania niezbędnych danych polowych (Geofizyka Toruń S.A., Grupa Orlen PGNiG S.A.) na potrzeby reprocessingu danych sejsmicznych, zebrano niezbędne do tego celu dane z otworów wiertniczych zlokalizowanych na i w sąsiedztwie profili sejsmicznych (prędkości średnie, profilowania akustyczne geofizyki wiertniczej – pozyskano z Bazy CBDG, a wcześniej występowano o zgodę do Grupy Orlen PGNiG S.A. w przypadku danych, do których prawo posiada ta firma). Uruchomiono procedury zamówień publicznych na wykonanie prac kooperacyjnych w zakresie reprocessingu danych sejsmicznych, a wyłonionemu podwykonawcy przekazano niezbędne do realizacji prac materiały i uzgodniono z nim szczegółowo zakres i harmonogram prac. Wyniki prac kooperacyjnych w zakresie reprocessingu danych sejsmicznych zostały scharakteryzowane i przedyskutowane w rozdziale **6** niniejszego sprawozdania. Natomiast w rozdziale **7** przedstawiono kompleksową interpretację geologiczno-geofizyczną dla ww. trzech struktur oraz rozpoznanej (względnie) nową wysokorozdzielczą sejsmiką 2D i 1 nowym otworem, gdzie wykonano m.in. badania geomechaniczne (oraz kilkoma innymi otworami w jej bezpośrednim sąsiedztwie) struktury Wojszyce (Fig. 5-8).

Ponadto w rozdziale **5.4** scharakteryzowano wykonane następnie, w oparciu o wszelkie dostępne (w tym najnowsze) informacje, szczegółowe analizy dla obszaru Polski centralnej (Fig. 5-9)

obejmującego wytypowane 4 struktury solankowe w utworach jury i kredy, jak również rejon badań prowadzonych w rozdziale **4** dla utworów kredy (regionalnego uszczelnienia górnokredowego dla kolektorów w utworach kredy dolnej).

Tabela 5-7 Charakterystyka i ranking mezozoicznych struktur solankowych na obszarze Niżu Polskiego (struktury wytypowane podświetlono w kolorze jasnozielonym, zaś kolorem żółtym - nierekomendowane)

					1		2					3		4		5				6			7		8		9			
							Warunki geologiczne (fm zbiornikowe)									Jakość i integralność uszczelnienia				Pułapkowanie - możliwości migracji											
l. p.	Nazwa	Województwo	Stratygrafia (fm zbiornikowe)	Powierzchnia struktury [km2]	Dostępne dane geol-geof (P - profile sejsm, O - otwory, G - grawimetria pkty/km2)	Punktacja 1	strop [m]	miąższość [m]	porowatość ef. [%]	przepuszczalność [mD]	Punktacja 2	Rozkład ciśnienia; gradient ciśnienia złożowego [MPa/10 m]	Punktacja 3	Pojemność magaz/skład [mln m3]	Punktacja 4	miąższość [m]	skład miner-petro	uskoki	Punktacja 5	w pionie (1 - wysoka; 6 - brak)	w poziomie (1 - wysoka; 6 - brak)	Punktacja 6	Dostępność (ewentualnej) infrastruktury magazynu	Punktacja 7	Zagrożenia dla wód użytkowych (1 - wysokie, 6 - brak)	Punktacja 8	Konflikty interesów	Punktacja 9	Ranking (punktacja 1-9 sumarycznie)	Uwagi
1	Bielsk-Bodzanów	Mazowieckie	K1	100	P29; O6; G2	2	1011	128	30	1000	3	hydrostat; 0,094	3	346	3	127-169 m (K2 koniak1-santon)	opoki, margle	w spągu K1 i poniżej (tylko ponad strukturą jurajską Bodzanów)	2	3	3	2	trasy (3) rurociagów na strukturze; całkowicie zlikwidowane otwory z lat 1960-95	3	3	2	n.d.	3	23	utwory kredy górnej o miąższości rzędu 800-900 m obejmują wapienie, wapienie margliste, margle i opoki - ich przydatność jako uszczelnień zależy od zawartości krzemionki i minerałów ilastych oraz rozkładu mikroszczelin
2	Konary J	Kujawsko-Pomorskie	(J2aa1)&J1to3+pl3(s)	250	P23; O3; G1,5-2,5	3	847	160	15	300	2	hydrostat; 0,103	2	720	3	97,5-129,5 m (Jto1); 20-33 m (Jaa3); 25,5-117 m (Jbj3); 65-98,5 m (Jbt1,2)	iłowce, mułowce, wkładki piaskowców; iłowce, mułowce, wkładki piaskowców; iłowce, mułowce,	T3 (i głębiej) oraz J1/J2 przy E skraju struktury	2	4	4	2	trasa gazociągu na strukturze i rurociągu tuż przy strukturze; całkowicie zlikwidowane otwory z lat 1930-84	3	4	2	n.d.	3	22	w sąsiedztwie struktury cienki (~15 m) kolektor Jbj1, uszcz Jbj2
3	Wojszyce	Łódzkie	Jaa1+to3&Jpl3	260	P27; O7; G2-12(&4 profile)	3	969	200	20	300	3	hydrostat; 0,101	2	1248	3	375-519 m (Jaa3-bj3); wewn. 85,3-91,5 m (Jto1)	mułowce, iłowce, łupki ilasto-mułowcowe, wkładki piaskowców i dolomitów; mułowce, iłowce, heterolity, piaskowce	w szczycie struktury (strop T3) oraz na SW skraju	2	4	5	3	całkowicie zlikwidowane otwory z lat 1983-2012 w obrębie i bezpośrednim sąsiedztwie struktury; trasa gazociągu w sąsiedztwie struktury (~4,5 km)	2	4,5	2	nieduża część struktury pokryta obszarami chronionymi NATURA2000	2	22	8 nowych profili sejsm (2010); otwór Kaszewy zlikwidowany na płuczkę i korki cementowe odporne na korozję CO2; lokalnie kolektor w Jbj3 (Wojszyce IG-3 - 71 m, uszcz. Jbt1 - 155 m (słabe)), który jednak nie występuje w otworze Kaszewy 1 w pobliżu szczytu struktury
4	Sierpc K	Mazowieckie	K1	75	P10; O2; G1,5-2	2	1064	116	30	1000	3	hydrostat; 0,098	2	313	3	188-226 m (K2 koniak1-santon)	opoki, opoki mulaste, margle (lokalnie z krzemieniami)	w J3/J2 oraz T3 i głębiej	2	3	3	2	trasy (2) rurociągów na strukturze; całkowicie zlikwidowane otwory z lat 1961 i 72	3	3	2	na N sąsiaduje z obszarem miasta Sierpc	2	21	utwory kredy górnej o miąższości rzędu 840 m obejmują wapienie, wapienie margliste, margle, opoki i opoki mulaste-ich przydatność jako uszczelnień zależy od zawartości krzemionki i minerałów ilastych oraz

																														rozkładu mikroszczelin
5	Budzisze wice-Zaosie	Łódzkie	Jpl3&Js+h	217	P21; O7; G2(&2 profile)	3	775	53	15	300	2	hydrostat; 0,097	3	207	2	53-120 m (Jto1(Jpl3)) oraz 35-98 m (Jpl1) pomiędzy kolektora mi	mułowce (czasami wapniste), iłowce, wkładki piaskowcó w	na SW skraju w spągu J1 i poniżej	2	3	3	2	trasy (2) gazociągó w na strukturze; całkowicie zlikwidowa ne otwory z lat 1978-89 w obrębie i bezpośred nim sąsiedztwi e struktury	3	3	2	bardzo niewielki obszar struktury zajmują rezerwaty przyrody	2	21	kolektory Jto1 i Jaa1+to3 (łącznie 137 m, uszcz. Jaa3 ~50 m) w przedziale głębokości 505-653 m (Zaosie 1); kolektor Tp2 poniżej 3000 m - nie był brany pod uwagę; w sąsiedztwie na NW występuje płytka struktura Justynów-Gałków ek gdzie obecny jest w przedziale głębokości 280-421,4 m nierozdzielony kolektor Jaa1-to3 o dobrych własnościach zbiornikowych (uszcz. Jaa3-bj1 ~218 m) jednakże stwierdzono tam wody słodkie (do 0,5 g/l)
6	Kliczków J	Dolnośląskie	Jpl3	21	P18; O3; G2,5-3,5(&6 profili)	2	889 - 111 2	225	20	150	2	hydrostat; 0,096	3	85	1	112-115 m (Jto1)	łupki ilaste, iłowce, mułowce, wkładki piaskowcó w	ogranicza jące strukturę (rów Kliczkowa)	2	6	4	3	całkowicie zlikwidowa ne otwory z lat 1971-74	1	5	3	n.d.	3	20	w rejonie i (WSW) sąsiedztwie struktury obok kolektora Jpl3 (uszcz. Jto1/fm. ciechocińska) występuje (nierozdzielony) dobry kolektor Jbj1-Jto3 (~200-300 m; uszcz. Jbj3-bt1 ~87-143 m) w przedziale głębokości 528-675 m w najwyższej części (zależnie od otworu) gdzie jednakże występują wody słodkie, poniżej (w WSW sąsiedztwie struktury) kolektor Jpl3 (~40-72,5 m), uszcz. Jto1&pl3 (55-85 m); nieco dalej, w rejonie Kuźnicy Zagrzebskiej kolektor Jpl3 wystepuje bardzo płytko (310-400 m; uszcz. Jto1 i przystropowy Jpl3 ~98,5 m)
7	Konary T	Kujawsko-Pomorskie	T1 (Tp2-Tp2/Tp3)	250	P23; O3; G1,5-2,5	3	225 2	94,5	10	100	1	hydrostat; 0,11	1	263	2	135-182,5 m (Tp3); 27,5-55 m (Tm1)	iłowce, wapienie margliste, anhydryty, wkładki piaskowcó	w T3 i spągu J1 (i głębiej) oraz J2 przy E skraju	1	6	4	3	trasa gazociągu na strukturze i rurociągu tuż przy	3	5	3	n.d.	3	20	kolektory w obrębie Tp o raczej słabych własnościach zbiornikowych i miąższościach

																		w i wapieni; margle, wapienie margliste, wapienie, wkładki iłowców	struktury					strukturze; całkowicie zlikwidowane otwory z lat 1930-84							najwyżej kilka-kilkunaście m, składające się na podaną miąższość sumaryczną, przedzielane skałami iłowcowo-mułowcowymi (rzadko wapieniami); ponad kompleksem Tp cienki (~7 m) kolektor węglanowy w Tm1 (uszcz. wyższy Tm i Tk1); dodatkowy cienki kolektor piaskowcowy w Tk2d/Tk3 (~14 m, uszcz. Tk3 ~ 77 m)
8	Choszczno	Zachodniopomorskie	J1pl3+s+h	102	P12: O2; G2-2,5(&3 profile)	2	1235	168	20	1000	2	hydrostat; 0,1	2	411	3	61-81 m (Jto1); 53-63 m (Jk-(o))	łupki ilaste, iłowce, mułowce, wkładki piaskowców; mułowce, iłowce, margle	w dolnym P2	2	3	4	2	trasy (2) gazociągów na strukturze; całkowicie zlikwidowane otwory z roku 1960 w obrębie i bezpośrednim sąsiedztwie struktury	3	3,5	2	bardzo niewielka część struktury pokryta obszarem chronionym NATURA2000	2	20	
9	Dzierżanowo	Mazowieckie	K1	75	P8; O5; G1,5-2	2	939	122	20	1000	2	hydrostat; 0,095	3	165	2	do ~600 m (K2)	margle, wapienie margliste, iłowce	w J3 i głębiej	2	3	4	2	trasa rurociągu na strukturze; całkowicie zlikwidowane otwory z lat 1961-65	2	3,5	2	n.d.	3	20	utwory kredy górnej o miąższości rzędu 700 m obejmują głównie margle, wapienie margliste i wapienie - ich przydatność jako uszczelnień zależy od zawartości krzemionki i minerałów ilastych oraz rozkładu mikroszczelin; kolektor Jto3 (uszcz. Jaa3&bj) nierozpatrywany z uwagi na uskoki w tym kompleksie
10	Gostynin	Mazowieckie	Jaa1+to3&Jpl3+s+h	333	P12: O5; G1,5-2(&2 profile)	2	1820	91	20	100	2	hydrostat; 0,104	2	727	3	25-30 m (Jaa3(&bj1)); 79-134,5 m (Jbj3)	iłowce i mułowce; iłowce, i mułowce, wkładki piaskowców	w J2 oraz J1 (i głębiej) na SE od struktury	2	4	4	2	trasy (3) rurociągów na strukturze; całkowicie zlikwidowane otwory z lat 1961-85	3	4	2	niewielka część struktury pokryta obszarami chronionymi NATURA2000 oraz rezerwatami przyrody	2	20	
11	Kamionki J	Mazowieckie	Jaa1&to3	75	P23; O3; G1,5-2	2	2682	156,5	15	200	2	hydrostat; 0,104	2	194	2	45-52 m (Jaa3(+bj1))	iłowce, łupki ilaste i mułowce	w spagu K1 (i głębiej) przy NW skraju struktury i J1 przy NE skraju oraz w J2 i J1 (i głębiej) w	2	4	3	2	trasy (4) rurociągów na strukturze; całkowicie zlikwidowane otwory z lat 1972-87	3	3,5	2	n.d.	3	20	powyżej kolektora Jaa1&to3 występuje kolektor w Jbj3 (słabe uszcz. Jbt1), a poniżej, na głębokościach rzędu 3 km i większych -

																		obrębie struktury											kolektory w Jpl3 oraz Js+h
12	Kamionki K	Mazowieckie	K1	75	P23; O3; G1,5-2	2	1285	80	20	400	2	hydrostat-0,098	2	144	2	200-300 m (K2)	margle, opoki, wapienie margliste	w spagu K1 (i głębiej) przy NW skraju struktury i J1 przy NE skraju oraz w J2 i J1 (i głębiej) w obrębie struktury	2	3	2	2	trasy (4) rurociagów na strukturze; całkowicie zlikwidowane otwory z lat 1972-87	3	2,5	2	n.d.	3	20	utwory kredy górnej o miąższości rzędu 1070 m obejmują wapienie margliste, margle (miejscami zapiaszczone) i opoki - ich przydatność jako uszczelnień zależy od zawartości krzemionki i minerałów ilastych oraz rozkładu mikroszczelin
13	Rokita J	Zachodniopomorskie	J1s+h	72	P13(&3D) : O2	3	849	220	25	500	2	hydrostat; 0,101	2	475	3	53-63 m (Jpl1); 68-73 m (Jto1)	mułowce i iłowce miejscami wapniste i/lub dolomityczne, wkładki piaskowców, iłowce mułowcowe, iłowce margliste; iłowce, mułowce, wkładki piaskowców miejscami wapnistych i/lub dolomitycznych, iłowce mułowcowe, łupki ilaste	w J1 (i poniżej)	2	3	2	2	całkowicie zlikwidowane otwory z lat 1969 i 85; gazociag w sąsiedztwie struktury (~5 km)	2	2,5	2	bardzo niewielki obszar struktury zajmuje rezerwat przyrody	2	20	zdjęcia sejsm 3D na znacznej części obszaru; stosunkowo wysokie porowatości uszczelnień Jpl1 i Jto1 mogą sugerować obecność mikrospękań (tzn. jakość uszczelnień może być problematyczna); wyższy kolektor Jpl3 w przedziale głębokości 659-701 m (otwór Rokita IG-1) o miąższości 42 m, uszcz. Jto1 (72 m)
14	Bodzanów	Mazowieckie	J2aa1&to3	30	P11; O4; G2	2	2192	200	15	200	2	hydrostat; 0,101	2	108	2	12-25 m (Jaa3(+bj 1)) oraz 60 m (Jbj3)	iłowce, łupki ilaste, mułowce oraz łupki i mułowce ilaste	w spągu K1 i poniżej	2	4	3	2	trasa rurociągu na strukturze; całkowicie zlikwidowane otwory z lat 1960-89	2	3,5	2	n.d.	3	19	
15	Chabowo T	Zachodniopomorskie	T3(Tk2b)	87	P10: O3; G2-3,5	2	1395	50	18	200	2	hydrostat; 0,099	2	71	1	231.5 m (Tk2)	iłowce, miejscami mułowcowe, wtrącenia anhydrytu	brak?	2	4	5	3	całkowicie zlikwidowane otwory z lat 1988-89 w obrębie i bezpośrednim sąsiedztwie struktury	2	4,5	3	nieduża część struktury pokryta obszarami chronionymi NATURA2000	2	19	lokalnie cienki kolektor Tk1 o słabych własnościach zbiornikowych
16	Debrzno	Pomorskie	T1 (Tp2)	150	P92(&3D) : O4; G1,8(&2 profile)	3	1784	160	15	100	1	hydrostat; 0,098	2	324	3	175-220 m (1-3 kompleksy w Tk)	iłowce	w P2, spągu T1 (i głębiej) oraz w spągu T3 w WSW (dalszym) sąsiedztwie i J1 w ENE (bliższym)	2	6	3	2	całkowicie zlikwidowane otwory z lat 1977-93 w obrębie i bezpośrednim sąsiedztwie struktury	2	4,5	2	bardzo niewielka część struktury pokryta obszarami chronionymi NATURA2000	2	19	zdjęcie sejsm 3D w NW części; lokalnie kolektory w Tk3 (cienki, niedostatecznie uszczelniony) lub Tk2b (dobry)

																		sąsiedztwie struktury												
17	Lutomiersk	Łódzkie	Jpl3	36	P5; O5; G2-12	2	1997	230	15	150	2	hydrostat; 0,096	3	112	2	59-62 m (Jto1); 33,5-95 m (Jaa3(Jbj1)); 50,5-106,5 m (Jbj3); 25-53 m (Jbt)	zbite piaskowce i mułowce; zbite piaskowce, mułowce i łupki; zbite piaskowce, mułowce i łupki; zbite piaskowce z iłowcami i mułowce	uskoki ograniczające strukturę - na W do K2 (i głębiej), na E do spągu T3 (i głębiej)	1	4	3	2	całkowicie zlikwidowane otwory z lat 1969-71 w obrębie struktury i jej bezpośrednim sąsiedztwie; trasa gazociągu tuż przy strukturze	2	3,5	2	n.d.	3	19	1 nowy profil sejsm (2010); w obrębie struktury występują też płytsze, dość miąższe kolektory (Jto3-aa1 i Jbj - rozdzielony na S; miąższość sumaryczna rzędu 400 m, przedział głębokości 1477,5-1938 m - otwór Lutomiersk 2), które zostały odrzucone z uwagi na sąsiedztwo walnych stref tektonicznych i negatywne wskaźniki geochemiczne; uszczelnienia w J2 o zróżnicowanej miąższości i jakości
18	Marianowo J	Zachodniopomorskie	J1pl3+s+h	101,5	P15(&3D); O3; G1,9-3,5(&2-3 profile)	3	1436	72	20	1000	2	hydrostat; 0,101	2	175	2	200-276 m (Jto1-k/o)	iłowce, mułowce, wkładki piaskowców; mułowce, iłowce, łupki ilaste, wkładki piaskowców; piaskowce mułowcowe, mułowce, iłowce; osady mułowcowo-piaskowcowe	w P1 i T1? możliwe strefy zaburzeń ciągłości w J1 i J3 w osiowej części struktury	2	3	4	2	trasy (2) gazociągów na strukturze; całkowicie zlikwidowane otwory z lat 1989-91 w obrębie i bezpośrednim sąsiedztwie struktury	2	3,5	2	obszar górniczy geotermii Stargard w sasiedztwie struktury (~3 km); niewielka część struktury pokryta obszarami chronionymi NATURA2000	2	19	zdjęcie sejsm 3D; dodatkowe uszczelnienie stanowią utwory kredy górnej (wapienie margliste, margle, iłowce, opoki i mułowce), w tym kompleks o najkorzystniejszych własnościach uszczelniających mający miąższość rzędu 150 m - miało to być podstawowe uszczelnienie dla PMG planowanego w utworach dolnej kredy (piaskowce albu), jury górnej (piaskowce oksfordu) oraz jury dolnej (piaskowce pliensbachu - uszczelnienie utworami Jto1)
19	Marianowo T	Zachodniopomorskie	T3 (Tk2b)	101,5	P15(&3D); O3; G1,9-3,5(&2-3 profile)	3	2085	22	18,5	25	2	hydrostat; 0,102	2	40	1	199 m (Tk)	iłowce, miejscami mułowcowe, wtrącenia anhydrytu	w P1 i T1?	2	4	4	2	trasy (2) gazociągów na strukturze; całkowicie zlikwidowane otwory z lat 1989-91 w obrębie i	3	4	2	obszar górniczy geotermii Stargard w sasiedztwie struktury (~3 km); niewielka część struktury	2	19	zdjęcie sejsm 3D

																							bezpośrednim sąsiedztwie struktury				pokryta obszarami chronionymi NATURA2000			
20	Ponętów	Wielkopolskie	K1	8,3	P5; O2; G1,5	2	1475	50	23	200	2	hydrostat; 0,1	2	9	2	do ~1000 m (K2)	margle zailone, wapienie, margliste, iłowce margliste, opoki?	w K2 (i głębiej) ogranicza strukturę od W, analogiczny w dalszym sąsiedztwie na E	2	2.5	5	2	całkowicie zlikwidowane otwory z lat 1988 i 92 w obrębie struktury i jej bezpośrednim sąsiedztwie	2	22709,5	2	n.d.	3	19	proponowana na magazyn gazu (Górecki, 2004); utwory kredy górnej o miąższości rzędu 1400 m obejmują margle, wapienie margliste, margle zailone i iłowce margliste
21	Sierpc J	Mazowieckie	J1pl3+s+h	75	P10; O2; G1,5-2	2	2190	210	15	100	2	hydrostat; 0,1	2	203	2	do 78 m (Jto1)	iłowce, mułowce, wkładki piaskowców	w J3/J2 oraz T3 i głębiej	2	4	4	2	trasy (2) rurociągów na strukturze; całkowicie zlikwidowane otwory z lat 1961 i 72	3	4	2	na N sąsiaduje z obszarem miasta Sierpc	2	19	wyżej położony jest kolektor Jto3&aa1, ale nie ma odpowiedniego uszczelnienia
22	Sochacze w K	Mazowieckie	K1	85	P3; O4; G1,5	2	1165	108	30	1000	3	hydrostat; 0,1	2	330	3	do ~800 m (K2)	margle, wapienie margliste, iłowce	w J1/T3 (i głębiej)	2	3	3	2	całkowicie zlikwidowane otwory z lat 1972 i 74 w obrębie i bezpośrednim sąsiedztwie struktury, otwór geotermalny w sąsiedztwie (2018)	2	3	2	zakład geotermalny w sąsiedztwie (~2,5 km); na N struktura sięga otuliny Kampinoskiego Parku Narodowego	1	19	utwory kredy górnej o miąższości rzędu 950 m obejmują margle, wapienie, wapienie margliste i iłowce - ich przydatność jako uszczelnień zależy od zawartości krzemionki i minerałów ilastych oraz rozkładu mikroszczelin
23	Wartkowice	Łódzkie	K1	49,5	P6; O4; G1,5(&1 profil)	2	1076	104	20	100	2	hydrostat; 0,098	2	124	2	do ~600 m (K2 turon-santon)	opoki, margle, wapienie margliste	ograniczające strukturę od WSW i ENE, w K2/K1 (i głębiej), T3 (i głębiej)	2	2,5	5	2	całkowicie zlikwidowane otwory z lat 1970-73 w obrębie i bezpośrednim sąsiedztwie struktury	2	3,75	2	n.d.	3	19	utwory kredy górnej o miąższości rzędu 1100 m obejmują margle, opoki, wapienie, wapienie margliste oraz piaskowce i iłowce - ich przydatność jako uszczelnień zależy od zawartości krzemionki i minerałów ilastych oraz rozkładu mikroszczelin
24	Chabowo J	Zachodniopomorskie	J1pl3+s+h	87	P10: O3; G2-3,5	2	845	160	17	1000	2	hydrostat; 0,099	2	284	2	51-102,5 m (Jto1) oraz 42-49 m (w obrębie Jpl3)	iłowce, mułowce (czasami zapiaszczone), wkładki piaskowców	brak?	2	3	5	2	całkowicie zlikwidowane otwory z lat 1988-89 w obrębie i bezpośrednim sąsiedztwie struktury	2	4	2	nieduża część struktury pokryta obszarami chronionymi NATURA2000	2	18	wyższy kolektor Jto3 o miąższości ~44 m w przedziale głębokości 750-794 m (Chabowo 1) uszcz. Jbj-bt (~41 m)

25	Huta Szklana	Wielkopolskie/Lubuskie	J1pl3+s+h	97,5	P12; O3; G2(8 profili)	2	1308	237	21	200	2	hydrostat; 0,1	2	437	3	60-80 m (Jto1(&Jpl3)); 55-70 m (Jbt-o)	iłołupki, iłowce, wkładki piaskowców; mułowce (nierzadko zapiaszczone), iłowce, iłołupki, wkładki piaskowców	w T3 i głębiej na SW i NE skrajach struktury	2	4	3	2	całkowicie zlikwidowane otwory z lat 1966-69	2	3,5	2	znaczną część struktury pokrywają obszary chronione NATURA2000, na N otulina Drawieńskiego Parku Narodowego	1	18	kolektory w Tk3 (cienki, niedostatecznie uszczelniony) i Tk2b (dobry); uszczelnienia podstawowego kolektora o zmiennej jakości
26	Jeżów T	Łódzkie	T1 (Tp2-Tp2/Tp3)	98	P10; O1; G2-25,9(&2 profile)	1	2381	91	11	20	2	hydrostat; 0,112	1	388	3	158 m (Tp3); 324,5 m (Tm-Tk1)	iłowce, wapienie margliste, mułowce, dolomity, wkładki piaskowców; iłowce, mułowce, iłowce piaszczyste, wkładki piaskowców, piaskowce ilaste, wapienie, margle, dolomity, wkładki anhydrytów	w P2, w dolnej J2 i głębiej na SW od struktury	2	6	5	3	całkowicie zlikwidowany otwór z roku 1972; trasa gazociągu w sąsiedztwie struktury (~4 km)	1	5,5	3	bardzo niewielki obszar struktury zajmuje rezerwat przyrody	2	18	kolektor o raczej słabych własnościach zbiornikowych, poza ok. 7 m na pograniczu Tp2/Tp3 (lepsze); ponad kompleksem Tp cienki (~14 m) kolektor węglanowy w Tm1; W Tk dwa cienkie, kilkumetrowe kolektory piaskowcowe (uszcz. Tk2d/Tk3 ~56 m oraz bardziej miąższe pomiędzy kolektorami)
27	Strzelno	Kujawsko-Pomorskie	K1	24	P5; O3; G1,5(&1 profil)	2	1040	110,5	20	100	2	hydrostat; 0,098	2	64	1	do ~680 m (K2 turon-kampan)	opoki	w dolnej J2 (i głębiej)	2	2.5	5	2	trasa rurociągu na strukturze; całkowicie zlikwidowane otwory z lat 1965-71 w obrębie i bezpośrednim sąsiedztwie struktury	2	22709,5	2	część struktury pokryta obszarami chronionymi NATURA2000	3	18	utwory kredy górnej o miąższości rzędu 970 m obejmują opoki, gezy oraz wapienie margliste i margle - ich przydatność jako uszczelnień zależy od zawartości krzemionki i minerałów ilastych oraz rozkładu mikroszczelin
28	Suliszewo	Zachodniopomorskie/ Lubuskie	J1pl3+s+h	300	P35; O3; G1,9-2,5(&9 profili)	2	1293	127	22	1500	2	hydrostat; 0,1	2	1006	3	58-95 m ((pl3)-Jto1-(bt1)); 27,5-142 m (Jbt3-o)	iłołupki, iłowce, mułowce, wkładki piaskowców; mułowce, iłowce, wapienie mułowcowe, wkładki piaskowców	w dolnym P2	2	3	4	2	trasa rurociągu na skraju struktury; całkowicie zlikwidowane otwory z lat 1961 i 71 w obrębie struktury	2	3,5	2	prawie w całości pokryta obszarami chronionymi NATURA2000, obejmuje też na SE otulinę Drawieńskiego Parku Narodowego	1	18	Jto3 wraz Jbt1 i/lub przystropowym Jpl3 tworzą jeden kompleks uszczelniający o zróżnicowanej jakości; wyższy kompleks o zróżnicowanej miąższości, rozdzielony w otworze Radęcin-1; lokalnie (Pławno 1) 2 cienkie kolektory w Tk2b (ok. 19% por. i 70 mD przep., 7 i 15 m miąż.), uszcz. 218 m (wyższy Tk2)

29	Brześć Kujawski	Kujawsko-Pomorskie	(J2aa1&)J1to3+pl3(s)	122	P19; O4; G1,5-2,5	2	1047	348,5	17	300	2	hydrostat; 0,1	2	867	3	64-100 m (Jaa3&bj1), 214,5-292 m (Jbj3) oraz 53-59 m (Jbt1)	iłowce, łupki ilaste, mułowce (czasami zapiaszczone), łupki iłowcowo-mułowcowe, wkładki piaskowców	w spągu T1 oraz w spągu J1 na SW od struktury	2	3	2	1	trasy (2) rurociągów na strukturze; całkowicie zlikwidowane otwory z lat 1931-88 w obrębie i bezpośrednim sąsiedztwie struktury	3	2,5	1	na N sięga obszaru górniczego wód leczniczych (najwyższej jury)	1	17	wyższy kolektor Jbj3-bt1 (~92,5 m) o zróżnicowanych własnościach zbiornikowych w przedziale głębokości 590-682,5 m (Brześć Kuj. IG-1) uszczelniony kompleksem w Jbt (sumarycznie ~75 m, przedzielony warstwą piaskowca); w sąsiedztwie struktury na NNW (otwory Ciechocinek IG...) niewielka struktura z cienkim (~15 m) kolektorem Jbj1, uszcz Jbj2 (sumarycznie ~64 m, przedzielone warstwą piaskowca)
30	Sochacze w J	Mazowieckie	Jbj1&Jaa1+to3	85	P3; O4; G1,5	2	2240	150	20	300	2	hydrostat; 0,106	1	306	3	50-55 m (Jbj3); 33-55 m (Jbt1)	iłowce, mułowce, wkładki piaskowców; iłowce, mułowce, piaskowce	w J1/T3 (i głębiej)	2	4	4	2	całkowicie zlikwidowane otwory z lat 1972 i 74 w obrębie i bezpośrednim sąsiedztwie struktury, otwór geotermalny w sąsiedztwie (2018) i kolejny planowany	2	4	2	zakład geotermalny w sąsiedztwie (~2,5 km); na N struktura sięga otuliny Kampinoskiego Parku Narodowego	1	17	najwyższe uszczelnienie Jbt1 o zróżnicowanej jakości w poziomie, uszczelnienie Jaa3(bj1) nie zostało uwzględnione z uwagi na znikomą miąższość; poniżej rozpatrywanego kompleksu składowania występują też kolektory Jpl3, Js i Jh o miąższości sumarycznej rzędu 230 m, na głębokości poniżej 2500 m (uszcz. Jto1 o miąższości rzędu 86 m)
31	Szubin	Kujawsko-Pomorskie	T3(Tk3)	169,2	P7; O4; G1,9-2,5(3 profile)	2	576,5	16,5	26	800	2	hydrostat; 0,1	2	61	1	?? (Js1+h)	mułowce, piaskowce, iłowce	w T1 (i głębiej)	2	b.d.	4	2	trasa gazociągu na strukturze (i drugiego w sąsiedztwie); całkowicie zlikwidowane otwory z lat 1910-77 w obrębie struktury	2	4	2	niewielką część struktury pokrywają obszary chronione NATURA2000	2	17	Kolektor Tp3 dość cienki, na głębokości zbyt małej na składowanie CO2 - ew. magazynowanie innych substancji, ale nadkład uszczelniający jest raczej słabej jakości (znaczny udział piaskowców) - struktura nierekomendowana; w obrębie Tp2 występuje kolektor o małej miąższości i słabych własnościach zbiornikowych - (też) nie był brany pod uwagę

32	Tuszyn J	Łódzkie	Jaa1+to3&pl3	37	P6; O3; G2-12	2	2245	120	15	150	2	hydrostat; 0,094	3	60	1	35,5-43,5 m 87-117 m (Jaa3); (Jbj3); wewn. 68-78 m (Jto1(pl3))	łupki, wkładki piaskowców, iłowce, mułowce; mułowce, iłowce, wkładki piaskowców; łupki, iłowce, mułowce, wkładki piaskowców i piaskowców mułowcowych	ograniczające strukturę, w K1, J1 i T2 (i głębiej)	1	4	4	2	całkowicie zlikwidowane otwory z lat 1960-2010 w obrębie i bezpośrednim sąsiedztwie struktury; trasa gazociągu w bezpośrednim sąsiedztwie struktury (<0,5 km)	2	4	2	niewielką część struktury pokrywają obszary chronione - rezerwaty przyrody	2	17	3 nowe profile sejsm (2010); wyżej leżące kolektory w obrębie Jbj (przedzielone uszczelnieniem w Jbj3) o miąższości sumarycznej 230-260 m nie są rekomendowane z uwagi na tektonikę i niekorzystne wskaźniki geochemiczne (co nie jest jednak przesądzone); na SW od struktury, w rejonie otworów Bełchatów 8-11, występują (nierozdzielone) kolektory Jbj1+aa1+to3 (miąższość sum. 60-70 m; uszcz. Jbj2_Jbt1,2 - ok. 75 m) w przedziale głębokości 1440-1800 m (zależnie od otworu), zaś niżej kolektor Jpl3 (uszcz. Jto1+przystropowy Jpl3 ~92 m) - ten rejon/obiekt uznano za nieodpowiedni z uwagi na sąsiedztwo strefy tektonicznej (rowu bełchatowskiego); analogicznie odrzucono położony po drugiej stronie rowu bełchatowskiego rejon Gomunic (płytszy kolektor - Jbj1+to3 występuje w przedziale głębokości 567-760 m (uszcz. Jbj3 ~147 m); Jpl3 na ok. 800 m (uszcz. Jto1 ~120 m)) to stosunkowo cienki/słaby kolektor)

33	Wierzchowo	Zachodniopomorskie	T1 (Tp2)	160	P28; O14; G1,8-3,5(&3 profile)	2	2016	120	14	100	1	hydrostat; 0,102	2	242	2	172-182 m (Tk1-Tk2a); 56-292 m (Tk2c-Tk2d)	iłowce, mułowce, wkładki piaskowców i piaskowców dolomitycznych, dolomitów i anhydrytów; iłowce, iłowce wapnisto-dolomityczne, wkładki piaskowców dolomitycznych i dolomitów, dolomity ilaste	w J1 (i głębiej)	1	3,5	3	2	całkowicie zlikwidowane otwory z lat 1965-81 w obrębie struktury; trasa gazociągu na strukturze	2	3,25	2	część struktury pokryta obszarami chronionymi NATURA2000	3	17	najcieńsze uszczelnienie w obrębie Tk w otworze Wierzchowo-9 (praktycznie tylko Tk2d); uszczelnienie Tp3 występuje lokalnie na części obszaru struktury (miąższość ~60-100 m), dokładny zasięg nieznany; na większości obszaru struktury występuje kolektor Tk2b o miąższości 45-100 m (uszcz. Tk2c i/lub Tk2d, o miąższości 45-280 m); w obrębie J1: mułowce Jto2 (uszcz. Jbj3 ~54 m), piaskowce z wkładkami mułowców Jpl2 (uszcz. Jto1 ~75 m) oraz piaskowce Jh z węglem brunatnym (uszcz. Js ~66 m, cienkie wkładki piaskowców) o nieznanych parametrach zbiornikowych (warstwy w obrębie przedziału 1035-1707,5 m w otworze Wierzchowo 10)
34	Wyszogród K	Mazowieckie	K1	150	P4; O1; G1,5-2	1	1199	108	20	500	2	hydrostat; 0,098	2	292	2	do ~700 m (K2)	margle, wapienie, iłowce, mułowce	w T1/T2 (i głębiej)	2	b.d.	3	2	całkowicie zlikwidowany otwór z roku 1973	2	3	2	część struktury pokryta obszarami chronionymi NATURA2000 oraz rezerwatami przyrody	2	17	utwory kredy górnej o miąższości rzędu 1000 m obejmują margle, wapienie, iłowce, mułowce i piaskowce
35	Wyszogród J	Mazowieckie	Jbj1	150	P4; O1; G1,5-2	1	2304	100	15	200	2	hydrostat; 0,102	2	203	2	108 m (Jbj3-bt1)	iłowce, iłowce zapiaszczone, mułowce, wkładki piaskowców	w T1/T2 (i głębiej)	2	3	4	2	całkowicie zlikwidowany otwór z roku 1973	2	3,5	2	część struktury pokryta obszarami chronionymi NATURA2000 oraz rezerwatami przyrody	2	17	dane parametryczne tylko z 1 otworu
36	Żyrów	Mazowieckie	K1	40	P34; O3; G1,5-1,6	2	1183	40	30	100	2	hydrostat; 0,094	3	14	1	do ~500 m (K2)	margle, wapienie margliste, opoki	ograniczające strukturę sięgają K2 (i głębiej) - pow. z strefą dyslokacyjną Grójca	1	3,5	3	2	całkowicie zlikwidowane otwory z lat 1972-89 w obrębie i bezpośrednim sąsiedztwie struktury; trasa gazociągu w sąsiedztwie struktury	2	3,25	2	bardzo niewielką część struktury pokrywa obszar chroniony NATURA2000	2	17	16 nowych profili sejsm (2012); utwory kredy górnej o miąższości rzędu 1000 m obejmują wapienie, margle, wapienie margliste, iły, piaskowce, opoki i kredę piszącą; poniżej słaby kolektor Jpl-s na

																						(~2,5 km)							głębokości rzędu 2350 m uszcz. Jto1-pl3 (miąższ.~60-80 m)
37	Grudziądz	Kujawsko-Pomorskie	J1pl3+s	90,6	P14; O2; G1,5-2	2	1635	80	25	300	2	hydrostat; 0,105	2	217	2	23 m (Jto1)	iłowce i mułowce miejscami zapiaszczone, wkładki piaskowców	??	1	3	3	2	trasy (3) rurociągów na strukturze; otwór z roku 1987 dokumentujący wody termalne, a drugi (1972) zaadaptowany na ujęcie wody temalnej	3	3	2	zakład balneologiczny w obrębie struktury (wody termalne J1)	0	16	cienki kolektor Jto3 (~17 m), heterolity w Jbj3+bt1 (na przemian łupki, piaskowce, mułowce) o miąższości rzędu 26 m - ew. dodatkowe, słabe uszczelnienie podstawowego kolektora
38	Jeżów J	Łódzkie	Jpl3&Js+h	98	P10; O1; G2-25,9(&2 profile)	1	1012	156	15	400	2	hydrostat; 0,098	2	275	2	85 m (Jto1); 135 m (Jaa3)	heterolity w stropie, iłowce, mułowce, wkładki piaskowców; iłowce, iłowce mułowcowe	w P2, w dolnej J2 i głębiej na SW od struktury	2	3	4	2	całkowicie zlikwidowany otwór z roku 1972; trasa gazociągu w sąsiedztwie struktury (~4 km)	1	3,5	2	bardzo niewielki obszar struktury zajmuje rezerwat przyrody	2	16	kolektory Jbj1 (uszcz. Jbj2) oraz (dość dobry) Jaa1+to3 (262 m, uszcz. Jaa3) w przedziale głębokości 331-887 m (Jeżów IG-1); Jaa3 to dodatkowe uszczelnienie dla podstawowego kolektora
39	Koszalin	Zachodniopomorskie	T1 (Tp2)	70	P54; O7; G3,5(&3 profile)	2	1600	100	15	100	1	hydrostat; 0,098	2	126	2	302-354 m (Tp&Tk)	iłowce i mułowce, wkładki piaskowców	w rejonie otworu Grzybnica IG-1 uskoki sięgające K2, J1 oraz T2 (i głębiej)	1	4	3	2	trasy (2) rurociągów na strukturze; całkowicie zlikwidowane otwory z lat 1970-91	3	3,5	2	część struktury pokrywają obszary chronione NATURA2000 oraz (niewielkie) rezerwaty przyrody, na N obejmuje część miasta Koszalin	1	16	(Tp2) porowatości z analiz lab. 18-21%, przepuszcz. 54-190 mD; lokalnie cienki kolektor Tk2b; w jurze (otwór Grzybnica IG-1) piaskowce Jpl2 (uszcz. Jto1 i Jbj2 ~88 m) oraz piaskowce z wkładkami mułowców Jbt3-cl1 (uszcz. Jcl2-ox1 ~63 m, lokalnie o słabej jakości) - warstwy w przedziale głębokości 426,5-740 m o nieznanych własnościach zbiornikowych
40	Rokita T	Zachodniopomorskie	T1 (Tp2)	72	P13(&3D) : O2	3	1593	53	8	13	1	hydrostat; 0,104	2	0	0	48-100 m (Tk1-2)	margle, iłowce i mułowce margliste, wkładki piaskowców	w J1 (i poniżej)	2	4	4	2	całkowicie zlikwidowane otwory z lat 1969 i 85; gazociąg w sąsiedztwie struktury (~5 km)	2	4	2	bardzo niewielką część obszaru struktury zajmuje rezerwat przyrody	2	16	zdjęcia sejsm 3D na znacznej części obszaru; cienki (22-23 m) kolektor Tk3
41	Trzebież J	Zachodniopomorskie	J1pl3+s	137,5	P0; O3; G1-3,5	2	810	54	20	700	2	hydrostat; 0,096	3	178	2	72-86 m (Jto1(&pl3))	iłowce, iłołupki, mułowce, wkładki piaskowców	przy S skraju struktury - w dolnej K2 (i głębiej)	1	b.d.	3	2	całkowicie zlikwidowane otwory z lat 1965 i 66 w obrębie struktury	2	3	2	praktycznie w całości pokryta obszarami chronionymi NATURA2000	0	16	pomiędzy kolektorami Jpl3 i Js uszczelnienie wewn. Jpl1 o miąższości rzędu 28,5 m

42	Turek	Wielkopolskie	K1	84	P8; O3; G1,5	2	1210	82	20	100	2	hydrostat; 0,1	2	165	2	do ~700 m (K2)	margle, wapienie margliste, opoki	w T1/P2 (i głębiej)	2	2,5	2	2	trasy (2) rurociągów na strukturze; całkowicie zlikwidowane otwory z roku 1959 w obrębie struktury; otwór geotermalny (2019) i kolejny planowany	2	2,25	2	w obrębie struktury powstaje zakład geotermalny, a sama struktura częściowo pokrywa się z obszarem górniczym eksploatacji węgla brunatnego	0	16	utwory kredy górnej o miąższości rzędu 1200 m obejmują wapienie margliste, margle, wapienie i opoki
43	Tuszyn K	Łódzkie	K1	24	P4; O4; G2-12	2	737	95	25	1000	2	hydrostat; 0,095	3	51	1	do ~450 m (K2)	margle, wapienie margliste, margle ilaste	ograniczające strukturę, w K1, J1 i T2 (i głębiej)	1	1,5	3	1	całkowicie zlikwidowane otwory z lat 1960-68 w obrębie i bezpośrednim sąsiedztwie struktury; trasa gazociągu w sąsiedztwie struktury (~1,5 km)	2	2,25	1	n.d.	3	16	2 nowe profile sejsm (2010); utwory kredy górnej o miąższości 600-800 m obejmują margle, wapienie margliste, iły, margle ilaste i wapienie; obecność wód słodkich (<0,5 g/l) dyskwalifikuje ten kolektor
44	Trześniew	Wielkopolskie	K1	50	P2; O1; G1,5	1	1996	110,5	20	100	2	hydrostat; 0,097	2	133	2	do ~1000 m (K2)	margle, opoki, wapienie margliste	w T3-T1 (i głębiej)	2	b.d.	2	2	trasa gazociągu na strukturze; całkowicie zlikwidowany otwór z roku 1989 w obrębie struktury	2	2	2	praktycznie w całości pokryta obszarami chronionymi NATURA2000	0	15	utwory kredy górnej o miąższości 1966 m (otwór Trześniew 1) obejmują wapienie, wapienie margliste, margle i opoki
45	Oświno K	Zachodniopomorskie	K1	22	P3; O2; G2(&2 profile)	2	1285	62	20	150	2	hydrostat; 0,098	2	33	1	130 m (K2t)	opoki ilaste, iłowce margliste, margle mulaste	ograniczające strukturę sięgają od P2 do do J1 (NE) i K1/K2 (SW)	1	3	3	2	całkowicie zlikwidowane otwory z lat 1965 i 88 w obrębie struktury i jej bezpośrednim sąsiedztwie	2	3	2	w całości pokryta obszarami chronionymi NATURA2000	0	14	utwory kredy górnej o miąższości ponad 1000 m obejmują piaski/piaskowce, mułowce margliste/piaszczyste, opoki mulaste, opoki zwięzłe, margle mulaste, opoki ilaste lub zapiaszczone, iłowce margliste, wapienie, margle - w tym kompleks o najkorzystniejszych własnościach uszczelniających w dolnej części kompleksu, mający miąższość rzędu 130 m (Oświno IG-1)
46	Oświno J	Zachodniopomorskie	J2 (Jbt2-bj3)	22	P3; O2; G2(&2 profile)	2	2000	33,5	15	100	2	hydrostat; 0,101	2	20	1	166 m (Jbt3-o1)	mułowce, piaskowce mułowcowe, mułowce margliste, łupki mułowcowe, mułowce ilaste,	ograniczające strukturę sięgają od P2 do J1 (NE) i K1/K2 (SW)	1	3	3	2	całkowicie zlikwidowane otwory z lat 1965 i 88 w obrębie struktury i jej bezpośrednim sąsiedztwie	2	3	2	w całości pokryta obszarami chronionymi NATURA2000	0	14	głębiej występują także kolektory Jto3, Jpl3, Js i Jh (otwór Oświno IG-1 dowierca się tylko do stropu Jto1 - wnioskowanie oparto na sąsiednich otworach i profilach sejsmicznych) o

																												miąższości sumarycznej rzędu 300 m (uszcz. Jbj3 i Jto1)
47	Trzebież T	Zachodniopomorskie	T3 (Tk2b)	137,5	P0; O3; G1-3,5	2	1294	30	17	200	2	hydrostat; 0,1	2	84	1	202 m (Tk2c,d)	iłowce, mułowce, brekcja, wkładki gipsów i anhydrytów	przy S skraju struktury - w dolnej K2 (i głębiej)	1	b.d.	3	2	całkowicie zlikwidowane otwory z lat 1965 i 66 w obrębie struktury	2	3	2	praktycznie w całości pokryta obszarami chronionymi NATURA2000	0	14	kolektor stwierdzono tylko w otworze Trzebież-1 gdzie występuje też kolektor w spągu Tk1, zasięg w obrębie struktury nieznany
48	Koronowo-Wilcze T	Kujawsko-Pomorskie	T1 (Tp2)	402	P40; O3; G1,8-2,5(&4 profile)	2	1753	94	max. 19	<<10	0	hydrostat; 0,1	2	0	0	275,5 m (Tp1-Tm)	iłowce i mułowce (z wkładkami skał węglanowych), wkładki piaskowców, wapienie z iłowcami, margle, dolomity, anhydryty	w T3/T2 (i głębiej), miejscami do spągu J1	1	4	4	2	całkowicie zlikwidowane otwory z lat 1985 i 89 w obrębie struktury; trasa gazociągu w bliskim sąsiedztwie struktury (~1 km)	2	4	2	bardzo niewielki obszar struktury zajmuje rezerwat przyrody; w centrum struktury obszar miasta Koronowo	2	13	zdjęcie sejsm 3D na NW; piaskowce w Tp2 (i lokalnie w Tp3) silnie zailone lub jako cienkie wkładki
49	Nowa Wieś Wielkie	Kujawsko-Pomorskie	J1	84	P3; O0; G2,5	0	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	0	hydrostat; 0,099	2		0	b.d.	b.d.	b.d.	0	b.d.	3	1	trasa gazociągu w sąsiedztwie struktury (~3,5 km)	1	3	1	n.d.	3	8	brak informacji o parametrach zbiornikowych
50	Bielsk E	Mazowieckie	J2aa1&to3+pl3	74,4	P13; O0; G2	0					0	hydrostat? b.d.	0		0	j.w.?	j.w.?	??	0	b.d.	b.d.	0	trasy gazociągów na strukturze	2	b.d.	0	n.d.	3	5	brak informacji o parametrach zbiornikowych
51	Bielsk	Mazowieckie	J2aa1&to3+pl3	22	P18; O2; G2	2	2377	220	15	200	2	hydrostat; 0,1	2	87	2	40-59 m (Jaa3(+bj1)) oraz 30-55 m (Jbj3)	iłowce, łupki ilaste i mułowce oraz łupki i mułowce ilaste	w J1 i poniżej	2	4	4	2	trasy (2) gazociągów na strukturze; całkowicie zlikwidowane otwory z lat 1966 i 1995	3	4	2	n.d.	3	3	
					otwory na strukturze i w bezpośrednim sąsiedztwie nawiercające kompleks							*Bojarski, red., 1996 oraz dokumentacje (nowszych) otworów*								*typy genetyczne wód podziemnych (od infiltracyjnych po reliktowe) Razowska-Jaworek [w:] Wójcicki i in.2013 i rozdział 5.4*								

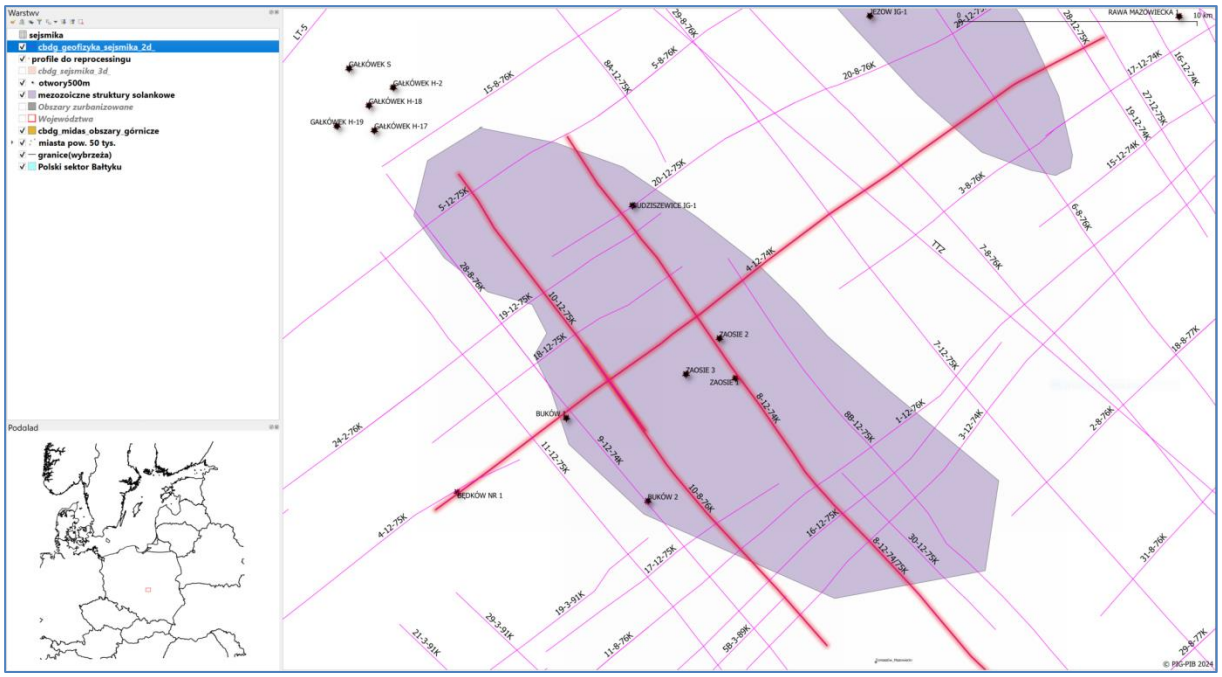


Fig. 5-5 Struktura Budziszewice-Zaosie w utworach jury (Wójcicki i in., 2013) – rozpoznanie archiwalną sejsmiką (w tym 4 profile wybrane do reprocessingu) i otworami

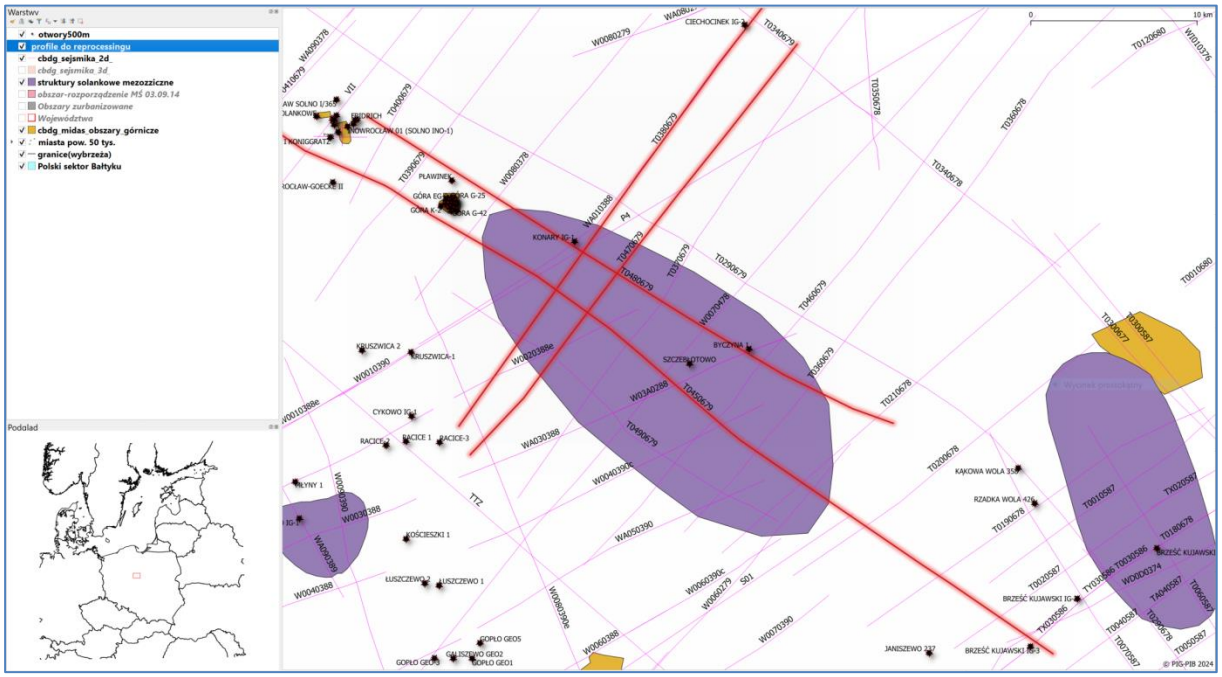


Fig. 5-6 Struktura Konary w utworach jury (Wójcicki i in., 2013) – rozpoznanie archiwalną sejsmiką (w tym 4 profile wybrane do reprocessingu) i otworami

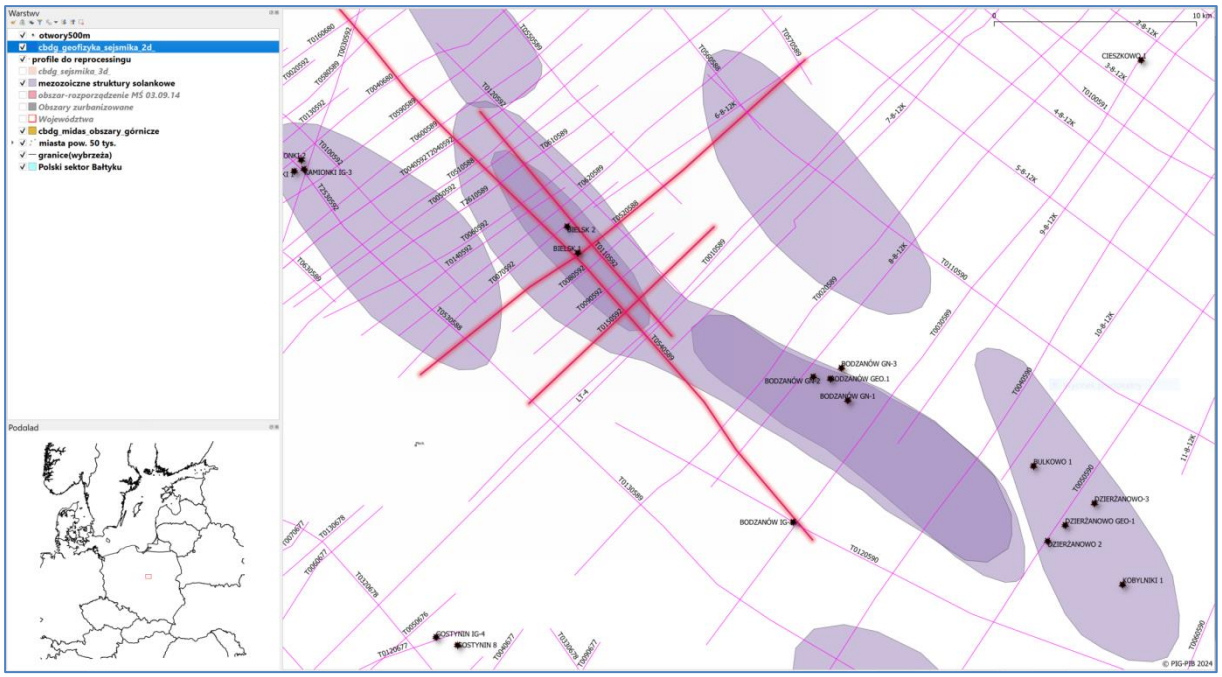


Fig. 5-7 Struktura Bielsk-Bodzanów w utworach kredy i jury (Wójcicki i in., 2013) – rozpoznanie archiwalną sejsmiką (w tym 4 profile wybrane do reprocessingu, przecinające kulminację Bielska) i otworami

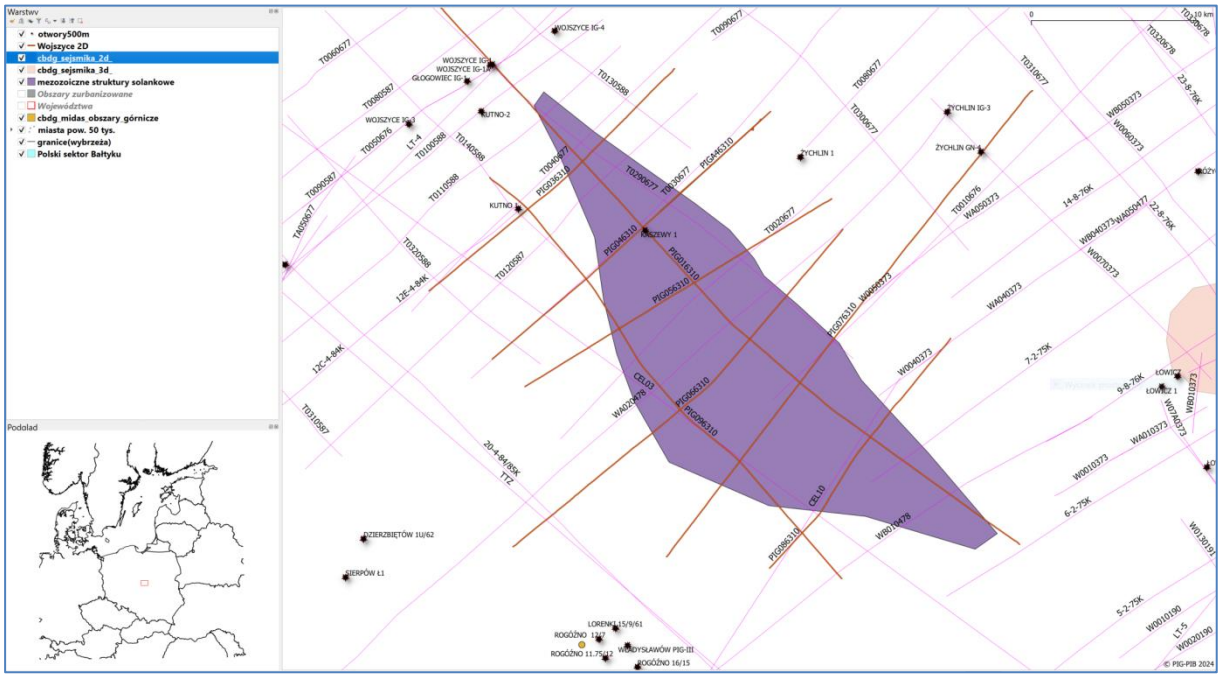


Fig. 5-8 Struktura Wojszyce w utworach jury (Wójcicki i in., 2013) – rozpoznanie nową wysokorozdzielczą i archiwalną sejsmiką i otworami (w tym 1 nowym, gdzie wykonano badania geomechaniczne)

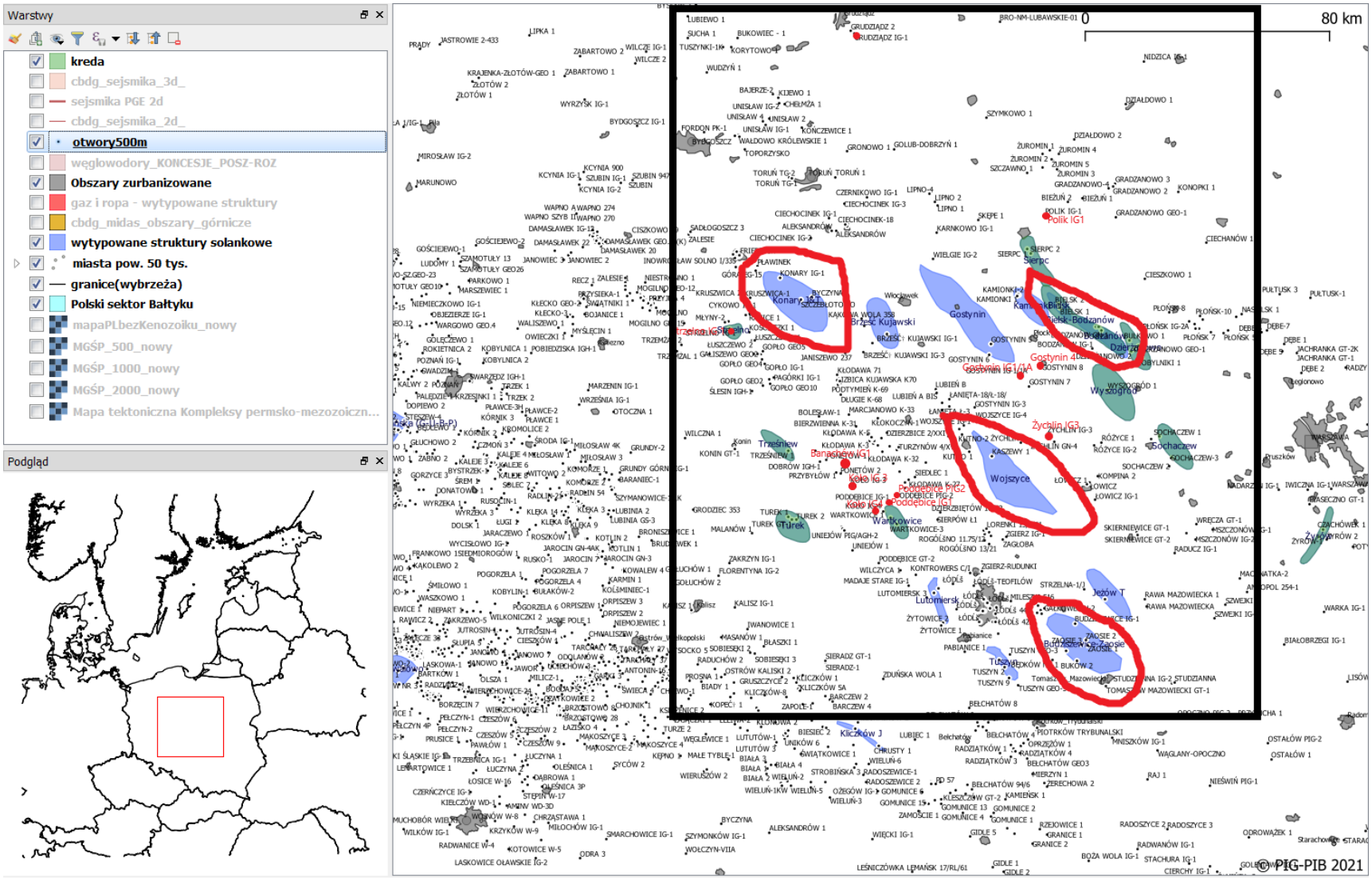


Fig. 5-9 Obszar Polski centralnej obejmujący wytypowane 4 struktury solankowe w utworach jury i kredy (zakreślone na czerwono), jak również rejon badań prowadzonych w rozdziale 4 dla utworów kredy z zaznaczonymi (kolorem czerwonym) 11 otworami reperowymi

5.4 Analiza danych hydrogeologicznych i hydrogeochemicznych na obszarach występowania struktur solankowych w Polsce centralnej

(Lidia Razowska-Jaworek)

5.4.1 Warunki hydrogeologiczne w nadkładzie potencjalnego kompleksu magazynowania/składowania

(Lidia Razowska-Jaworek)

5.4.1.1 Regionalizacja hydrogeologiczna

Według uproszczonej regionalizacji zwykłych wód podziemnych Polski (Paczyński i Sadurski, 2007), omawiany obszar położony jest w obrębie dwóch prowincji: Wisły oraz Odry (Fig. 5-10). W obrębie prowincji Wisły obszar analiz znajduje się w regionach: dolnej Wisły, środkowej Wisły oraz fragmentarycznie w obrębie regionu Narwi, Pregoły i Niemna. W obrębie prowincji Odry analizowany obszar znajduje się w regionach: Warty oraz fragmentarycznie w regionie środkowej Odry.



Fig. 5-10 Lokalizacja obszaru badań (patrz Fig. 5-9) na tle regionalizacji zwykłych wód podziemnych (za Paczyński i Sadurski, 2007)

W Regionie dolnej Wisły wyróżnia się cztery piętra wodonośne, stanowiące nadkład (głębiej występujących) skał zbiornikowych, które mogą potencjalnie posłużyć do magazynowania substancji. Są to piętra: czwartorzędowe, neogeńskie, paleogeńskie oraz kredowe. Piętra wodonośne charakteryzują się rożnym rozprzestrzenieniem i nie tworzą ciągłej warstwy. W profilu czwartorzędu występują osady wszystkich zlodowaceń plejstoceńskich, których zasięgi objęły obszar Polski, oraz utwory holoceńskie. Utwory zlodowaceń rozdzielone są osadami pochodzącymi z okresów interglacjalnych. Piętro holoceńsko – plejstoceńskie rozdzielić można lokalnie na kilka poziomów wodonośnych (conajmniej na górny, środkowy i dolny). Poziom górny związany jest głównie z utworami sandrowymi najmłodszego zlodowacenia, poziom środkowy i dolny występuje w piaskach i żwirach fluwioglacjalnych różnego wieku. Miąższość tych osadów jest bardzo zróżnicowana. W czwartorzędowym piętrze wodonośnym zwierciadło wody występuje pod ciśnieniem subartezyjskim lub zachowuje charakter swobodny.

Piętra neogeńskie i paleogeńskie w regionie dolnej Wisły występują wyspowo w miejscach zagłębień podłoża mioceńskiego, w piaskach drobnoziarnistych zanieczyszczonych pyłem węgla brunatnego. Mioceński poziom wodonośny występuje na większej części badanego regionu. Skład chemiczny wód podziemnych występujących w utworach plejstocenu, neogenu i paleogenu jest zbliżony. Są to wody zwykłe, charakterystyczne dla młodoglacjalnych rejonów pojeziernych Polski północnej, najczęściej typu HCO_3–Ca i HCO_3–Ca–Mg, słabo zmineralizowane.

W obrębie piętra kredowego rozróżnia się poziom: górny i dolny. Poziom dolny związany jest z serią piasków glaukonitowych, a górny z serią węglanowo – krzemionkową. Dolny poziom kredowy jest bardzo zasobny i tworzy w wielu regionach główny użytkowy poziom wodonośny (geolog.pgi.gov.pl; KZGW; Paczyński i Sadurski, 2007).

Na obszarze Regionu środkowej Wisły najbardziej rozprzestrzenione jest plejstoceńskie piętro wodonośne. W znacznej części regionu występuje nieprzerwanie na całym terenie. Poziomy wodonośne występują w trzech typach struktur: dolinach rzek, strukturach piaszczysto-żwirowych o zasięgach regionalnych, wodonośnych strukturach dolin kopalnych. W dolinach rzek najczęściej występuje jeden płytki, o głębokości kilkunastu metrów, poziom wodonośny o zwierciadle swobodnym. Ten poziom wodonośny generalnie pozbawiony jest izolacji od powierzchni. Fluwioglacjalne struktury piaszczysto-żwirowe występujące wśród glin zwałowych dominują obszarowo i są najczęściej eksploatowanymi poziomami wodonośnymi. Czwartorzędowe piętro wodonośne charakteryzuje się piętrowością osadów wodonośnych, związanych z akumulacją wodnolodowcową i bardzo dobrymi parametrami hydrogeologicznymi, takimi jak wodoprzepuszczalność i wydajność potencjalna studni. Neogeńsko – paleogeńskie piętro wodonośne związane jest z osadami piaszczystymi miocenu i oligocenu. Poziomy te są rozdzielone mułkami i iłami, ale występują również w kontakcie hydraulicznym. Piętro to jest szeroko rozprzestrzenione na obszarze regionu wodnego Środkowej Wisły. Miocen jako użytkowy poziom wodonośny ma znaczenie lokalne ze względu na gorsze parametry hydrogeologiczne, częściej ujmowany jest poziom oligoceński. Wody w utworach oligocenu, w zależności od morfologii powierzchni terenu, mają charakter artezyjski lub subartezyjski. Kredowo-paleoceńskie piętro wodonośne występuje w znacznej części regionu. Utwory szczelinowe tego piętra mają łączną miąższość 600–730 m, a zawodniona jest ich górna część (geolog.pgi.gov.pl; KZGW; Paczyński i Sadurski, 2007).

W obrębie Regionu Narwi, Pregoły i Niemna wyróżnia się dwa piętra wodonośne użytkowe: czwartorzędowe i paleogeńsko-neogeńskie. W obrębie czwartorzędowego piętra wodonośnego wyodrębniono trzy poziomy wodonośne o nieciągłym rozprzestrzenieniu, rozdzielone utworami słabo przepuszczalnymi. Zalegające niżej poziomy wodonośne zasilane są poprzez przesączanie wód przez utwory trudnoprzepuszczalne poziomu izolującego lub bezpośrednio z wyżej ległego poziomu. Piętro paleogeńsko-neogeńskie charakteryzuje się brakiem ciągłości w obrębie całej jednostki, wykazuje znaczne zróżnicowanie pod względem głębokości występowania i miąższości warstw (geolog.pgi.gov.pl; KZGW; Paczyński i Sadurski, 2007).

W Regionie Warty wody podziemne zwykłe o mineralizacji do 1 g/l mogą występować do głębokości około 800 m, zazwyczaj jednak do 200–300 m. Ze względu na strukturę geologiczną wody podziemne tworzą wielopoziomowe zbiorniki w utworach kenozoicznych i mezozoicznych. Na przedmiotowym obszarze regionu można wyróżnić piętro wodonośne czwartorzędowe, paleogeńsko-neogeńskie, kredowe, jurajskie, triasowe i paleozoiczne (dewon).

Czwartorzędowe piętro wodonośne występuje na całym obszarze regionu. Wodonośne są piaski różnoziarniste i żwiry z różnowiekowych struktur dolin rzecznych, dolin kopalnych, poziomów fluwioglacjalnych powierzchniowych i kopalnych (poziomy międzyglinowe), rynien lodowcowych i innych drobnych form lodowcowych. Liczba i miąższość poziomów wodonośnych oraz ich zasięg przestrzenny związane są z zasięgiem kolejnych zlodowaceń.

Paleogeńsko-neogeńskie piętro wodonośne jest związane z seriami piasków, przeważnie drobnoziarnistych, miocenu i oligocenu, porozdzielanych warstwami mułkowo-ilastymi i węglowymi. Tworzą one makrostrukturę basenu wód subartezyjskich, wśród których wyróżnia się dwa poziomy wodonośne: mioceński i oligoceński. Podstawowe znaczenie w regionie ma poziom mioceński. Formację pokrywową basenu stanowi zespół osadów ilastych i ilasto-mułkowych warstw poznańskich górnego miocenu i pliocenu, w których lokalnie występują piaszczyste soczewy wodonośne.

Chemizm wód podziemnych w subregionie Warty nizinnym kształtowany jest w wyniku naturalnych i wzbudzonych antropogenicznie czynników i procesów hydrogeochemicznych. Wpływ antropopresji zaznacza się głównie w obrębie czwartorzędowego piętra wodonośnego, a także pięter kredowego i jurajskiego, tam gdzie są one słabo izolowane młodszymi utworami. Najmniej korzystną jakością charakteryzują się wody piętra czwartorzędowego. Wykazują one bowiem najwyższe w stosunku do pozostałych pięter stężenia manganu i żelaza oraz wysoką twardość. Chemizm wód piętra neogeńsko-paleogeńskiego jest bardzo zróżnicowany. Wpływ na to mają głównie dopływy wód zasolonych z podłoża mezozoicznego oraz dopływ wód przesączających się z piętra czwartorzędowego w strefach zasilania (Dąbrowski i in., 2005; geolog.pgi.gov.pl; Paczyński i Sadurski, 2007; Przytuła i in., 2013).

W obrębie Regionu środkowej Odry wyróżniono piętro wodonośne czwartorzędowe i neogeńskie. Zasilanie wód podziemnych piętra czwartorzędowego zachodzi głównie na drodze bezpośredniej infiltracji opadów do warstwy wodonośnej bądź poprzez nadkład utworów słabo przepuszczalnych. Zasilanie piętra neogeńskiego odbywa się na drodze przesączania z wyżej ległych poziomów czwartorzędowych lub w wyniku bezpośredniej infiltracji opadów z powierzchni terenu. Poziom ten charakteryzuje się zmienną i zróżnicowaną odnawialnością (geolog.pgi.gov.pl; Paczyński i Sadurski, 2007; Przytuła i in., 2013).

5.4.1.2 Jednolite części wód podziemnych i Główne Zbiorniki Wód Podziemnych

Regionalizacja hydrogeologiczna w podziale na Jednolite Części Wód Podziemnych (JCWPd) oraz Główne Zbiorniki Wód Podziemnych (GZWP) w analizowanym obszarze zamieszczona została na poniższym rysunku (Fig. 5-11).

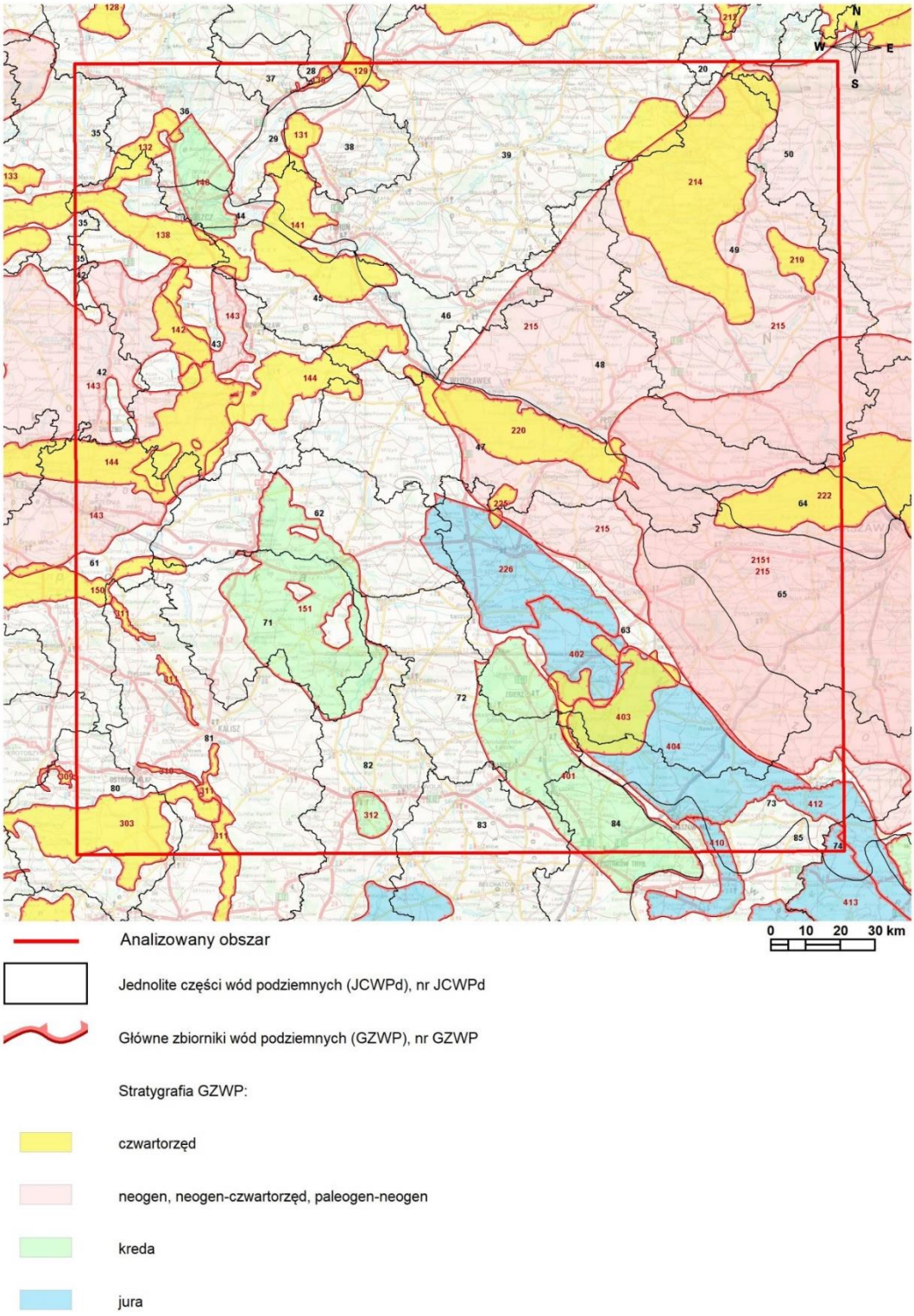


Fig. 5-11 Lokalizacja obszaru badań (patrz Fig. 5.9) na tle JCWPd i GZWP

Jednolite części wód podziemnych

Jednolite części wód podziemnych są podstawowymi, jednostkowymi obszarami ochrony i gospodarowania wodami podziemnymi, które wyznaczono dla warstw wodonośnych o porowatości i przepuszczalności umożliwiającej pobór znaczący dla zaopatrzenia ludności w wodę, lub w których ma miejsce przepływ podziemny o natężeniu znaczącym dla utrzymania pożądanego, dobrego stanu wód powierzchniowych i ekosystemów lądowych (Paczyński i Sadurski, 2007). Podział na jednolite części wód podziemnych podporządkowany jest regionalizacji hydrograficznej, z dominantą wód powierzchniowych. Podstawą do wyznaczenia zagregowanych JCWPd były zlewnie dużych rzek. Przy ustalaniu granic jednostek JCWPd dostosowywano je do regionalizacji hydrogeologicznej przyjętej w Atlasie Hydrogeologicznym Polski (Paczyński red., 1995).

W obrębie analizowanego obszaru badań zlokalizowane są 34 Jednolite Części Wód podziemnych. Dwadzieścia jeden JCWPd należy do zlewni Wisły, dwanaście z nich do zlewni Odry, jedna – do zlewni Pregoły, Świeży i Jarfu. Charakteryzują się różną stratygrafią i typami ośrodka wodonośnego. Skróconą charakterystykę poszczególnych JCWPd wraz z ich całkowitymi powierzchniami przedstawia Tabela 5-8.

Tabela 5-8 Charakterystyka JCWPd zlokalizowanych w zasięgu obszaru badań

Lp.	Nr JCWPd	Kod UE	Powierzchnia [km^2]	Stratygrafia i typ ośrodka wodonośnego	Dorzecze	Stan	Ryzyko	Stan chemiczny	Stan ilościowy	Stan ogólny	Region wodny
1	20	PLGW700020	6089.3	czwartorzęd (porowy); paleogen-neogen (porowy)	Pregoła, Świeża, Jarft	dobry	niezagrożona	dobry	dobry	dobry	Łyny, Węgorapy
2	28	PLGW200028	4057.4	czwartorzęd (porowy); neogen (porowy); paleogen-kreda (porowo-szczelinowy)	Wisła	dobry	niezagrożona	dobry	dobry	dobry	Dolnej Wisły
3	29	PLGW200029	809.2	czwartorzęd (porowy); paleogen-kreda (porowo-szczelinowy)	Wisła	dobry	niezagrożona	dobry	dobry	dobry	Dolnej Wisły
4	35	PLGW600035	2217.8	czwartorzęd (porowy); paleogen-neogen (porowy)	Odra	dobry	niezagrożona	dobry	dobry	dobry	Warty
5	36	PLGW200036	2737.5	czwartorzęd (porowy); paleogen-neogen (porowy); kreda (porowo-szczelinowy)	Wisła	dobry	niezagrożona	dobry	dobry	dobry	Dolnej Wisły
6	37	PLGW200037	410.5	czwartorzęd (porowy); paleogen-neogen (porowy)	Wisła	dobry	niezagrożona	dobry	dobry	dobry	Dolnej Wisły
7	38	PLGW200038	735.5	czwartorzęd (porowy); neogen (porowy)	Wisła	dobry	niezagrożona	dobry	dobry	dobry	Dolnej Wisły
8	39	PLGW200039	7573.5	czwartorzęd (porowy); paleogen-neogen (porowy); kreda (porowo-szczelinowy)	Wisła	dobry	niezagrożona	dobry	dobry	dobry	Dolnej Wisły
9	42	PLGW600042	2633.3	neogen (porowy); kreda (szczelinowy)	Odra	dobry	niezagrożona	dobry	dobry	dobry	Warty
10	43	PLGW600043	3659.3	czwartorzęd (porowy); paleogen-neogen (porowy); kreda (szczelinowy)	Odra	słaby	Zagrożona Ascenzja wód słonych	słaby	słaby	słaby	Warty

Lp.	Nr JCWPd	Kod UE	Powierzchnia [km^2]	Stratygrafia i typ ośrodka wodonośnego	Dorzecze	Stan	Ryzyko	Stan chemiczny	Stan ilościowy	Stan ogólny	Region wodny
11	44	PLGW200044	372.7	czwartorzęd (porowy); neogen (porowy); kreda (szczelinowo-krasowo-porowy)	Wisła	dobry	niezagrożona	dobry	dobry	dobry	Dolnej Wisły
12	45	PLGW200045	1337.1	czwartorzęd (porowy); neogen (porowy); jura (porowo-szczelinowy)	Wisła	dobry	Niezagrożona Ascenzja wód słonych	dobry	dobry	dobry	Dolnej Wisły
13	46	PLGW200046	648.3	czwartorzęd (porowy); neogen (porowy)	Wisła	dobry	Niezagrożona Ascenzja wód słonych	dobry	dobry	dobry	Dolnej Wisły
14	47	PLGW200047	2772.1	czwartorzęd (porowy); paleogen-neogen (porowy); kreda (szczelinowy); jura (szczelinowy)	Wisła	dobry	niezagrożona	dobry	dobry	dobry	Środkowej Wisły
15	48	PLGW200048	2966.5	czwartorzęd (porowy); neogen (porowy); paleogen-kreda (porowy)	Wisła	dobry	zagrożona	dobry	dobry	dobry	Środkowej Wisły
16	49	PLGW200049	5357.3	czwartorzęd (porowy); neogen (porowy)	Wisła	dobry	niezagrożona	dobry	dobry	dobry	Środkowej Wisły
17	50	PLGW200050	6246.8	czwartorzęd (porowy); paleogen-neogen (porowy)	Wisła	dobry	niezagrożona	dobry	dobry	dobry	Środkowej Wisły
18	54	PLGW200054	2273.1	czwartorzęd (porowy); paleogen-neogen (porowy); paleogen-kreda (szczelinowy)	Wisła	dobry	niezagrożona	dobry	dobry	dobry	Środkowej Wisły
19	61	PLGW600061	2702.3	czwartorzęd (porowy); paleogen-neogen (porowy); kreda (szczelinowy); jura (porowo-szczelinowy)	Odra	dobry	niezagrożona	dobry	dobry	dobry	Warty
20	62	PLGW600062	2265	czwartorzęd (porowy); paleogen-neogen (porowy); kreda (szczelinowy); jura (szczelinowy)	Odra	słaby	zagrożona	słaby	dobry	słaby	Warty

Lp.	Nr JCWPd	Kod UE	Powierzchnia [km^2]	Stratygrafia i typ ośrodka wodonośnego	Dorzecze	Stan	Ryzyko	Stan chemiczny	Stan ilościowy	Stan ogólny	Region wodny
21	63	PLGW200063	5352.2	czwartorzęd (porowy); paleogen-neogen (porowy); kreda (porowy, szczelinowy); jura (szczelinowy)	Wisła	dobry	Niezagrożona Ascenzja wód słonych	dobry	dobry	dobry	Środkowej Wisły
22	64	PLGW200064	739.9	czwartorzęd (porowy); paleogen-neogen (porowy)	Wisła	dobry	niezagrożona	dobry	dobry	dobry	Środkowej Wisły
23	65	PLGW200065	3184.4	czwartorzęd (porowy); paleogen-neogen (porowy)	Wisła	dobry	niezagrożona	dobry	dobry	dobry	Środkowej Wisły
24	71	PLGW600071	1919.2	czwartorzęd (porowy); neogen (porowy); kreda (szczelinowo-porowy)	Odra	dobry	zagrożona	dobry	dobry	dobry	Warty
25	72	PLGW600072	1831	czwartorzęd (porowy); kreda (szczelinowy, szczelinowo-porowy)	Odra	dobry	niezagrożona	dobry	dobry	dobry	Warty
26	73	PLGW200073	2299.9	czwartorzęd (porowy); paleogen-neogen (porowy); kreda (szczelinowy, porowy); jura (szczelinowy)	Wisła	dobry	niezagrożona	dobry	dobry	dobry	Środkowej Wisły
27	74	PLGW200074	1660	czwartorzęd (porowy); neogen (porowy); kreda (szczelinowy, porowy); jura (szczelinowy)	Wisła	dobry	niezagrożona	dobry	dobry	dobry	Środkowej Wisły
28	79	PLGW600079	3819.9	czwartorzęd (porowy); neogen (porowy)	Odra	dobry	niezagrożona	dobry	dobry	dobry	Środkowej Odry
29	80	PLGW600080	1723.5	czwartorzęd (porowy); neogen (porowy)	Odra	dobry	niezagrożona	dobry	dobry	dobry	Środkowej Odry
30	81	PLGW600081	4912.6	czwartorzęd (porowy); miocen (porowy); kreda (porowo-szczelinowy); jura (porowo-szczelinowy)	Odra	dobry	niezagrożona	dobry	dobry	dobry	Warty
31	82	PLGW600082	2809.2	czwartorzęd (porowy); kreda (szczelinowy); jura (szczelinowo-	Odra	dobry	niezagrożona	dobry	dobry	dobry	Warty

Lp.	Nr JCWPd	Kod UE	Powierzchnia [km^2]	Stratygrafia i typ ośrodka wodonośnego	Dorzecze	Stan	Ryzyko	Stan chemiczny	Stan ilościowy	Stan ogólny	Region wodny
				krasowy)							
32	83	PLGW600083	2415.8	czwartorzęd (porowy); neogen (porowy); kreda (szczelinowo-porowy); jura (szczelinowo-krasowy)	Odra	słaby	zagrożona	dobry	słaby	słaby	Warty
33	84	PLGW200084	4233.3	czwartorzęd (porowy); kreda (szczelinowo-porowy); jura (szczelinowo-krasowy); trias (szczelinowo-krasowy, porowo-szczelinowy)	Wisła	dobry	niezagrożona	dobry	dobry	dobry	Środkowej Wisły
34	85	PLGW200085	2397	czwartorzęd (porowy); Kreda (szczelinowo-porowy); jura (szczelinowo-krasowy, szczelinowo-porowy); trias (szczelinowy, szczelinowo-porowy-krasowy, szczelinowo-porowy)	Wisła	dobry	niezagrożona	dobry	dobry	dobry	Środkowej Wisły

Główne Zbiorniki Wód Podziemnych

W zasięgu analizowanego obszaru badań wyodrębniono 32 Główne Zbiorniki Wód Podziemnych (GZWP) ze 163, które aktualnie są wydzielone na obszarze Polski. Struktury te są zasobne w wodę i stanowią strategiczne zasoby wód podziemnych do wykorzystania dla zaopatrzenia ludności i podstawowych gałęzi gospodarki wymagających wody wysokiej jakości. Ze względu na wysoką jakość wód, zasobność i potencjalną produktywność - GZWP stanowią najcenniejsze fragmenty jednostek hydrostrukturalnych i systemów wodonośnych. Wymagają one szczególnej ochrony w zakresie stanu chemicznego i ilościowego wód podziemnych oraz kontroli zarządzania zasobami, z zachowaniem priorytetu dla zbiorowego zaopatrzenia w wodę do spożycia i zaspokojenia niezbędnych potrzeb gospodarczych.

GZWP charakteryzują się wydajnością potencjalną typowego otworu studziennego powyżej 70 m^3/h, możliwością budowy dużych ujęć o wydajności powyżej 10 000 m^3/dobę, przewodnością hydrauliczną warstw wodonośnych powyżej 10 m/h i posiadają wodę dobrej jakości. W szczególnych przypadkach, tj. na terenach deficytowych w wodę przyjęto nieco niższe kryteria.

Wyodrębnione na obszarze badań GZWP charakteryzują się różną stratygrafią i typami ośrodka wodonośnego. Wszystkie wyszczególnione Główne Zbiorniki Wód Podziemnych, poza GZWP-2151 Subniecka warszawska (część centralna) zostały szczegółowo rozpoznane i udokumentowane, dzięki czemu ich ochrona przed nadmierną eksploatacją i zanieczyszczeniem może być prowadzona w sposób efektywny. Dla każdego zbiornika, który jest narażony na potencjalnie niekorzystny wpływ działalności człowieka, zostały wyznaczone obszary ochronne, wraz ze wskazaniem zakazów, nakazów oraz ograniczeń w zakresie użytkowania gruntów lub korzystania z wody.

Skróconą charakterystykę poszczególnych GZWP wraz z ich całkowitymi powierzchniami i głębokościami występowania przedstawia Tabela 5-9.

Tabela 5-9 Charakterystyka GZWP zlokalizowanych w zasięgu obszaru badań

Lp.	Nr GZWP	Nazwa GZWP	Powierzchnia GZWP [km^2]	Stratygrafia GZWP	Głębokość minimalna do GZWP [m]	Głębokość maksymalna do GZWP [m]	Głękość średnia [m]	Typ ośrodka	Stan udokumentowania	Rok udokumentowania
1	129	Dolina rzeki Dolna Osa	89,5	Q	2	50	10	porowy	udokumentowany	2011
2	130	Dolna Wda	28,8	Q	60	75	70	porowy	udokumentowany	2015
3	131	Chełmno	97	Q	2	80	50	porowy	udokumentowany	2011
4	132	Zbiornik międzymorenowy Byszewo	204,5	Q	0	0	60	porowy	udokumentowany	2001
5	138	Pradolina Toruń – Eberswalde	1862,8	Q	20	60	0	porowy	udokumentowany	2006
6	140	Subzbiornik Bydgoszcz	447,5	Cr1	100	500	180	porowy	udokumentowany	2013
7	141	Zbiornik rzeki dolna Wisła	724	Q	2	100	25	porowy	udokumentowany	2013
8	142	Inowrocław-Dąbrowa	251,8	Q	2	40	35	porowy	udokumentowany	1998
9	143	Subzbiornik Inowrocław - Gniezno	4995	Pg-Ng	90	140	120	porowy	udokumentowany	2013
10	144	Dolina kopalna Wielkopolska	4122,4	Q	15	90	46	porowy	udokumentowany	2011
11	150	Pradolina Warszawa – Berlin	1611	Q	0	80	5	porowy	udokumentowany	2011
12	151	Zbiornik Turek – Konin – Koło	1673	Cr3	5	150	80	porowo-szczelinowy	udokumentowany	2013
13	214	Zbiornik Działdowo	1919	Q	2	100	60	porowy	udokumentowany	2013

Lp.	Nr GZWP	Nazwa GZWP	Powierzchnia GZWP [km^2]	Stratygrafia GZWP	Głębokość minimalna do GZWP [m]	Głębokość maksymalna do GZWP [m]	Głękość średnia [m]	Typ ośrodka	Stan udokumentowania	Rok udokumentowania
14	215	Subniecka warszawska	51000	Pg-Ng	0	0	160	porowy	nieudokumentowany	-
15	219	Górna Łydynia	151,1	Q	15	50	30	porowy	udokumentowany	2011
16	220	Pradolina rzeki Środkowa Wisła (Włocławek - Płock)	777	Q	2	110	35	porowy	udokumentowany	1998
17	222	Dolina środkowej Wisły (Warszawa - Puławy)	2803,2	Q	0	0	60	porowy	udokumentowany	1996
18	225	Łanięta	53,8	Q	10	30	20	porowy	udokumentowany	2011
19	226	Krośniewice – Kutno	1109	J3	1	400	200	krasowo-szczelinowy	udokumentowany	2011
20	303	Pradolina Barycz – Głogów (E)	1583	Q	2	140	10	porowy	udokumentowany	2011
21	309	Zbiornik miedzymorenowySmoszew – Chwaliszew – Sulmierzyce	30,8	Q	60	80	70	porowy	udokumentowany	2015
22	310	Dolina kopalna rzeki Ołobok	19,6	Q	2	85	5	porowy	udokumentowany	2011
23	311	Zbiornik rzeki Prosna	344,9	Q	15	65	40	porowy	udokumentowany	2015
24	312	Zbiornik Sieradz	112,2	Cr	100	150	125	porowo-szczelinowy	udokumentowany	2015
25	401	Niecka Łódzka	1759,2	Cr1	2	960	600	porowo-szczelinowy	udokumentowany	2013

Lp.	Nr GZWP	Nazwa GZWP	Powierzchnia GZWP [km^2]	Stratygrafia GZWP	Głębokość minimalna do GZWP [m]	Głębokość maksymalna do GZWP [m]	Głękość średnia [m]	Typ ośrodka	Stan udokumentowania	Rok udokumentowania
26	402	Zbiornik Stryków	540,7	J3	30	250	100	krasowo-szczelinowy	udokumentowany	2013
27	403	Zbiornik międzymorenowy Brzeziny - Lipce Reymontowskie	680,75	Q	5	50	25	porowy	udokumentowany	2013
28	404	Zbiornik Koluszki - Tomaszów	1675,86	J2-J3	0	200	0	szczelinowy	udokumentowany	2013
29	410	Zbiornik Opoczno	294,6	J3	4	210	100	szczelinowy	udokumentowany	2011
30	412	Zbiornik Goszczewice - Szydłowiec	473,41	J	0	115	24	krasowo-porowo-szczelinowy	udokumentowany	1995
31	413	Zbiornik Goszczewice - Szydłowiec	660,03	J	0	115	24	krasowo-porowo-szczelinowy	udokumentowany	1995
32	2151	Subniecka warszawska (część centralna)	17500	Pg-Ng	0	0	180	porowy	nieudokumentowany	-

5.4.1.3 Podział na piętra wodonośne nadkładu skał zbiornikowych do magazynowania substancji

Na obszarze analiz można wydzielić cztery piętra wodonośne:

- czwartorzędowe,
- paleogeńsko-neogeńskie
- kredowe (kredowo-paleoceńskie),
- jurajskie (górnojurajskie, środkowojurajskie, dolnojurajskie).

Czwartorzędowe piętro wodonośne

Czwartorzędowe utwory wodonośne występują dość powszechnie na całym przedmiotowym obszarze. Tworzą one zwykle jeden, dwa lub trzy poziomy wodonośne, rozdzielone słabo przepuszczalnymi osadami. Poziomy wodonośne czwartorzędu występują blisko powierzchni ziemi i są najczęściej wykorzystywane przez gospodarstwa wiejskie studniami kopanymi, ale także ujmowane studniami wierconymi. Cechą charakterystyczną tych poziomów jest bardzo duże zróżnicowanie litologiczne: od piasków pylastych i drobnoziarnistych do piasków gruboziarnistych i żwirów. Często pierwszy poziom występuje bardzo płytko – na głębokości od 0,5 m. Poziom zasilany jest bezpośrednio poprzez infiltrację opadów atmosferycznych. Strefami drenażu są cieki powierzchniowe oraz doliny rzek. W dolinach rzek najczęściej występuje jeden płytki, o głębokości kilkunastu metrów, poziom wodonośny o zwierciadle swobodnym.

Na obszarach wysoczyznowych piętro czwartorzędowe tworzą lokalnie występujące soczewki piaszczysto-żwirowe, zwykle występujące na głębokościach 5-15 m. Zwierciadło wody ma charakter swobodny, lokalnie napięty. Warstwę napinającą tworzą głównie osady organiczne, mułki, mady, piaski gliniaste i gliny. Nie mają one ciągłego rozprzestrzenienia z uwagi na ograniczone rozprzestrzenienie osadów wodonośnych.

W obrębach pradolin, zwierciadło wody występuję najczęściej w holoceńskich osadach piaszczystych i ma charakter swobodny. Poziom ten pozostaje w związku hydraulicznym z wodami powierzchniowymi. Miąższość warstwy wodonośnej jest często uzależniona od morfologii podłoża – na terenie wysoczyzn osiąga miąższość rzędu kilkudziesięciu metrów, w pradolinach miąższość maleje do kilku metrów. Niektóre regiony hydrogeologiczne występujące w obrębie obszaru badań są intensywnie pocięte strukturami tektonicznymi, a dyslokacje obejmują także kompleks czwartorzędowy (region kutnowski). W licznych strukturach kopalnych i rowach tektonicznych miąższość utworów czwartorzędowych sięga nawet od 130 do 300 m (rów Krzepocina). W okolicach Kutna występują płytkie wody zmineralizowane obejmujące czwartorzędowe poziomy wodonośne.

Czwartorzędowy poziom wodonośny w większości pozbawiony jest izolacji od powierzchni, dzięki czemu moduł zasobów odnawialnych jest wysoki i przekracza 12,5 $m^3/h \bullet km2$. Struktury te, charakteryzujące się dużymi zasobami i bardzo dobrą odnawialnością, jednak brak izolacji od powierzchni powoduje, że wody podziemne w tych strukturach są wrażliwe na zanieczyszczenia powierzchniowe.

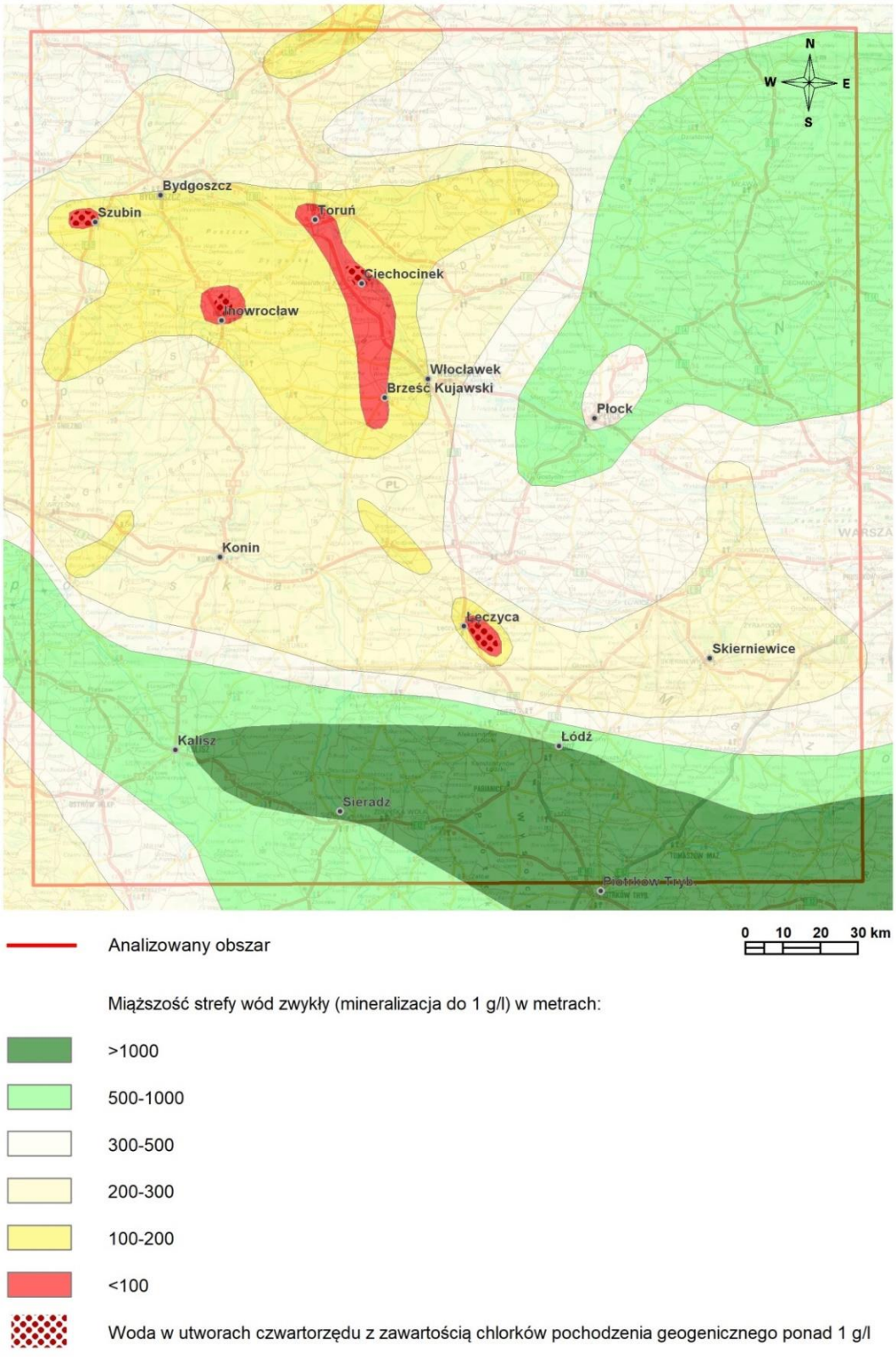


Fig. 5-12 Mapa miąższości strefy wód zwykłych oraz ich zasolenia w utworach czwartorzędu (wg Bojarski, red. 1996, zmodyfikowany)

Czwartorzędowe wody słodkie charakteryzują się dużą zmiennością typów hydrochemicznych, co wynika zarówno z naturalnych procesów kształtujących ich skład chemiczny, jak i wpływu antropogenicznych zanieczyszczeń. Mineralizacja wód jest zmienna, od nieco poniżej 200 mg/dm^3

w strefach płytkich do ok. 1000 mg/dm^3 w głęboko leżących warstwach wodonośnych (geolog.pgi.gov.pl; Paczyński i Sadurski, 2007; Stupnicka i Stempień-Sałek, 2016). Poniżej na mapie miąższości strefy wód zwykłych i ich zasolenia w utworach czwartorzędu zaznaczono w przedziałach obszary występowania wód zwykłych (Fig. 5-12). W wodach czwartorzędowych najwyższe wartości chlorków stwierdzono w rejonach miejscowości: Szubin, Inowrocław, Toruń, Ciechocinek, Brześć Kujawski, Łęczyca. Lokalne, wysokie zasolenie wód czwartorzędowych wynika z ascezji wertykalnej lub lateralno-wertykalnej z podłoża mezozoicznego. Istnieje także związek zasolenia ze zmniejszoną miąższością (do 100 m) osadów czwartorzędu. W wymienionych rejonach w podłożu stosunkowo niemiąższego czwartorzędu i jego cienkich poziomów wodonośnych występują na ogół płytko zalegające szczelinowate utwory kredy i jury górnej oraz piaskowce jury i triasu, prowadzące solanki o mineralizacji znacznie powyżej 350 g/l. Obszary zaznaczone na Fig. 5-12 kolorem czerwonym, można zaliczyć do obszarów słabszej izolacji dla potencjalnie składowanych i mogących migrować substancji w niżej ległych strukturach.

Paleogeńsko-neogeńskie piętro wodonośne

Piętro paleogeńsko-neogeńskie na analizowanym obszarze występuje powszechnie, często jest głównym użytkowym poziomem wodonośnym. Zazwyczaj tworzą go zespoły warstw poziomu mioceńskiego oraz oligoceńskiego, często pozostające w łączności hydraulicznej. Lokalnie występują warstwy wodonośne pliocenu. Nie mają one jednak większego znaczenia użytkowego z uwagi na ograniczoną miąższość i niskie parametry hydrogeologiczne. Ilaste utwory pliocenu spełniają rolę warstwy izolującej poziomy oligocenu i miocenu od wód występujących w osadach czwartorzędowych. Zwykle wodonośnymi utworami piętra paleogeńsko-neogeńskiego są zróżnicowane piaski, przeważnie drobnoziarniste, bardzo często poprzedzielane przez iły, mułki, lokalnie osady formacji brunatnowęglowej o nieciągłym charakterze.

W obrębie poziomu mioceńskiego często można wyróżnić trzy warstwy wodonośne: dolną, środkową i górną, związane z cyklicznością sedymentacji utworów brunatnowęglowych miocenu. Zazwyczaj jednak warstwy te łączą się ze sobą, tworząc jeden kompleks wodonośny zbudowany z osadów piaszczystych z soczewkami węgli brunatnych i mułów. Jest to poziom o ciśnieniu subartezyjskim, lokalnie artezyjskim w dolinach większych rzek, występujący na zróżnicowanej głębokości pod nadkładem kompleksu iłów górnego miocenu i pliocenu oraz utworów gliniastych i piaszczysto-żwirowych czwartorzędu.

Oligoceński poziom wodonośny tworzą jedna lub dwie warstwy piasków drobnoziarnistych, lokalnie średnio- i gruboziarnistych, o zmiennej miąższości dochodzącej do 30 m. Bardzo często poziom oligoceński łączy się przez rozległe okna hydrogeologiczne z poziomem mioceńskim i wtedy bezpośrednio na osadach wodonośnych oligocenu zalegają piaski dolnej warstwy mioceńskiej. Warstwę izolującą te poziomy stanowią zwykle kilkumetrowej miąższości osady mulasto - ilasto - węgliste. Zasilanie poziomu oligoceńskiego zachodzi na drodze przesiąkania wód z nadległych poziomów czwartorzędowych, lokalnie również przepływu w oknach hydrogeologicznych oraz drogą bezpośredniej infiltracji opadów przez słabo i bardzo słabo przepuszczalny nadkład gliniasto-ilasty. Obszarami zasilania są wysoczyzny morenowe, a strefami wododziałowymi są ich kulminacje, gdzie znajdują się również regionalne działy wód powierzchniowych. Regionalne strefy drenażu znajdują się w obniżeniach pradolin i głównych dolin rzecznych.

W strefach, gdzie występują zaburzenia glacitektoniczne w położeniu warstw, głębokość występowania piętra paleogeńsko-neogeńskiego jest znacznie zróżnicowana i waha się od 80 do 200 m p.p.t. Miąższości pięter zwykle wahają się w granicach 10–20 m, osiągając jednak miejscami nawet 50 m. Zwierciadło wód podziemnych często jest subartezyjskie i stabilizuje się kilka metrów poniżej zwierciadła czwartorzędowego. Piętro to zasilane jest przez przesączanie się wód z piętra czwartorzędowego oraz infiltrację wód opadowych na wychodniach piasków miocenu i oligocenu. Piętro paleogeńsko-neogeńskie kontaktuje się miejscami swobodnie z piętrami: czwartorzędowym, kredowym i jurajskim. Chemizm wód piętra neogeńsko-paleogeńskiego jest bardzo zróżnicowany. Wpływ na to mają głównie dopływy wód zasolonych z podłoża mezozoicznego oraz dopływ wód przesączających się z piętra czwartorzędowego w strefach zasilania.

W zachodniej części obszaru badań, w rejonie Warszawy, wydzielono basen paleogeńsko-neogeński stanowiący najzasobniejszy udokumentowany zbiornik wód podziemnych (geolog.pgi.gov.pl; Paczyński i Sadurski, 2007; Stupnicka i Stempień-Sałek, 2016).

Poniżej zamieszczono mapę zasolenia wód w utworach neogenu i paleogenu (Fig. 5-13). Obszarowo, barwami w przedziałach zaznaczono stężenia jonu chlorku. W rejonach bez pokrycia barwami zaznacza się brak zawodnionych poziomów neogenu i paleogenu (np. obszar niecki łódzkiej). Obszarami zasolenia wód (>300 mg/l) to przede wszystkim rejony miejscowości: Szubin, Świecie, Inowrocław, Ciechocinek, Sochaczew. Zasolenie wód neogenu i paleogenu należy genetycznie wiązać z ascenzją z podłoża w warunkach eksploatacji wód ujęciami oraz specyfikacją budowy geologicznej – strukturami solnymi i wzajemnymi połączeniami poziomów wodonośnych.

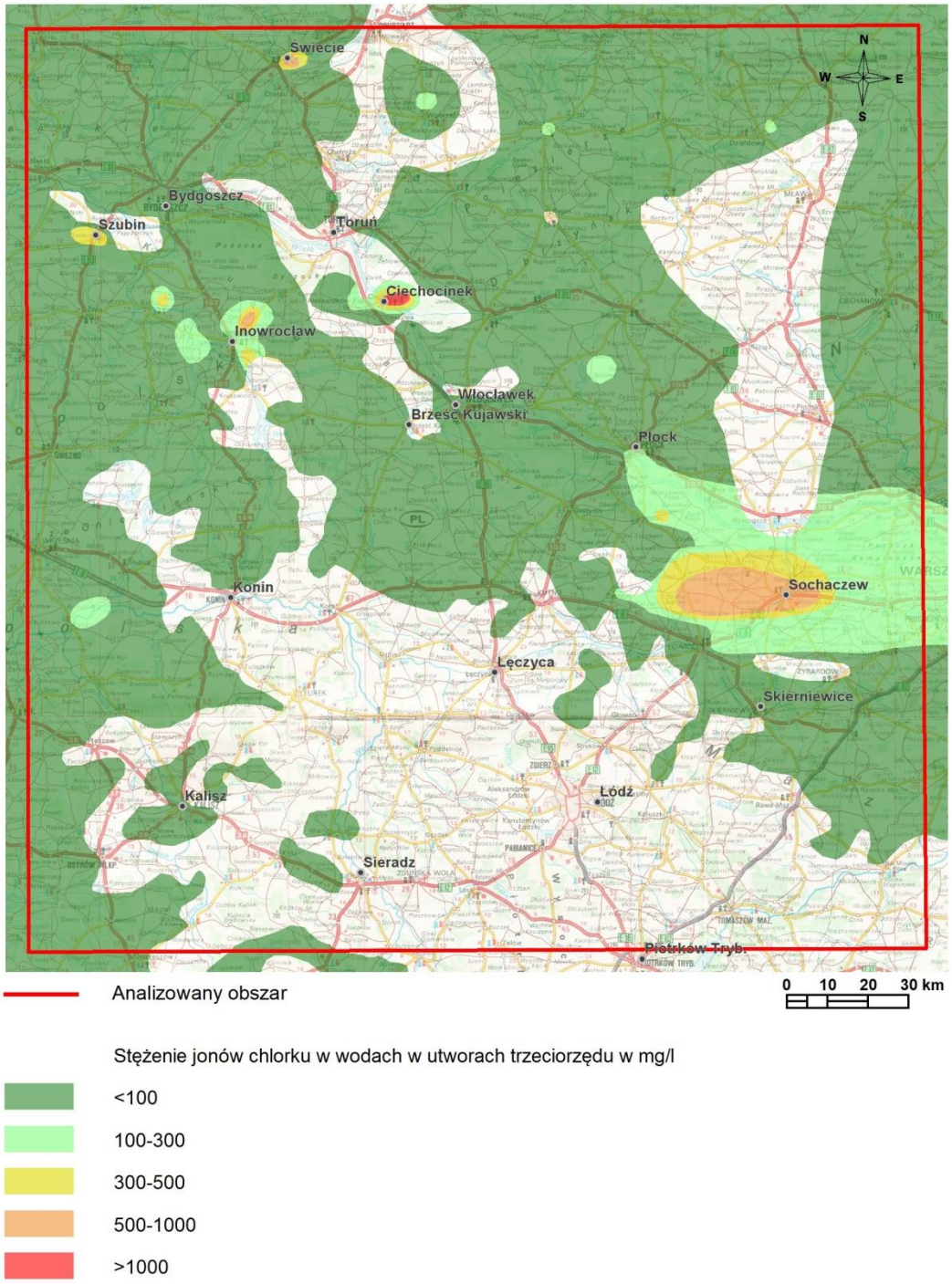


Fig. 5-13 Mapa zasolenia wód w utworach neogenu i paleogenu (wg Bojarski, red., 1996, zmodyfikowany)

Kredowe piętro wodonośne

W kredzie dolnej osadziły się słabo zwięzłe piaskowce mułkowate, margle z fosforytami, mułowce i iłowce z fauną oraz lokalnie łupki ilaste. Po przerwie sedymentacyjnej, w kredzie górnej osadziły się wapienie margliste i organogeniczne, margle piaszczyste z glaukonitem, wapniste gezy, margliste opoki z glaukonitem, lokalnie również kreda pisząca. Wodonośność utworów zależy przede wszystkim od głębokości występowania, stopnia spękania skał oraz od kontaktów z nadległymi poziomami wodonośnymi, które obszarowo są bardzo zmienne.

Piętro kredowe lokalnie pozostaje w bezpośrednim kontakcie hydraulicznym z piętrem paleogeńsko-neogeńskim tworząc tzw. „różnowiekowy" poziom wodonośny. Jest on związany z kompleksem utworów piaszczystych stropowych partii kredy górnej, piaskami paleogenu i neogenu oraz osadami piaszczystymi najstarszych ogniw plejstocenu tworzących jeden poziom wodonośny.

Piętro wodonośne kredowo-paleoceńskie, reprezentowane jest przez szczelinowe utwory węglanowe kredy górnej i paleocenu. Pietro kredowo-paleoceńskie często charakteryzuje się niskimi wartościami hydrogeologicznymi i nierzadko podwyższoną mineralizacją wód (2-3 g/l).

W osadach kredowych występują dwa poziomy wodonośne: w piaskach kredy dolnej oraz w osadach węglanowych kredy górnej.

Utwory kredy górnej występują na zróżnicowanych głębokościach. Wodonośność piętra kredowego jest ściśle związana z obecnością szczelin i spękań w skałach węglanowych, co wiąże się z bardzo zmiennymi parametrami hydrogeologicznymi. Najbardziej spękane są partie przystropowe, dodatkowo ilość szczelin wzrasta w sąsiedztwie stref uskokowych. Zwierciadło poziomu górnokredowego zazwyczaj ma charakter napięty przez półprzepuszczalne warstwy wyższych pięter wodonośnych, wody stabilizują się zwykle na rzędnej zbliżonej rzędnej wody piętra paleogeńsko-neogeńskiego. Zasilanie odbywa się poprzez przesiąkanie wody z utworów czwartorzędowych i paleogeńsko-neogeńskiego.

Wody w osadach kredy dolnej występują zazwyczaj w piaskach średnio- i drobnoziarnistych, czasem mułkowych, oraz w piaskowcach o łącznej miąższości nierzadko przekraczającej 100 m, lokalnie przewarstwionych utworami słabo przepuszczalnymi: iłowcami, mułowcami. Poziom wodonośny kredy dolnej zazwyczaj pozostaje w kontakcie hydraulicznym z wodami poziomu kredy górnej. Poziom dolnokredowy często prowadzi wody naporowe, o ciśnieniu znacznie zmienionym na skutek eksploatacji ujęć. Zasilanie poziomu zachodzi poprzez przesączanie wód z nadległych poziomów kenozoicznych (geolog.pgi.gov.pl; Paczyński i Sadurski, 2007; Stupnicka i Stempień-Sałek, 2016).

Jurajskie piętro wodonośne

Utwory jury środkowej i dolnej są wykształcone w postaci serii piaskowców, mułowców i iłowców, natomiast jury górnej – przez kompleks wapieni przechodzących w stropie w wapienie margliste, margle i iły margliste.

Poziom górnojurajski stanowią głównie wapienie o bardzo zmiennych parametrach hydrogeologicznych, w których występują wody szczelinowo-krasowe o zwierciadle swobodnym i wody porowe w matrycy skalnej. Miąższość wodonośca wynosi od 100 do 300 m i zazwyczaj charakteryzuje się bardzo dużymi prędkościami przepływu wód. Zwierciadło wody poziomu górnojurajskiego jest lokalnie napięte przez półprzepuszczalne utwory występujące w stropie poziomu lub/i półprzepuszczalne warstwy w nadległych piętrach wodonośnych. Poziomy środkowojurajski i dolnojurajski w poszczególnych warstwach wodonośnych charakteryzują się zwierciadłem wody napiętym przez półprzepuszczalne przewarstwienia ilasty. Lokalnie piętro jurajskie odgrywa rolę głównego użytkowego poziomu wodonośnego (geolog.pgi.gov.pl; Paczyński i Sadurski, 2007; Stupnicka i Stempień-Sałek, 2016).

5.4.1.4 Ocena warunków do magazynowania w wybranych strukturach geologicznych

Jednym z podstawowych wymogów, jakie muszą spełniać struktury geologiczne przeznaczone do podziemnego magazynowania/składowania substancji jest ich szczelność, która gwarantuje brak wystąpienia ubytków magazynowanej substancji. Istotne jest, by struktury geologiczne przeznaczone na podziemne składowisko dwutlenku węgla, lub magazyn gazu ziemnego, mieszanin wodoru i gazu ziemnego, wodoru, czy też sprężonego powietrza miały dobre właściwości kolektorskie zapewniające skuteczną izolację przed migracją dwutlenku węgla ku powierzchni, do poziomów występowania wód użytecznych.

W północno-zachodniej części wału kujawskiego, w rejonie struktury geologicznej Konary, bezpośrednio pod cienką pokrywą osadów czwartorzędu, neogenu i paleogenu występują silnie zredukowane utwory kredy dolnej. Poziom wodonośny kredy dolnej zazwyczaj pozostaje w kontakcie hydraulicznym z wodami poziomu kredy górnej. Utwory jury środkowej i dolnej są wykształcone w postaci serii piaskowców, mułowców i iłowców, natomiast jury górnej – przez kompleks wapieni przechodzących w stropie w wapienie margliste, margle i iły margliste. Utwory jury środkowej i dolnej wykazują stosunkowo dobre właściwości kolektorskie. Utwory triasu (pstrego piaskowca dolnego) leżą bezpośrednio na poduszce solnej cechsztynu.

Struktura geologiczna Wojszyce (Fig. 5-14) zlokalizowana koło Kutna, charakteryzuje się kilkuwarstwowym systemem sekwestracyjnym w jurze dolnej (Pieńkowski, 2015). Profil osadów paleogenu i neogenu jest niemal kompletny i charakterystyczny dla obszaru Niżu Polskiego (Czapowski i in., 2005). W nadkładzie struktury znajduje się wyjątkowo gruby kompleks iłowców i mułowców jury środkowej (górnego aalenu), który może stanowić zabezpieczenie przed migracją substancji ze struktury z kilkoma systemami sekwestracyjnymi. Dodatkowo formacja ilasto-mułowcowa przeławicająca dolnojurajskie piaskowce ma zasięg lateralny (Krzywiec, 2009). Właściwości uszczelniające pod kątem składowania CO_2 oraz magazynowania innych substancji i przewidywana rozciągłość regionalna formacji zbiornikowych i uszczelniających pozwala sądzić, że system sekwestracyjny w jurze dolnej posiada korzystne właściwości kolektorskie, jednak warunki do magazynowania są uzależnione od głębokości.

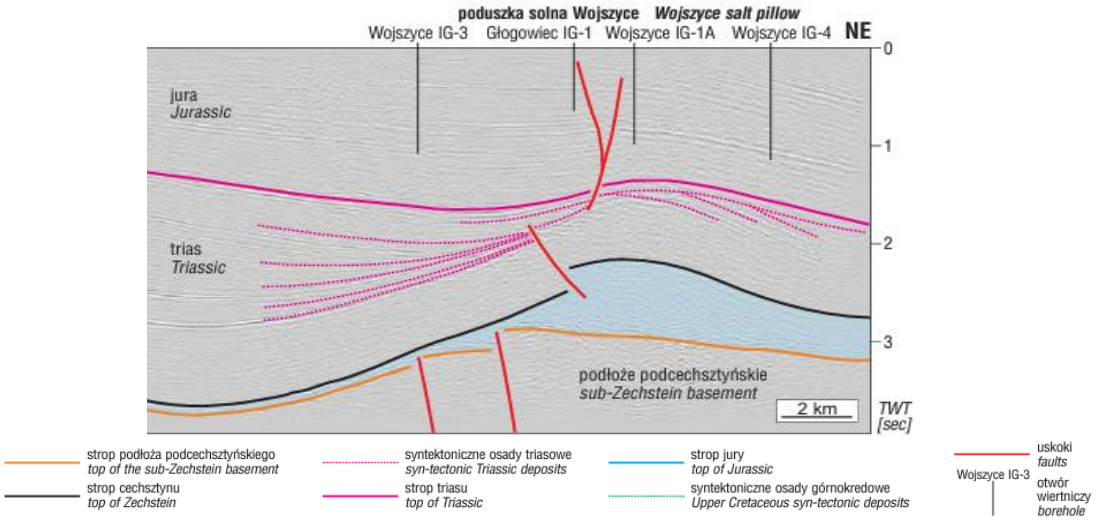


Fig. 5-14 Poduszka solna Wojszyce (źródło: Krzywiec, 2009)

W rejonie struktury Budziszewice-Zaosie generalnie nie występują utwory kredy (jedynie sięgają jej SW krańca), zaś pod utworami paleogenu występują utwory jury górnej (oksfordu) i środkowej, a pod nimi na przemian formacje uszczelniające i zbiornikowe jury dolnej (początkowo o dość dobrych własnościach, pogarszających się z głębokością), czyli rozpatrywany kompleks magazynowania/składowania. Stosunkowo miąższy kompleks uszczelniający formacji ciechocińskiej najprawdopodobniej stanowiłby wystarczającą barierę dla migracji magazynowanych substancji do użytkowego poziomu wodonośnego (GZWP) w węglanach oksfordu i batonu.

W rejonie struktury geologicznej Bielsk-Bodzanów, poziomy zbiornikowe stanowią kompleks piaskowców występujący w jurze dolnej i środkowej. Poziomy te uszczelnione są od góry przez drobnoziarniste osady jury środkowej (aalenu górnego i bajosu dolnego) wykształcone w postaci iłowców, łupków ilastych i mułowców masywnych pochodzenia morskiego. Powyżej poziomu uszczelniającego w rejonie Bielsk-Bodzanów występuje jeszcze jeden poziom utworzony przez łupki i mułowce ilaste środkowego bajosu górnego. Utwory jury środkowej i dolnej wykazują korzystne właściwości kolektorskie i charakteryzują się stosunkowo dobrymi właściwościami zbiornikowymi w znacznym stopniu uzależnionymi od głębokości. Bardzo dobrymi własnościami zbiornikowymi charakteryzują się utwory kredy dolnej, zaś uszczelnienie stanowi miąższy kompleks utworów węglanowych i krzemionkowych kredy górnej. Natomiast w utworach węglanowych kredy górnej występuje poziom wodonośny, który może mieć łączność z paleogeńsko-neogeńskim piętrem wodonośnym.

Na podstawie analizy danych archiwalnych, dokumentacji geologicznych i map można stwierdzić, że szczelność nieprzepuszczalnych warstw izolujących, zalegających nad wytypowanymi strukturami wodonośnymi przeznaczonymi do podziemnego składowania dwutlenku węgla prawdopodobnie jest wystarczająca, by zapewnić warunki sprzyjające magazynowaniu/składowaniu rozpatrywanych substancji i ograniczyć wystąpienie ubytków magazynowanej/składowanej substancji, co jednocześnie mogłyby stanowić zagrożenie dla wyżej ległych poziomów wodonośnych stanowiących użytkowe piętra wodonośne (choć nie jest to takie pewne w przypadku uszczelnienia zbiornika dolnokredowego). Należy zwrócić uwagę na fakt, że w większości przypadków warunki do magazynowania substancji są uzależnione od głębokości występowania poziomów i wymagają dalszych, szczegółowych badań w celu rozpoznania właściwości kolektora.

5.4.2 Analiza danych hydrogeochemicznych dla kolektorów

(Lidia Razowska-Jaworek)

5.4.2.1 Inwentaryzacja danych hydrogeochemicznych

W celu wskazania potencjalnych poziomów najlepszych dla składowania dwutlenku węgla oraz magazynowania wodoru, mieszanin wodoru i gazu ziemnego, gazu ziemnego, czy też sprężonego powietrza w badanym regionie dokonano analizy hydrogeochemicznej głównie na podstawie wyników uzyskanych z opróbowania poziomów zbiornikowych w głębokich otworach badawczych, poszukiwawczych i hydrogeologicznych Państwowego Instytutu Geologicznego–PIB oraz w głębokich otworach wiertniczych Polskiego Górnictwa Naftowego i Gazownictwa. Przeanalizowano 238 otworów wiertniczych ujmujących kompleksy skał o zróżnicowanych właściwościach zbiornikowych i dużym zróżnicowaniu mineralizacji, które mogą być potencjalnie zbiornikami do magazynowania. Otwory ujmowały utwory od dewonu po kredę górną. Prace te obejmowały weryfikację, aktualizację i uszczegółowienie wyników przedsięwzięcia „Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO_2 wraz z ich programem monitorowania" (Razowska-Jaworek [w:] Wójcicki i in., 2013; Razowska-Jaworek, 2012) w przedmiotowym zakresie dla rozpatrywanego obszaru Polski centralnej.

W celu wstępnego wydzielenia formacji wodonośnych, poza otworami, przeanalizowano opracowania kartograficzne oraz materiały archiwalne, w tym między innymi: Atlas hydrochemiczny i hydrodynamiki paleozoiku i mezozoiku oraz ascensyjnego zasolenia wód podziemnych na Niżu Polskim (Bojarski, red., 1996); Geneza i paleohydrogeologiczne warunki występowania wód zmineralizowanych na Niżu Polskim (Paczyński i Pałys, 1970); Atlas hydrogeochemiczny Polski 1:2000000 (Turek, red., 1977); Mapa geologiczna Polski bez utworów kenozoiku, mezozoiku i permu. Skala 1:1000000 (Pożaryski i Radwański, 1972); Atlas wód geotermalnych Niżu Polskiego. Zbiorniki dolnojurajski i dolnokredowy (Górecki, red., 2006), Bank Hydro PIG-PIB http://spd.pgi.gov.pl/PSHv8/ oraz monografię Hydrogeologia regionalna Polski, tom II, Wody mineralne, lecznicze i termalne oraz kopalniane (Paczyński i Sadurski, 2007a).

W celu wykonania badań hydrogeochemicznych zinwentaryzowano wszelkie dostępne dane dotyczące składu chemicznego i parametrów fizyko-chemicznych wód w badanym rejonie. Zestawiono 285 analiz fizyko-chemiczne z 124 otworów wiertniczych z głębokości od 518 m do 4971 m (Tabela 5-15), w tym: 1 z utworów dewońskich, 6 z utworów karbońskich, 14 z utworów permskich, 16 dolnotriasowych, 5 środkowotriasowych, 10 górnotriasowych, 46 dolnojurajskich, 76 środkowojurajskich, 62 górnojurajskich, 37 dolnokredowych i 6 górnokredowych.

Dla wszystkich analiz wykonano bilans anionowo-kationowy w celu oszacowania błędu analizy i usunięto z dalszych badań te analizy, w których błąd był wyższy od 10%. W 31 przypadkach sięgnięto do oryginalnych dokumentacji ze względu na dyskusyjne wartości niektórych składników, np. brak pewności co do jednostek czy możliwość zanieczyszczenia wody płuczką wiertniczą. Dokonano wglądu w dokumentacje otworów głębokich z powierzchni: Buków 2, Bodzanów IG1, Dobrów IGH1, Kamionki 1, Kamionki 2, Karnkowo IG1, Koło IG 4, Lutomiersk 2 i 3, Madaje Stare IG1, Mogilno 2, Mszczonów IG2, Nidzica IG1, Niechmirów IG1, Niestronno 1, Płońsk IG2a, Poddębice IG1 i IG2, Różyce 1, Siedlec 1, Sierpc 2, Tuszyn IG1, Uniejów AGH2, Wartkowice 1, Wielgie IG2, Wojszyce PIG1A , PIG3 i PIG4, Zakrzyn IG1, Zaosie 2 i 3. Ponadto wykorzystano informacje dotyczące badań hydrogeologicznych zawarte w publikacjach z serii Profile Głębokich Otworów Wiertniczych

PIG. Weryfikacja wykazała, że w części otworów, ciecze pobrane z otworów, okazały się wodami złożowymi zmieszanymi z płuczką czy wodami technologicznymi i ich skład chemiczny nie jest naturalny. Dlatego też w ocenie warunków magazynowania w tabeli (Tabela 5-15) przedstawiono typ genetyczny określony wg wskaźników hydrogeochemicznych, wg izotopów stabilnych oraz genezę wody ekspercką. Ostatecznym wynikiem jest określenie warunków do magazynowania i składowania substancji.

5.4.2.2 Charakterystyka hydrogeochemiczna kolektorów

Charakterystykę hydrogeochemiczną kolektorów wykonano głównie na podstawie wyników uzyskanych z opróbowania poziomów zbiornikowych w głębokich otworach badawczych, poszukiwawczych i hydrogeologicznych Państwowego Instytutu Geologicznego oraz w głębokich otworach wiertniczych Polskiego Górnictwa Naftowego i Gazownictwa S.A. (Tabela 5-15).

Celem opisanych badań była analiza poziomów wodonośnych w celu wytypowania obszarów o największym rozprzestrzenieniu kolektora spełniającego kryteria do magazynowania substancji.

Metodyka badań

Do wstępnego oszacowania warunków hydrogeologicznych i hydrogeochemii wytypowano 123 otwory ujmujące kompleksy skał o najlepszych właściwościach zbiornikowych. Mogą one być potencjalnie podstawowymi zbiornikami do magazynowania substancji. Charakterystykę hydrogeochemiczną opracowano dla kompleksów skał obejmujących poziomy stratygraficzne mezozoiku: perm, trias górny, środkowy i dolny, jurę górną, środkową i dolną oraz kredę górną i dolną.

Na mapie dokumentacyjnej (Fig. 5-15) zlokalizowano opróbowane otwory wiertnicze odpowiednio dla poszczególnych poziomów stratygraficznych, przy każdym otworze zaznaczono symbolem opróbowany poziom stratygraficzny. Analizowano też lokalizację potencjalnych kolektorów względem struktur solnych i wysadów solnych, na ogół silnie zaburzonych tektonicznie. Przy zaburzeniu reżimu hydrodynamicznego, na przykład przy odnawianiu się starych systemów tektonicznych, ważną informacją jest różnica ciśnień złożowych i mineralizacji wód pomiędzy sąsiednimi poziomami. Na podstawie różnicy gradientów ciśnień Bojarski (red., 1996) określił lateralny ogólny kierunek przepływu wód. Informacja ta została również wykorzystana do analizy możliwości magazynowania substancji w badanych kolektorach.

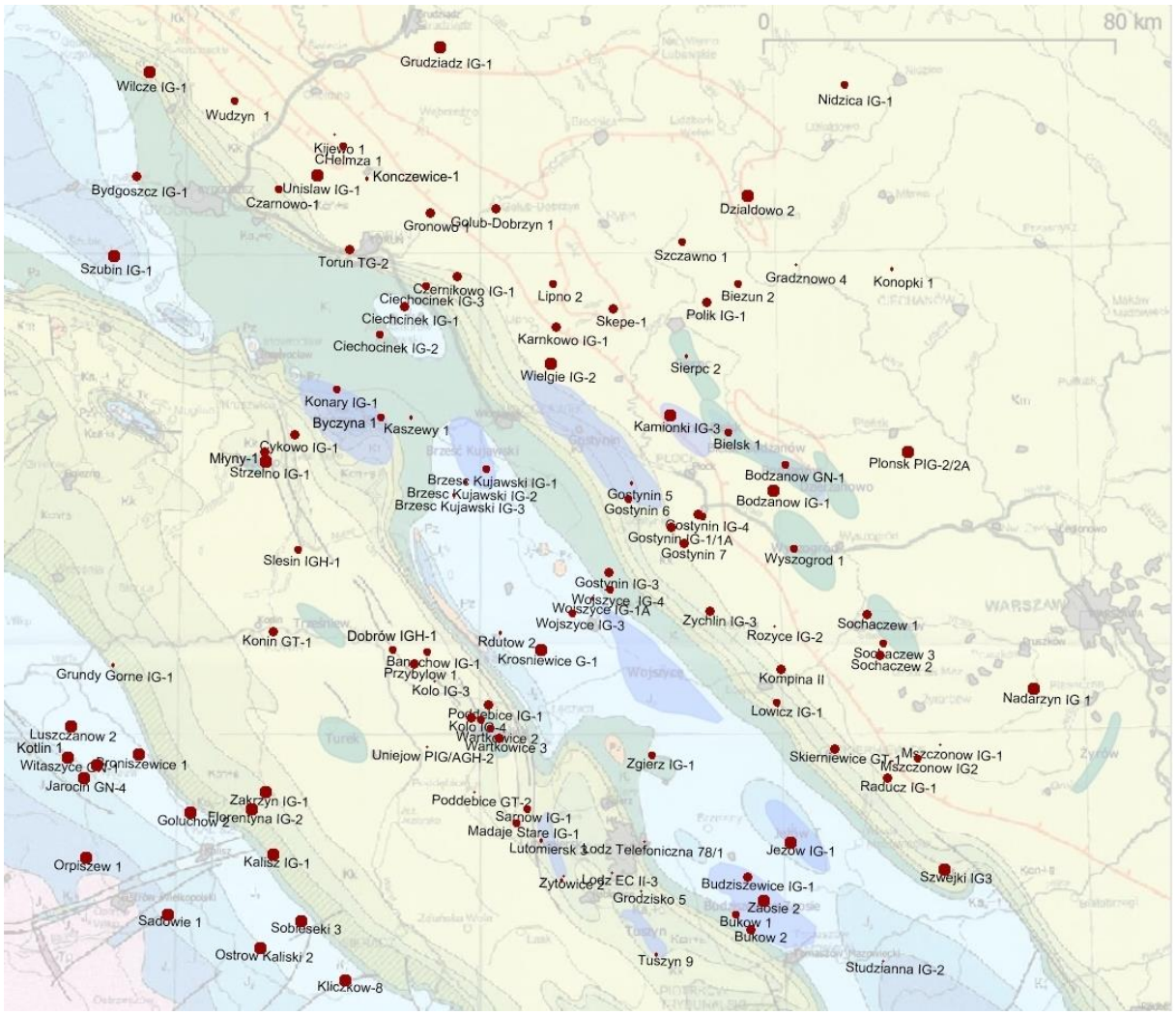


Fig. 5-15 Mapa dokumentacyjna badanego obszaru

Charakterystyka kolektorów

Procesy przemian chemicznych wód i ich przemieszczania się w głębokich poziomach geologicznych zachodzą na ogół w czasie geologicznym i obecnie są trudno zauważalne. Jednak w przypadku wyraźnego zaburzenia reżimu hydrodynamicznego, wywołanego na przykład bardzo dużym obniżeniem się zwierciadła wody przez intensywną eksploatację lub odwadnianie kopalń, może nastąpić wyrównywanie się ciśnień przez dopływ solanek z głębszych części basenu. Tąpnięcia górnicze lub inne ruchy masywu skalnego mogą spowodować odnowienie się starych szczelin tektonicznych i uruchomienie przepływu ku powierzchni, przez pionowe drogi krążenia. Najbardziej niebezpieczny jest przepływ typu lateralnego z głębszej do płytszej części basenu. Mniej niebezpieczny, ale gwałtowniejszy jest przepływ typu wertykalnego bezpośrednio z podłoża oraz w aureoli wysadów solnych typu lateralno-wertykalnego Macioszczyk (1971) i Bojarski (red., 1996).

W celu sporządzenia charakterystyki hydrogeochemicznej badanych poziomów dokonano analizy składu chemicznego wód z 282 otworów i wykonano uproszczone modelowanie analiz chemicznych wód za pomocą programu Wateval (Rock source deduction), oraz obliczono wybrane wskaźniki hydrochemiczne (Na/Cl, Na+K/Cl, Na/Na+Cl, SO_4x100/Cl i Cl/Br). Po zestawieniu tych danych

dokonano ich interpretacji, czyli oceny stopnia zmetamorfizowania wód będącego wskaźnikiem szczelności kolektora (Tabela 5-10).

Charakterystykę hydrogeochemiczną kolektorów mezozoicznych przeprowadzono dla poziomów zbiornikowych kredy, jury, triasu i permu występujących w profilu stratygraficznym badanego regionu.

Tabela 5-10 Skład chemiczny wód podziemnych w badanym rejonie

Parametr	Strop poziomu wodonoś-nego [m]	Wskaźniki					Na [g/l]	Cl [g/l]	Minera-lizacja [g/l]	Typ genety-czny ekspercki
		Na/Cl	Na+K/Cl	Na/ Na+Cl	SO_4x100/Cl	Cl/Br				
Kreda górna (n=6)										
maksimum	1215	1.05	1.07	0.51	17.00	968	10.50	18.79	31.9	4
minimum	715	0.66	0.66	0.40	1.26	201	0.23	0.45	0.9	1
średnia	993	0.86	0.86	0.46	6.65	625	3.2	5.7	10	3
Kreda dolna (n=37)										
maksimum	2438	7.27	7.56	0.88	709.00	9953	33.2	57.8	95.8	4
minimum	603	0.71	0.73	0.41	0.22	14	0,001	0.001	0.3	1
średnia	1374	1.59	1.68	0.56	45.37	1926	4.6	7.4	13	2
Jura górna (n=62)										
maksimum	3035	2.54	2.54	0.72	210.84	8376	48.75	100.37	150.7	6
minimum	843	0.31	0.31	0.24	0.04	358	0.100	0.064	0.3	1
średnia	1683	0.98	0.98	0.48	14.11	2059	18.9	34.8	59	3
Jura środkowa (n=76)										
maksimum	2750	2.17	2.23	0.68	37.24	121872	61.25	129.60	209.6	4
minimum	530	0.47	0.42	0.00	0.00	0.7	0.24	0.17	0.7	2
średnia	1707	0.95	0.96	0.48	2.27	7134	20.7	35.9	62	3
Jura dolna (n=43)										
maksimum	3105	1.06	1.07	0.52	47.44	58150	130.0	223.0	356.6	5
minimum	518	0.03	0.09	0.03	0.03	306	0.04	0.07	2.1	1
średnia	1899	0.86	0.87	0.46	3.23	4750	26.3	46.2	77	3

Trias górny (n=10)										
maksimum	3644	1.05	1.05	0.51	12.05	2662	67.5	184.4	294.9	6
minimum	1652	0.53	0.54	0.35	0.10	237	1.80	2.72	4.8	3
średnia	2362	0.76	0.79	0.43	2.33	1061	30.4	66.7	109	4
Trias środkowy (n=5)										
maksimum	4022	0.98	0.98	0.49	2.20	3074	91.30	153.17	248.2	6
minimum	2043	0.53	0.53	0.35	0.16	168	16.08	33.33	53.8	4
średnia	2948	0.77	0.77	0.43	0.68	1071	56.3	115.1	190	5
Trias dolny (n=16)										
maksimum	3675	0.95	0.96	0.49	5.35	12838	63.4	223.0	353.5	6
minimum	1815	0.32	0.34	0.24	0.01	159	9.33	15.10	28.2	4
średnia	2721	0.65	0.66	0.39	1.24	1400	41.9	116.3	189	5
Perm (n=20)										
maksimum	4971	0.99	0.99	0.50	0.89	8916	116.04	226.90	361.6	6
minimum	1524	0.25	0.27	0.20	0.02	147	36.20	78.01	131.7	3
średnia	2814	0.67	0.67	0.39	0.17	1248	72.7	174.1	281	5
Karbon (n=6)										
maksimum	4750	0.82	0.82	0.45	63.72	684	75.00	187.60	295.1	6
minimum	3033	0.22	0.22	0.18	0.13	76	0.05	0.35	1.2	4
średnia	3751	0.51	0.51	0.33	12.99	289	46.9	130.9	211	6
Dewon (n=1)										
	4585	0.60	0.61	0.37	0.20	194	59.0	151.9	245.8	6

Kreda górna

Mineralizacja wód w utworach górnokredowych wynosi od 0,9 do 31,9 g/l, przy niskich wartościach średniej (10 g/l) i mediany (5,4 g/l). Najwyższa wartość została wyznaczona w otworze Gronowo 1. Niska mineralizacja i słaby stopień przemian chemicznych, wskazują na kontakt tych wód z wodami infiltracyjnymi lub wręcz o infiltracyjnym pochodzeniu tych wód. Zawartości Na wynoszą średnio 3,2 g/l, a Cl wynoszą średnio 5,7 g/l.

Kreda dolna

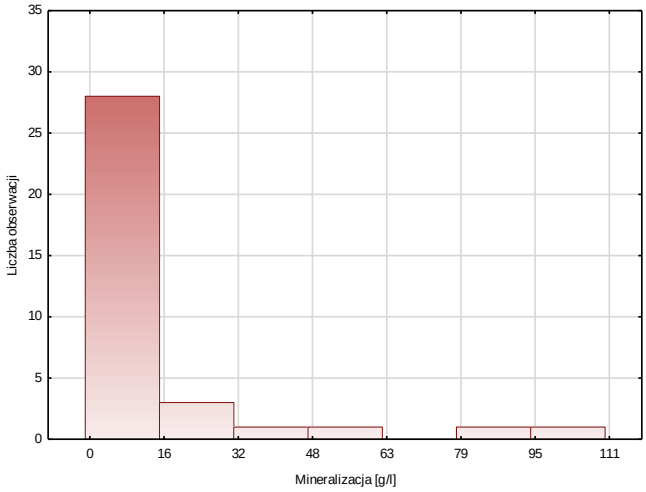


Fig. 5-16 Rozkład wartości mineralizacji ogólnej wód piętra dolnokredowego

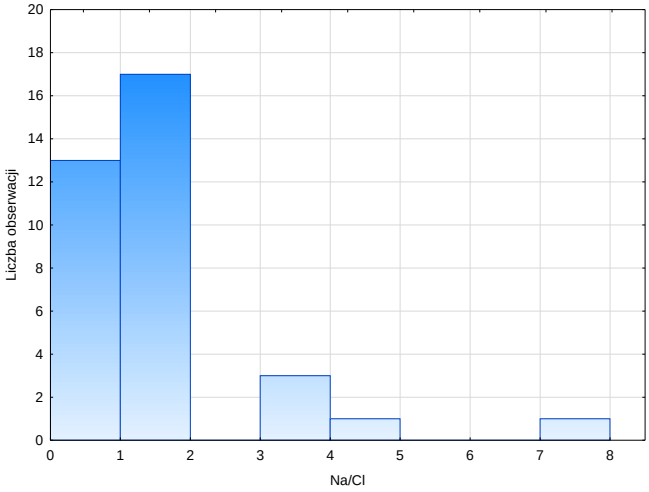


Fig. 5-17 Rozkład wskaźnika Na/Cl w wodach piętra dolnokredowego

Mineralizacja wód w utworach dolnokredowych wynosi od 0,3 do 95,8 g/l, przy średniej 13 g/l i medianie 4,0 g/l (Fig. 5-16). Najwyższa wartość została wyznaczona w otworze Ślesin IGH-1. Wody występujące w poziomie kredy dolnej charakteryzują się słabym stopniem przemian chemicznych (Fig. 5-17) przy Na/Cl = 0,7-7,3 (średnio 1,6), co świadczy o kontakcie tych wód z wodami infiltracyjnymi lub wręcz o infiltracyjnym pochodzeniu tych wód. Zawartości Na wynoszą średnio 4,6 g/l, a Cl wynoszą średnio 7,4 g/l.

Jura górna

Mineralizacja wód w utworach górnojurajskich wynosi od 0,3 do 150,7 g/l, przy wartości średniej 59 g/l i mediany 62 g/l (Fig. 5-18). Najwyższa wartość została wyznaczona w otworze Młyny-1. Wody występujące w poziomie jury górnej charakteryzują się bardzo zróżnicowanym stopniem przemian chemicznych przy Na/Cl = 0,31-2,54 (mediana 0,87) i przewadze wartości w zakresie 0,8-1,2 (Fig. 5-19). Kontakt tych wód z wodami infiltracyjnymi może być długotrwały bądź bardzo ograniczony. Zawartości Na wynoszą średnio 18,9 g/l, a Cl wynoszą średnio 34,8 g/l.

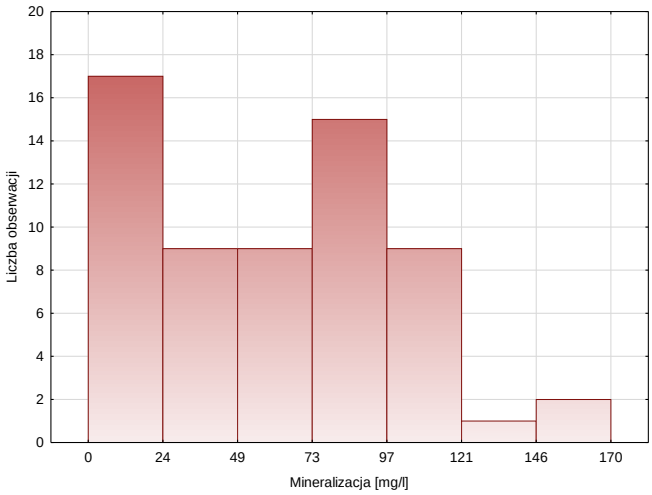


Fig. 5-18 Rozkład wartości mineralizacji ogólnej wód piętra górnojurajskiego

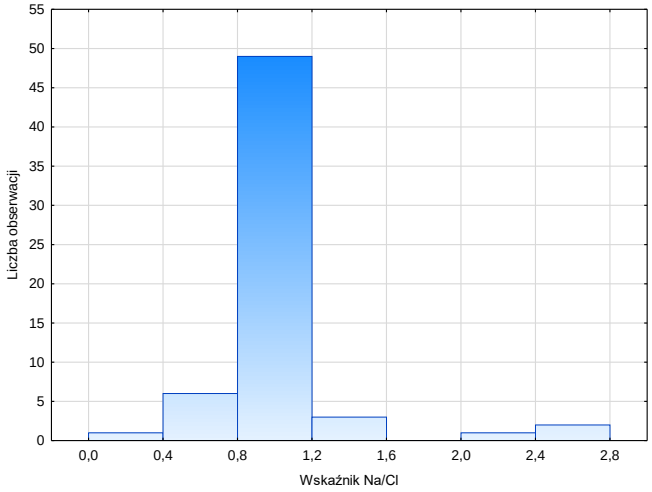


Fig. 5-19 Rozkład wskaźnika Na/Cl w wodach piętra górnojurajskiego

Jura środkowa

Mineralizacja wód doggeru jest bardzo zróżnicowana i waha się od 0,7 do 209,6 g/l, przy średniej 62 g/l (Fig. 5-20). Wartość maksymalną oznaczono w otworze Strzelno IG-1. Solanki jury środkowej charakteryzują się zróżnicowanym stopniem przemian chemicznych przy Na/Cl = 0,40-2,17, ale dominują wartości 0,7-1,0 (Fig. 5-21), co świadczy o ograniczonym lub średnim kontakcie z wodami infiltracyjnymi. Zawartości Na wynoszą od 0,24 do 61,2 g/l, średnio 21,3 g/l, Cl wynoszą od 0,17 do 129,6 g/l, średnio 36,9 g/l.

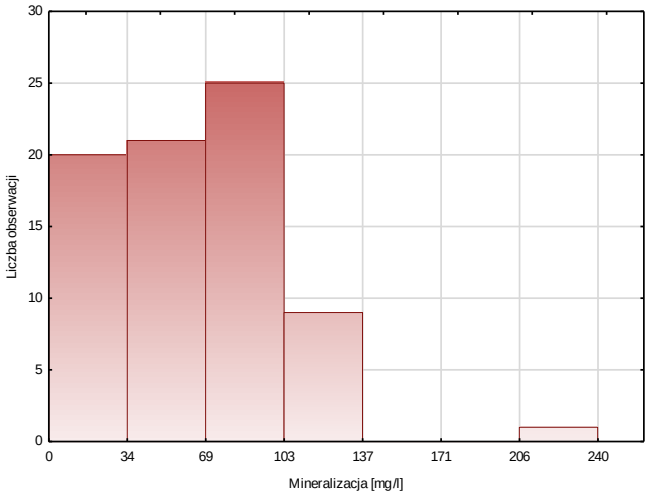


Fig. 5-20 Rozkład wartości mineralizacji ogólnej wód piętra środkowojurajskiego

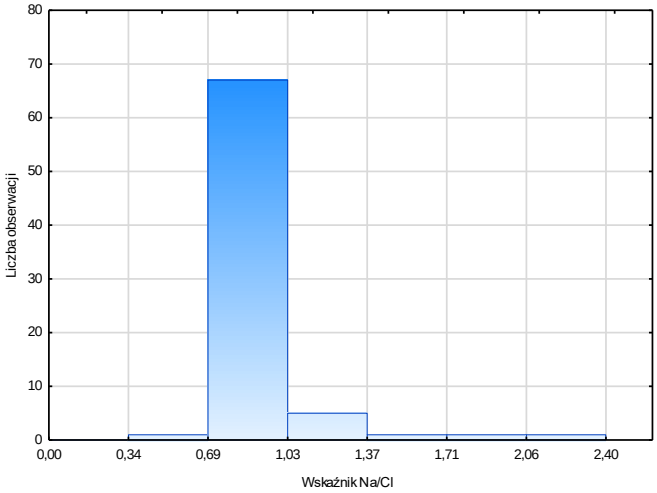


Fig. 5-21 Rozkład wskaźnika Na/Cl w wodach piętra środkowojurajskiego

Jura dolna

Mineralizacja wód w poziomie liasu jest większa od wód w poziomie doggeru i waha się od 2,1 do 356,6 g/l, przy średniej 77 g/l (Fig. 5-22). Maksymalną jej wartość stwierdzono w otworze Florentyna IG-2. Solanki jury dolnej charakteryzują się na ogół średnim stopniem przemian chemicznych przy średniej wartości wskaźnika Na/Cl wynoszącego 0,86, co oznacza utrudniony kontakt z wodami infiltracyjnymi (Fig. 5-23). W składzie solanek dominują Na i Cl, które wynoszą 0,04-130 g/l i 0,07-223 g/l, przy średnich dla Na 26,3 g/l, a dla Cl 46,2 g/l. Utwory jury dolnej charakteryzują się bardzo niskimi wartościami ciśnienia, co nie stwarza warunków dla pionowego (ascensyjnego) przemieszczania się solanek (Bojarski i Płochniewski, red., 1990). Nieznaczny przepływ typu lateralnego może następować w czasie geologicznym od centralnych części niecek ku ich brzegom. Wynika to ze zbyt małych różnic gradientów ciśnień i dość dużej odległości solanek o mineralizacji 100 g/l od granicy wód zwykłych.

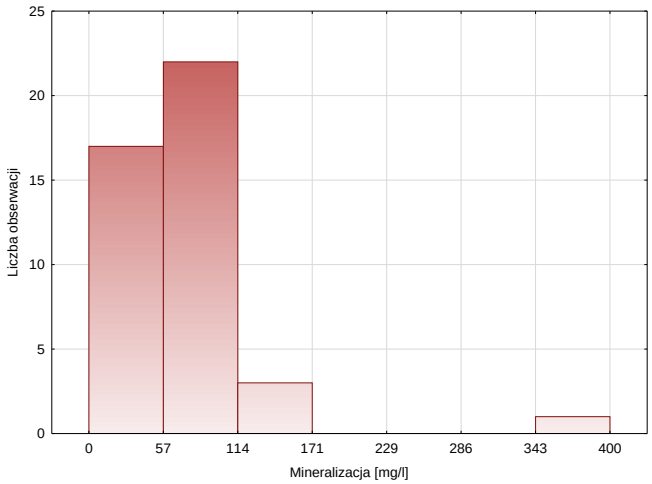


Fig. 5-22 Rozkład wartości mineralizacji ogólnej wód piętra dolnojurajskiego

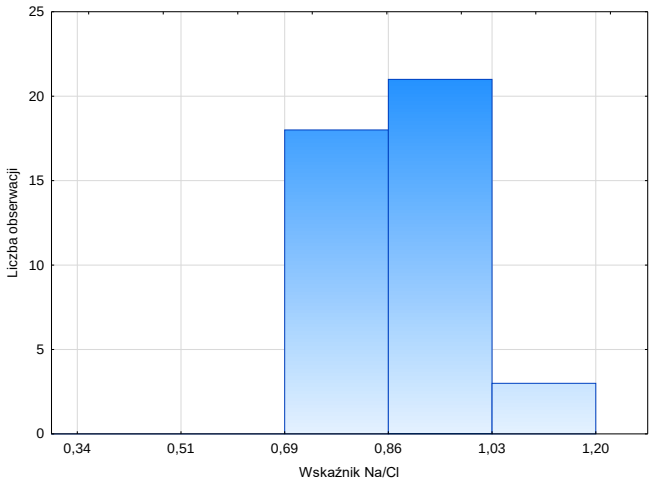


Fig. 5-23 Rozkład wskaźnika Na/Cl w wodach piętra dolnojurajskiego

Trias górny

Mineralizacja wód w poziomie triasu górnego waha się w granicach: od 4,8 g/l do 295 g/l, średnio 109 g/l, przy stabilnych warunkach ciśnieniowych. Najwyższa wartość została wyznaczona w otworze Strzelno IG-1. Zawartości Na wynoszą od 1,8 do 67,5 g/l, średnio 30,4 g/l, Cl wynoszą od 2,7 do 184,4 g/l, średnio 66,7 g/l. Występują tu głównie solanki o wysokim stopniu przeobrażeń chemicznych, o średniej wartości wskaźnika Na/Cl wynoszącej 0,76, oraz lokalnie solanki genetycznie związane z wtórnym ługowaniem soli kamiennych.

Trias środkowy

Mineralizacja wód w utworach triasu środkowego wynosi od 54 do 248 g/l, przy wysokiej wartości średniej wynoszącej 190 g/l. Najwyższa wartość została wyznaczona w otworze Zaosie 2. Wody występujące w poziomie środkowotriasowym charakteryzują się stosunkowo wysokim stopniem przemian chemicznych przy Na/Cl = 0,53-0,98 (średnio 0,77), co świadczy o wysokim stopniu przeobrażeń chemicznych. Zawartości Na wynoszą średnio 56,3 g/l, a Cl wynoszą średnio 115,1 g/l.

Trias dolny

Mineralizacja wód w poziomie dolnotriasowym waha się w granicach: od 28,2 g/l do 353,5 g/l, średnio 189 g/l, przy stabilnych warunkach ciśnieniowych. Najwyższa wartość została wyznaczona w otworze Florentyna IG-2. Wody występujące w poziomie dolnotriasowym charakteryzują się wysokim stopniem przemian chemicznych przy Na/Cl = 0,32-0,95 (średnio 0,65), co świadczy o wysokim stopniu przeobrażeń chemicznych. Zawartości Na wynoszą od 9,3 do 63,4 g/l, średnio 41,9 g/l, Cl wynoszą od 15,1 do 230 g/l, średnio 116,3 g/l. Występują tu solanki reliktowe o wysokim stopniu przeobrażeń chemicznyc, oraz lokalnie solanki genetycznie związane z wtórnym ługowaniem soli kamiennych.

Perm

Mineralizacja wód w poziomach permskich waha się w granicach: od 132 g/l do 362 g/l, przy bardzo wysokiej wartości średniej 281 g/l, przy stabilnych warunkach ciśnieniowych. Zawartości Na wynoszą od 36 do 116 g/l, średnio 72,7 g/l, Cl wynoszą od 78 do 227 g/l, średnio 174,1 g/l.

Są to solanki reliktowe o wysokim stopniu przeobrażeń chemicznych, przy wartości średniej wskaźnika Na/Cl 0,67, oraz lokalnie mogą to być solanki genetycznie związane z wtórnym ługowaniem soli kamiennych.

Karbon

Mineralizacja wód w poziomach karbońskich wynosi średnio 211 g/l, przy stabilnych warunkach ciśnieniowych. Zawartości Na wynoszą średnio 47 g/l, Cl średnio 131 g/l.

Występują tu również solanki reliktowe o wysokim stopniu przeobrażeń chemicznych, przy bardzo niskiej średniej wartości wskaźnika Na/Cl wynoszącej 0,51.

Wartość mineralizacji dla wszystkich poziomów w badanym rejonie wykazuje na ogół tendencję wzrostową wraz z głębokością (Fig. 5-24 i Fig. 5-25), współczynnik korelacji wynosi 0,73, co świadczy o zależności mineralizacji od głębokości stropu badanego poziomu wodonośnego, natomiast współczynnik korelacji typu genetycznego wód z głębokością kolektora wynosi 0,67. Różnice w tych wartościach są spowodowane podwyższoną mineralizacją wskutek kontaktu kolektorów ze strukturami solnymi.

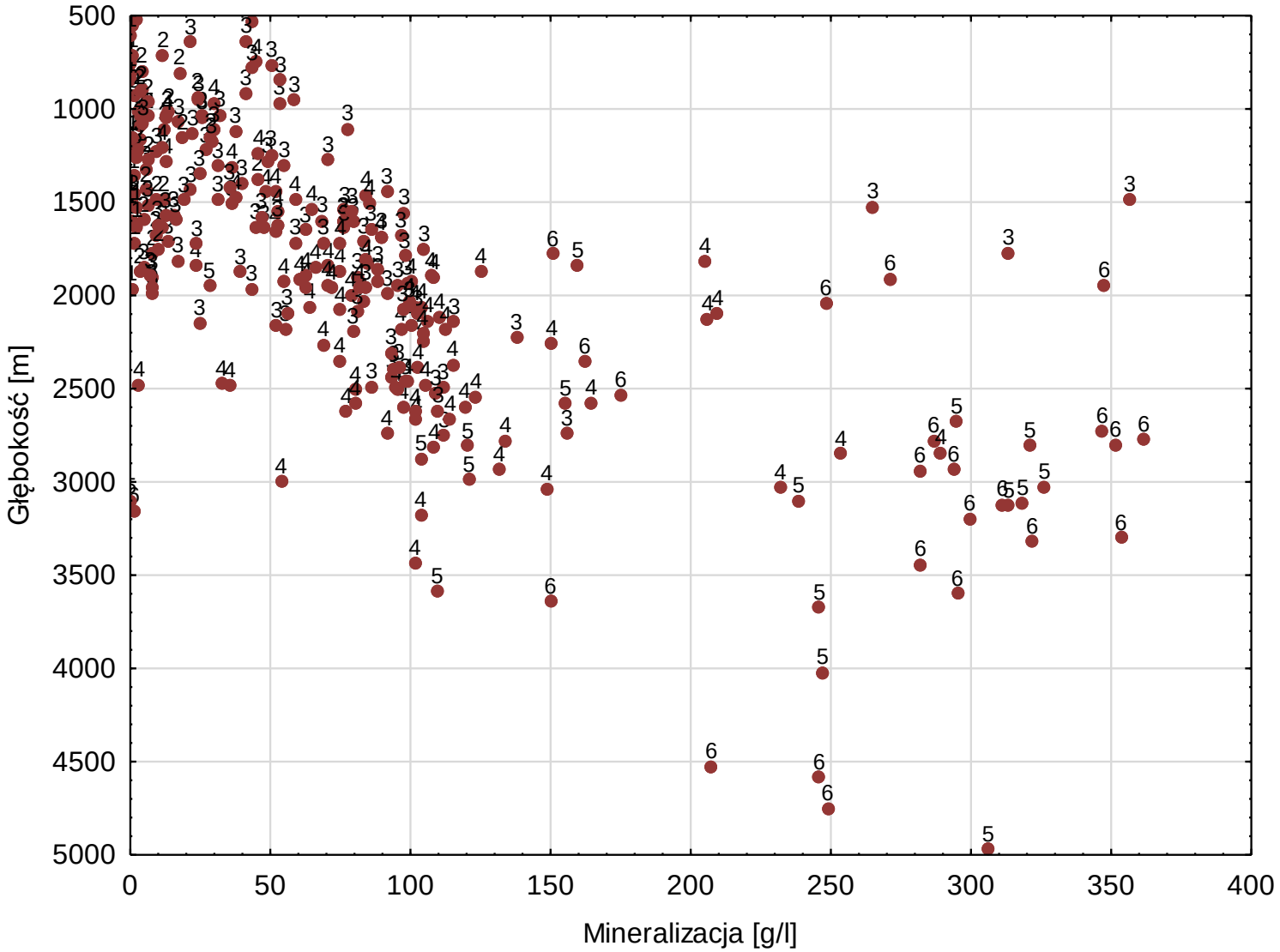


Fig. 5-24 Zależność mineralizacji ogólnej i typów genetycznych wód (etykiety danych) od głębokości w badanym rejonie

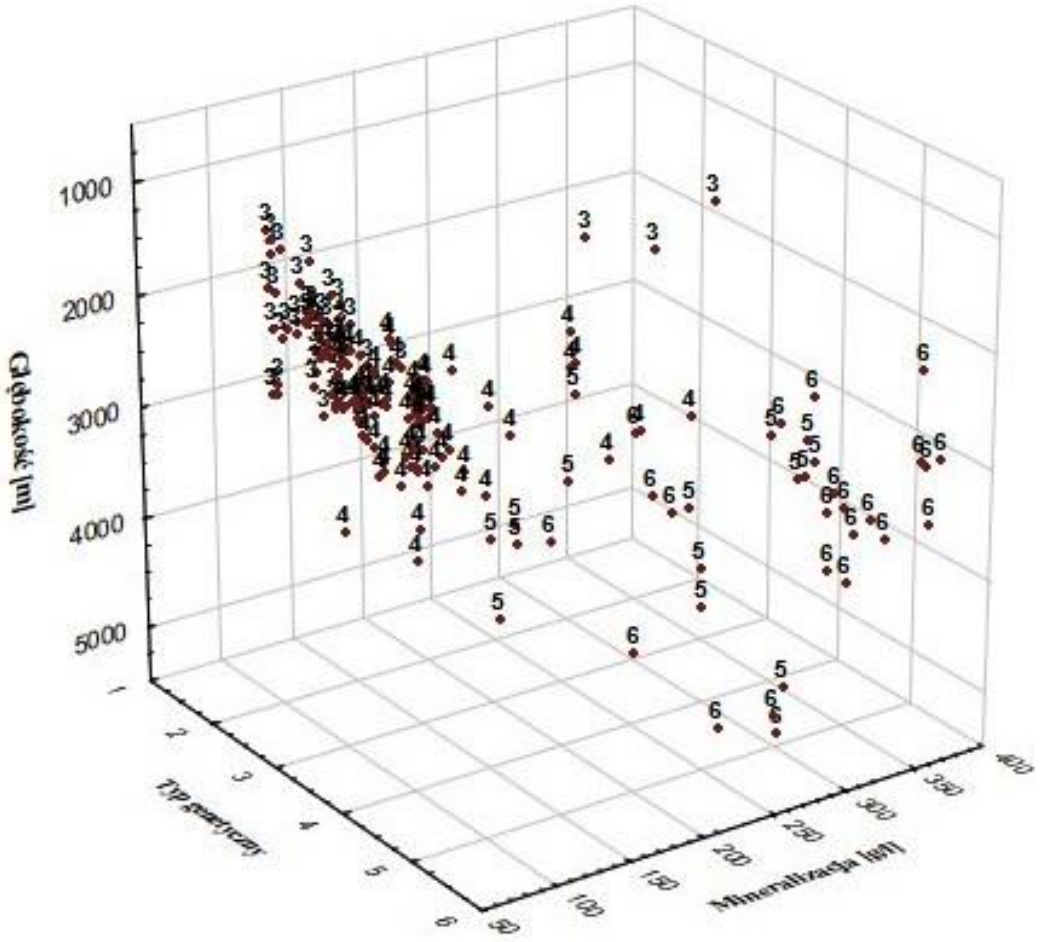


Fig. 5-25 Mineralizacja ogólna wód, typ genetyczny i głębokość kolektora

5.4.2.3 Ocena warunków hydrogeochemicznych w celu magazynowania substancji

Występowanie solanek reliktowych o wysokim stopniu zaawansowania procesów przemian chemicznych, w tym wymiany jonowej, może świadczyć o istnieniu korzystnych warunków do magazynowania substancji w strukturach solankowych.

Na podstawie stopnia przeobrażenia składu chemicznego wód, wskaźników hydrochemicznych i wielkości stężenia solanek określono genetyczne typy wód obrazujące różne warunki do magazynowania. Podstawą klasyfikacji jest uwzględnienie stopnia zaawansowania procesu wymiany jonowej solanek typu chlorkowo-wapniowego wyrażonego stosunkiem Na/Cl, Cl/Br, SO_4-100/Cl. W warunkach odizolowania poziomów zbiornikowych od strefy wymiany wód następuje spadek wartości stosunku Na/Cl<0,75; Cl/Br<300 i SO_4-100/Cl<l.

Duży wzrost zawartości jonu Ca2+ przy jednoczesnym spadku zawartości jonu Na+ świadczy o istnieniu ukierunkowanego procesu przemian chemicznych i odizolowaniu poziomów, co wiąże się z istnieniem korzystnych warunków dla składowania CO_2 i magazynowania wodoru, mieszanin wodoru i gazu ziemnego, gazu ziemnego, czy też sprężonego powietrza. Tabela 5-11 przedstawia typy genetyczne wód oraz warunki do magazynowania tych substancji.

Tabela 5-11 Typy genetyczne wód podziemnych

Typ genetyczny	Stopień metamorfizmu i izolacji wód	Warunki do magazynowania substancji
1	Wskaźnik Na/Cl >1 i/lub niska mineralizacja (M<3 g/l). Strefa aktywnej wymiany, dobre zasilanie wodami infiltracyjnymi, wody współczesne.	nie można magazynować (brak szczelności)
2	Wskaźnik Na/Cl>1, strefa aktywnej wymiany, dobre zasilanie wodami infiltracyjnymi, ale wysoka mineralizacja i typ Cl-Na świadczą o ługowaniu pokładów soli.	nie można magazynować (brak szczelności)
3	Wskaźnik Na/Cl 0,85-0,99, wysoka mineralizacja. Kontakt z wodami infiltracyjnymi istnieje, ale jest utrudniony, przepływ powolny, słaba wymiana. Kolektor rozszczelniony.	magazynowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
4	Wskaźnik Na/Cl 0,66-0,84, wysoka mineralizacja. Dobra, długo trwająca izolacja, wody reliktowe, przepływ może być, ale znikomy, dobra szczelność kolektora, ale nie zupełna.	korzystne warunki do magazynowania
5	Wskaźnik Na/Cl <0,65 i Cl/Br 400-1000, bardzo wysoka mineralizacja. Wody reliktowe, bardzo dobra szczelność kolektora, ale są przesłanki świadczące o zmieszaniu wód z wodami młodszymi (w czasie geologicznym).	bardzo korzystne warunki do magazynowania
6	Wskaźnik Na/Cl <0,65 i Cl/Br <400, bardzo wysoka mineralizacja. Całkowita izolacja, wody reliktowe, stagnujące, bardzo szczelny kolektor.	najlepsze warunki do magazynowania

warunki do magazynowania.

Wydzielono 6 typów genetycznych wód ze względu na stopień metamorfizmu wód i izolacji kolektora (Tabela 5-11). Typy 1 i 2 to wody strefy aktywnej wymiany (niekorzystne warunki do magazynowania), typy 3 i 4 to wody zmetamorfizowane, ale w kontakcie z wodami infiltracyjnymi w przeszłości co stwarza słabo lub średnio korzystne warunki do magazynowania, a typy 5 i 6 to wody reliktowe, z bardzo szczelnych kolektorów o bardzo korzystnych warunkach do magazynowania. Dla każdego kolektora, w którym wykonano analizę chemiczną wody, przyporządkowano jeden z 6 typów (Tabela 5-11).

Postępujący stopień przemian chemicznych wyrażony niskim stosunkiem Na/Cl (mniejszym od 0,9) i wysoką wartością typu genetycznego (4-6) świadczy o reliktowym charakterze wód i odizolowaniu ich od strefy wymiany wód. Natomiast występowanie solanek silnie stężonych (powyżej 200 g/l) o zawartości NaCl powyżej 90% lub zawartości jonu Mg^{2+} powyżej 30% mvali świadczy o zachodzących wtórnych procesach ługowania soli kamiennych lub potasowo-magnezowych. Występowanie wód typu HCO_3-Na świadczy o istnieniu wymiany wód w górnej części basenu i słabej izolacji kolektora.

Analizowano też lokalizację potencjalnych kolektorów względem struktur solnych i wysadów solnych, na ogół silnie zaburzonych tektonicznie.

Typy genetyczne wód poszczególnych pięter wodonośnych

Poniżej omówione zostaną typy genetyczne wód w piętrze triasowym, jurajskim (jura dolna, środkowa i górna) i kredowym (kreda dolna).

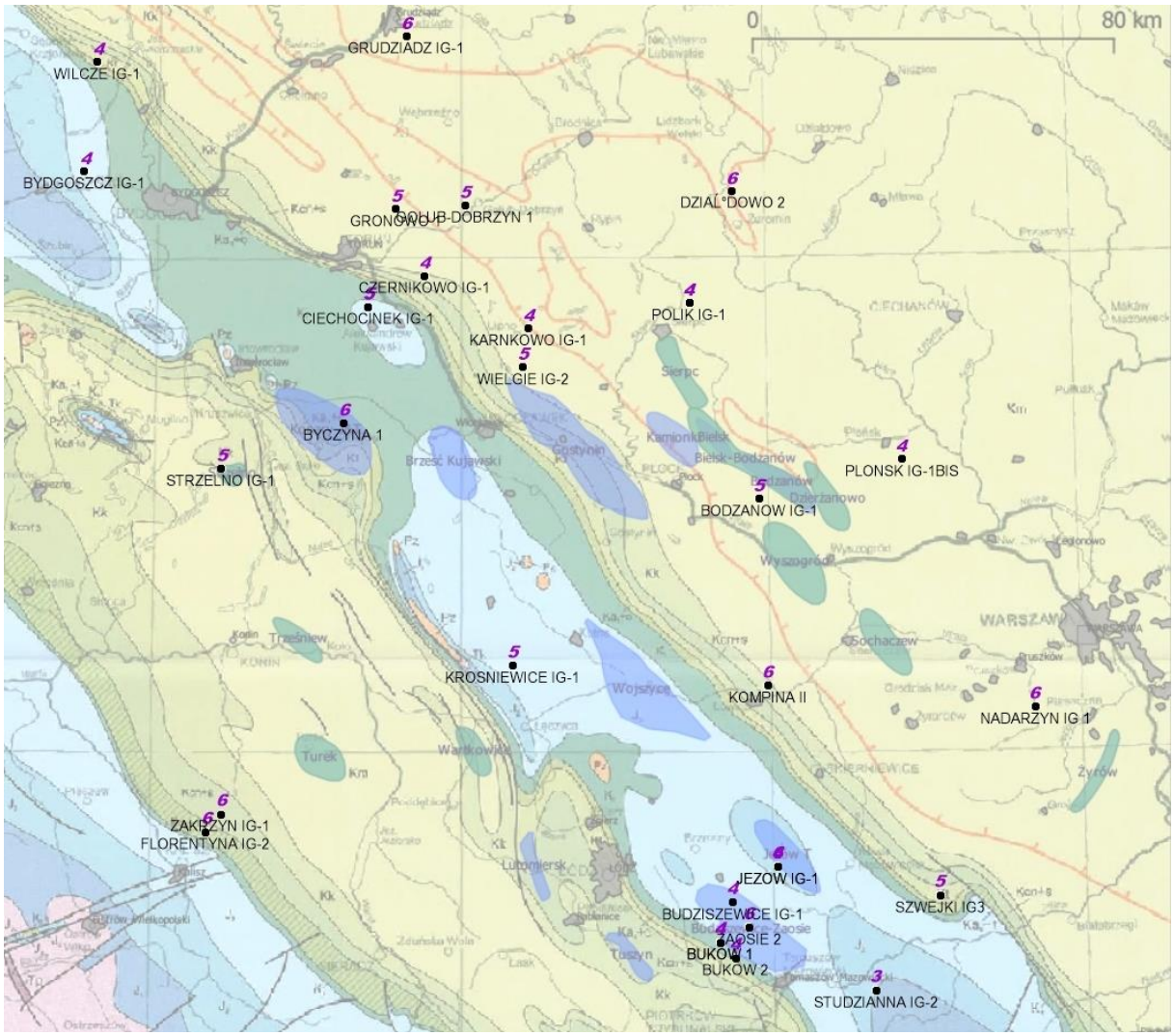


Fig. 5-26 Typy genetyczne wód piętra triasowego w badanym rejonie na tle budowy geologicznej obszaru

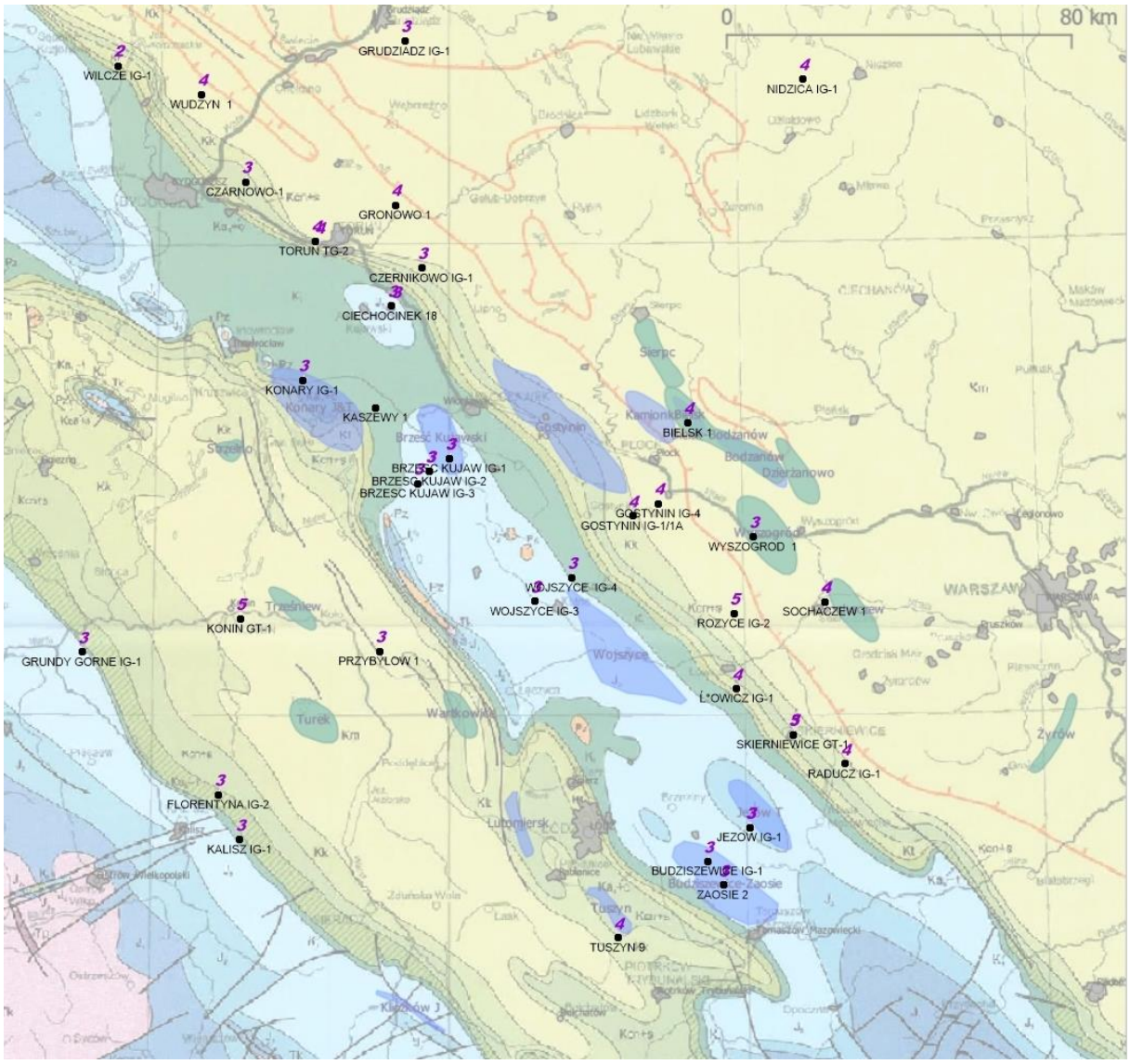


Fig. 5-27 Typy genetyczne wód jury dolnej w badanym rejonie na tle budowy geologicznej obszaru

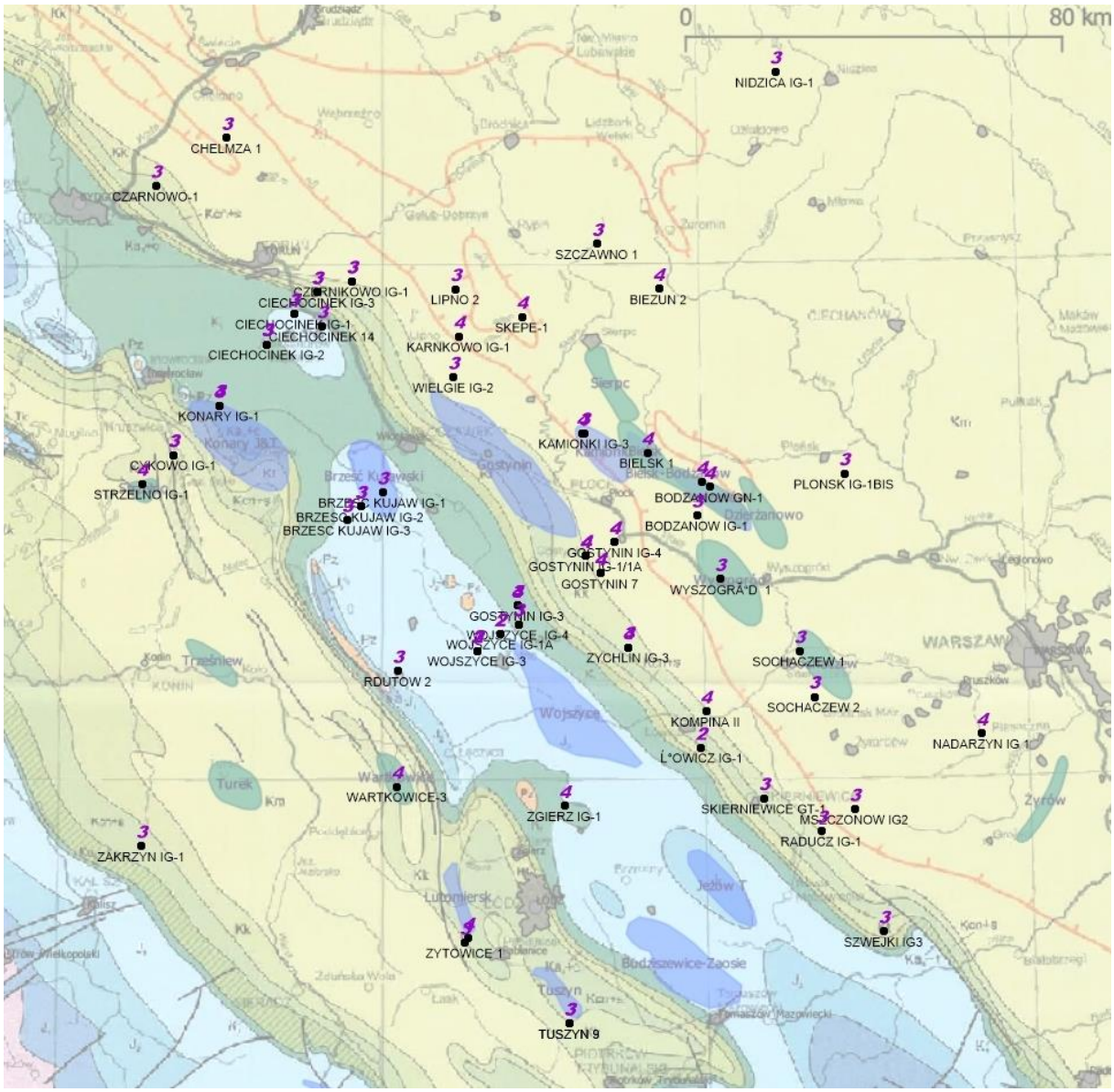


Fig. 5-28 Typy genetyczne wód jury środkowej w badanym rejonie na tle budowy geologicznej obszaru

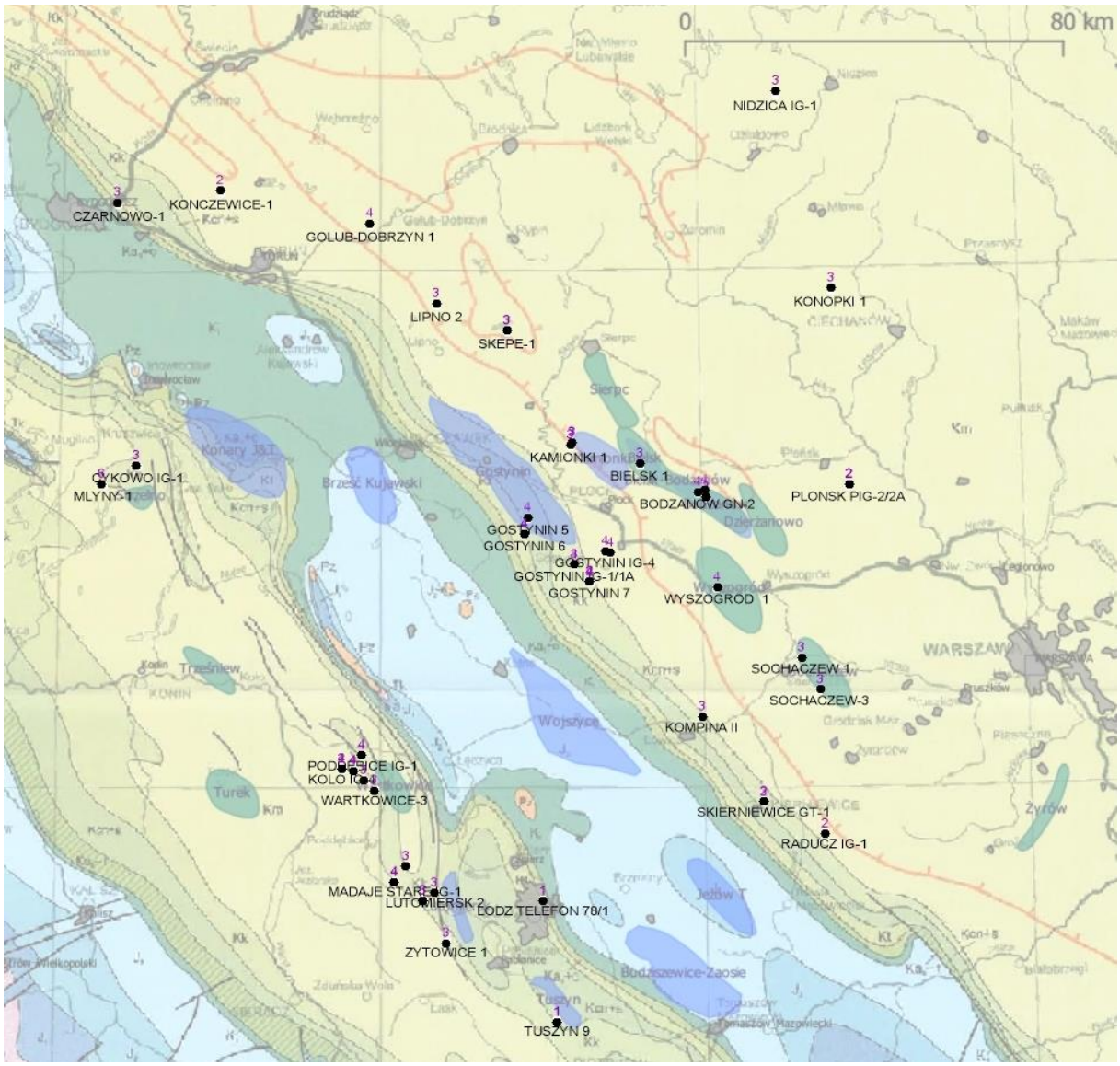


Fig. 5-29 Typy genetyczne wód jury górnej w badanym rejonie na tle budowy geologicznej obszaru

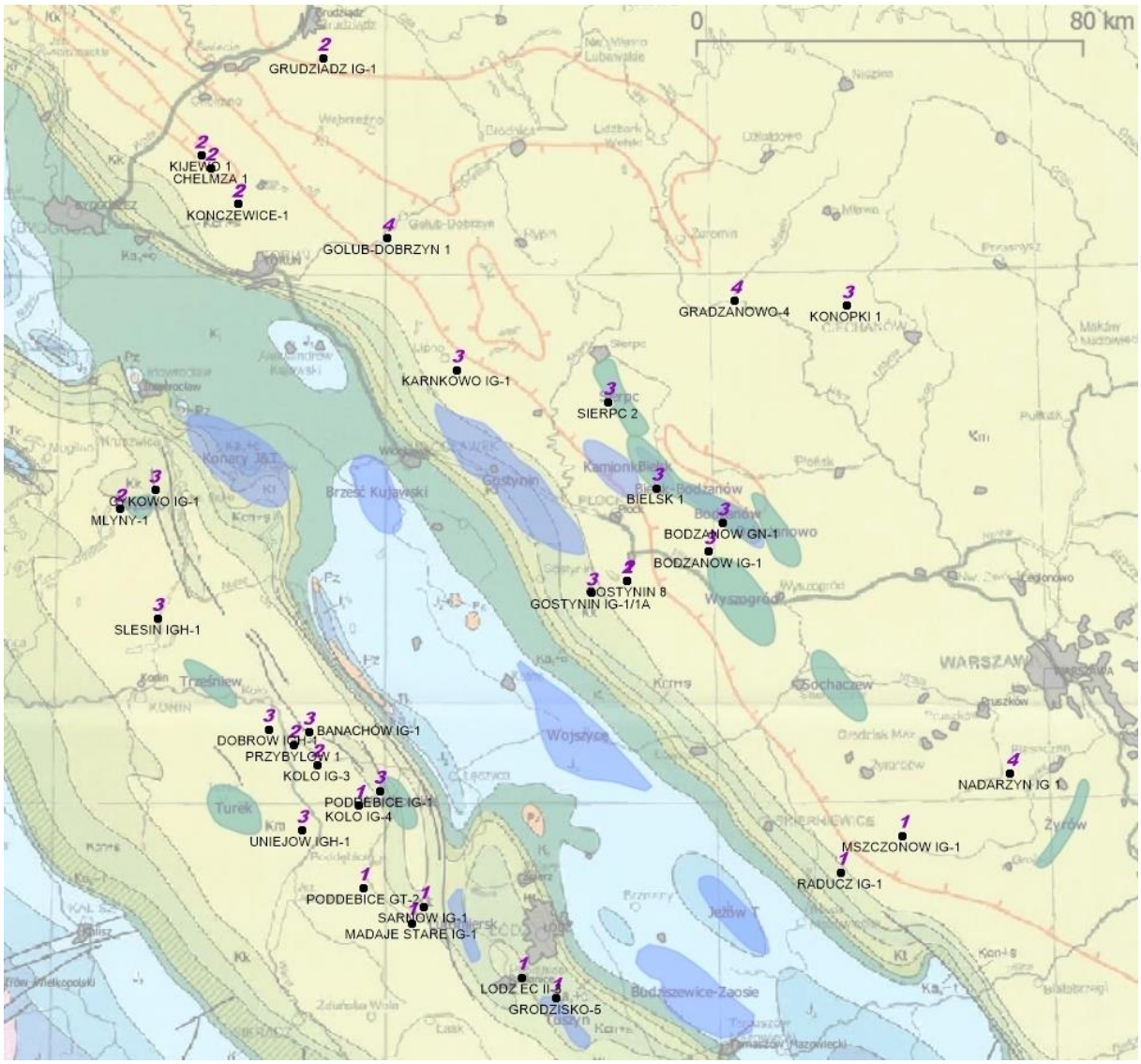


Fig. 5-30 Typy genetyczne wód kredy dolnej w badanym rejonie na tle budowy geologicznej obszaru

Na mapach (Fig. 5-26 – Fig. 5-30) przy każdym otworze zaznaczono symbolem typ genetyczny wody jako wskaźnik stopnia metamorfizmu wód, czyli izolacji kolektora od wód infiltracyjnych, czyli od powierzchni terenu.

W utworach triasowych dominują typy genetyczne 4-6 świadczące o dobrej, długo trwającej izolacji i znikomym przepływie (Fig. 5-26). Szczelność kolektora jest bardzo dobra i jedynie w niektórych miejscach może nie być zupełna (Studzianna IG-1). Warunki do magazynowania substancji są w tych kolektorach bardzo korzystne.

W utworach dolnojurajskich występują głównie typy genetyczne 3 i 4 (Fig. 5-27), czyli wody świadczące o dosyć szczelnych kolektorach. W centralnym rejonie występują wody typu 3, czyli takie, które miały kontakt z wodami infiltracyjnymi, co wskazuje na częściowe rozszczelnienie kolektora i warunkowe magazynowanie po szczegółowym rozpoznaniu kolektora.

W utworach środkowojurajskich również dominują typy genetyczne 3 i 4 (Fig. 5-28), czyli wody świadczące o dosyć szczelnych kolektorach. W części centralnej obszaru mogą występować wody typu 2 czyli wody infiltracyjne, świadczące o nieszczelnych kolektorach (Wojszyce IG-1A i Wojszyce 3)

i niekorzystnych warunkach do magazynowania substancji. Wody typu 3, czyli takie, które miały kontakt z wodami infiltracyjnymi wskazują na częściowe rozszczelnienie kolektora i warunkowe magazynowanie po szczegółowym rozpoznaniu kolektora.

W utworach górnojurajskich występują zróżnicowane typy genetyczne wód, od 1 do 6 (Fig. 5-29), ale dominują wody typu 2 i 3 świadczące o kontakcie z wodami infiltracyjnymi, które wskazują na rozszczelnienie kolektora w wielu miejscach (Tuszyn, Płońsk, Kończewice, Skierniewice). Magazynowanie substancji w większości rejonów nie jest wskazane lub warunkowe, po bardzo szczegółowym rozpoznaniu kolektora.

W utworach dolnokredowych występują głównie typy genetyczne od 1 do 3 (Fig. 5-30), świadczące o kontakcie z wodami infiltracyjnymi, które wskazują na brak dostatecznej szczelności tego kolektora. Magazynowanie substancji w tych utworach w badanym obszarze nie jest generalnie wskazane.

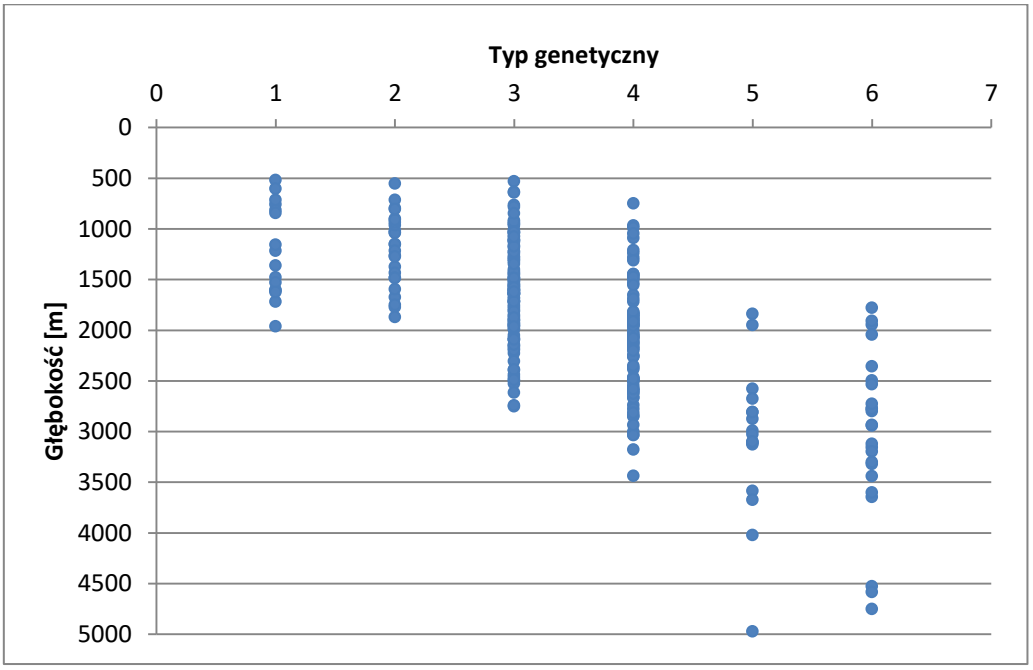


Fig. 5-31 Zależność typów genetycznych wód w badanym rejonie od głębokości kolektora

Wody o typie genetycznym 1 i 2 w badanym rejonie osiągają głębokość występowania 2000 m (Fig. 5-31), co świadczy o głębokim zasięgu występowania wód infiltracyjnych w badanym rejonie. Solanki świadczące o szczelności kolektorów, czyli typy genetyczne od 4 do 6 występują na głębokościach ponad 700 m, głównie w kolektorach triasowych oraz dolnojurajskim.

Wykonana ocena warunków do składowania dwutlenku węgla oraz magazynowania wodoru, mieszanin wodoru i gazu ziemnego, gazu ziemnego, czy też sprężonego powietrza w strukturach solankowych opiera się wyłącznie na pozyskanych analizach fizyko-chemicznych wód i może być tylko wskazówką, wstępną sugestią co do warunków magazynowania ww. substancji w tych strukturach. W celu wytypowania struktur solankowych przydatnych do magazynowania ww. należy dodatkowo wykonać bardziej szczegółową analizę warunków hydrogeologicznych, obejmującą również modelowanie hydrogeologiczne.

5.4.2.4 Typy genetyczne w wybranych strukturach

Struktura Bielsk-Bodzanów

W rejonie struktury Bielsk-Bodzanów występuje typ chemiczny wód Cl-Na, mineralizacja wody w poziomie kredy dolnej wynosi od 1,2 g/l do 28,9 g/l, a w piętrze jurajskim wynosi 15,4 g/l do 111,6 g/l. W poziomie kredy dolnej występuje typ genetyczny 3, a w poziomach jurajskich występują typy genetyczne 3 i 4 (Tabela 5-12).

Warunki do magazynowania substancji (Tabela 5-15) są uzależnione od głębokości.

W poziomie kredy dolnej:

- na głębokości poniżej 1100 m - niekorzystne warunki magazynowania,
- głębokość 1100 – 1500 m - magazynowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora (np. w rejonie otworu Bielsk 1).

W poziomach jurajskich:

- głębokość 1100 – 1500 m - magazynowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora,
- głębokość ponad 1500 m – korzystne warunki magazynowania.

Tabela 5-12 Typy chemiczne i genetyczne wód oraz warunki magazynowania w strukturze Bielsk-Bodzanów

Nazwa otworu	Poz. wod.	Strop poz. wod. [m]	Typ chemicz wody	Wskaźnik Na/Cl	Mineralizacja [g/l]	Typ genetyczny	Geneza wody	Warunki do magazynowania gazów
BIELSK 1	Cr1	1165	Cl-Na	0.97	3.3	3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
BIELSK 1	J3	1435	Cl-Na	0.93	21.6	3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
BIELSK 1	J2	2060	Cl-Na	0.84	64.1	4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
BIELSK 1	J1	2600	Cl-Na	0.87	97.4	4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
BODZANÓW GN-1	Cr1	1010	Cl-HCO3-Na	1.30	3.1	3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	nie można lokować, brak szczelności
BODZANÓW GN-1	J3	1567	Cl-Na	0.92	15.4	3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
BODZANÓW GN-1	J3	1844	Cl-Na	0.79	70.7	4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
BODZANÓW GN-1	J2	1943	Cl-Na	0.89	70.3	4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
BODZANÓW GN-2	J3	1460	Cl-Na	0.82	84.2	4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
BODZANÓW GN-2	J2	1927	Cl-Na	0.83	100.2	4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
BODZANÓW GN-3	J3	1502	Cl-Na	0.81	85.4	4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
BODZANÓW IG-1	Cr1	1457	Cl-Na	0.91	1.2	3	wody zmieszane z	lokowanie warunkowe, po

							infiltracyjnymi	szczegółowym rozpoznaniu kolektora
BODZANÓW IG-1	J2	2495	Cl-Na	0.97	111.6	3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
SIERPC 2	Cr1	1172	Cl-Na	0.95	28.9	3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora

Struktury: Budziszewice-Zaosie i Konary

W strukturze Budziszewice-Zaosie występują typy chemiczne wody: Cl-Na, Cl-SO_4-Ca, Cl-Ca, a mineralizacja wody w poziomie jury dolnej wynosi od 2,1 g/l do 5,6 g/l. W poziomie jury dolnej występują typy genetyczne 1 i 3 (Tabela 5-13).

Warunki do magazynowania substancji są uzależnione od głębokości.

W poziomie jury dolnej:

- na głębokości 518 m (kolektor Ja1-Jto3) - niekorzystne warunki magazynowania
- na głębokościach ponad 1000 m - magazynowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora.

W strukturze Konary występuje typ chemiczny wody Cl-Na, a mineralizacja wody w poziomie jury środkowej wynosi od 41,4 g/l do 53,7 g/l. W poziomach jury środkowej i dolnej występują typy genetyczne 3 i 4, a od głębokości 650 m sugeruje się magazynowanie substancji warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora (Tabela 5-13).

Tabela 5-13 Typy chemiczne i genetyczne wód oraz warunki magazynowania w strukturach Budziszewice-Zaosie i Konary

Nazwa otworu	Poz. wod.	Strop poz. wod. [m]	Typ chemicz wody	Wskaźnik Na/Cl	Mineralizacja [g/l]	Typ genetyczny	Geneza wody	Warunki do magazynowania gazów
BUDZISZEWICE IG-1	J1	1325	Cl-Na	0.96	5.6	3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
ZAOSIE 2	J1	518	Cl-SO4-Ca-Na	0.76	2.1	1	wody infiltracyjne	nie można lokować, brak szczelności
ZAOSIE 2	J1	1077	Cl-Ca	0.03	4.6	3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
KONARY IG-1	J2	635	Cl-Na	0.87	41.4	3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
KONARY IG-1	J2	748	Cl-Na	0.81	45.1	4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
KONARY IG-1	J2	783	Cl-Na	0.86	43.5	3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
KONARY IG-1	J2	847	Cl-Na	0.88	53.7	3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
KONARY IG-1	J1	1280	Cl-Na	0.90	49.0	3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora

Struktura Wojszyce

W strukturze Wojszyce występuje typ chemiczny wody Cl-Na, a mineralizacja wody w poziomie jury środkowej wynosi od 3,3 g/l do 104,3 g/l, a w poziomie jury dolnej wynosi od 16,2 g/l do 84,0 g/l. W poziomie jury środkowej występują typy genetyczne 2, 3 i 4 a w poziomie jury dolnej występują typy genetyczne 3 i 4 (Tabela 5-14).

Tylko otwór Kaszewy 1 leży w obrębie struktury, pozostałe zlokalizowane są w jej sąsiedztwie

Warunki do magazynowania substancji są uzależnione od głębokości.

W poziomie jury środkowej:

- na głębokości poniżej 900 m - niekorzystne warunki magazynowania,
- głębokość 1000 – 1875 - magazynowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora.
- głębokość ponad 2200 m – korzystne warunki magazynowania.

W poziomie jury dolnej:

- głębokość 1580 – 2000 - magazynowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora (kolektor Ja1-Jto3 w otworach w sąsiedztwie struktury),
- Kaszewy 1 – na głębokości od 1315 m - korzystne warunki magazynowania (a w przedziale 1070 – 1315 m magazynowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektorów).

Tabela 5-14 Typy chemiczne i genetyczne wód oraz warunki magazynowania w strukturze Wojszyce

Nazwa otworu	Poz. wod.	Strop poz. wod. [m]	Typ chemicz wody	Wskaźnik Na/Cl	Mineralizacja [g/l]	Typ genetyczny	Geneza wody	Warunki do magazynowania gazów
WOJSZYCE IG-4	J2	1572	Cl-Na	1.58	12.5	3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
WOJSZYCE IG-4	J2	1813	Cl-Na	1.30	16.9	3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
WOJSZYCE IG-4	J1	1957	Cl-Na	1.03	84.0	3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
WOJSZYCE IG-1A	J2	715	Cl-Na	1.18	11.7	2	wody infiltracyjne, rozpuszczanie soli	nie można lokować, brak szczelności
WOJSZYCE IG-1A	J2	910	HCO3-Cl-Na	1.99	3.3	2	wody infiltracyjne, rozpuszczanie soli	nie można lokować, brak szczelności
WOJSZYCE IG-3	J2	1485	Cl-Na	0.97	31.2	3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
WOJSZYCE IG-3	J1	1580	Cl-Na	0.94	46.7	3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
KASZEWY 1	J2	1070	Cl-Na	0.85	4.3	3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
KASZEWY 1	J1	1315	Cl-Na	0.66	16.2	4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
KASZEWY 1	J1	1510	Cl-Na	0.72	32.7	4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
ŻYCHLIN IG-3	J2	1875	Cl-Na	0.95	39.3	3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
ŻYCHLIN IG-3	J2	2203	Cl-Na	0.84	104.3	4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania

5.5.2.5 Podsumowanie i wnioski

W badanym rejonie wody o typie genetycznym 1 i 2 osiągają głębokość występowania 2000 m, co świadczy o głębokim zasięgu występowania wód infiltracyjnych.

Solanki świadczące o szczelności kolektorów, czyli typy genetyczne od 4 do 6 mogą występować już na głębokości 700 m, ale korzystne warunki występują generalnie na głębokości ponad 1500 m.

W wytypowanych strukturach, typy genetyczne wód wskazują najczęściej magazynowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora.

Wykonana ocena warunków do magazynowania gazów w strukturach solankowych opiera się wyłącznie na pozyskanych analizach fizyko-chemicznych wód i może być tylko wskazówką, wstępną sugestią co do warunków magazynowania ww. substancji w tych strukturach.

Tabela 5-15 Skład chemiczny i parametry fizyko-chemiczne wód w otworach w badanym rejonie

Nazwa otworu	Poziom wodo-nośny	Strop poziomu wodonoś [m]	Data analizy	pH	Typ chemiczny wody	Wskaźnik Na/Cl	Wskaźnik (Na+K)/Cl	Wskaźnik Na/Na+Cl	WskaźnikSO_4x100/Cl	Wskaźnik Cl/Br	Mineralizacja [g/l]	Geneza wody wg wskaźników	Uwagi	Typ genetyczny wg wskaźników	Typ genetyczny wg izotopów	Typ genetyczny - ekspercki	Geneza wody - ekspercka	Warunki do magazynowania CO_2, H, metanu
BANACHÓW IG-1	Cr1	2182	31-10-1986	6.48	Cl-Na	1.03	1.03	0.51	3.59	5207	55.3	wody infiltracyjne, rozpuszczanie soli	możliwe skażenie płuczką	2		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
BIELSK 1	Cr1	1165	25-06-1966	7	Cl-Na	0.97	0.97	0.49	2.19		3.3	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
BIELSK 1	J3	1435	23-06-1966	7	Cl-Na	0.93	0.93	0.48	21.05		21.6	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
BIELSK 1	J2	2060	11-06-1966	6.5	Cl-Na	0.84	0.84	0.46	0.00		64.1	dobra izolacja, ale nie pełna		4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
BIELSK 1	J1	2600	02-05-1966	6.5	Cl-Na	0.87	0.87	0.47	1.43		97.4	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
BIEŻUŃ 2	J2	2507	28-09-1976	8.2	Cl-Na	0.89	0.89	0.47	0.52		80.3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	możliwe skażenie płuczką	3		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
BODZANÓW GN-1	Cr1	1010	22-10-1988	12.2	Cl-HCO3-Na	1.30	1.33	0.57	12.43		3.1	wody infiltracyjne	możliwe skażenie płuczką	1		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	nie można lokować, brak szczelności
BODZANÓW GN-1	J3	1567	04-08-1988	6.9	Cl-Na	0.92	0.92	0.48	2.10	2276	15.4	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
BODZANÓW GN-1	J3	1844	31-08-1988	6.2	Cl-Na	0.79	0.80	0.44	0.71	7451	70.7	dobra izolacja, ale nie pełna		4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
BODZANÓW GN-1	J2	1943	11-09-1988	6.6	Cl-Na	0.89	0.89	0.47	0.92	8487	70.3	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
BODZANÓW GN-2	J3	1460	29-12-1988	7	Cl-Na	0.82	0.82	0.45	0.99		84.2	dobra izolacja, ale nie pełna		4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
BODZANÓW GN-2	J2	1927	04-02-1989	6.9	Cl-Na	0.83	0.83	0.45	0.75	1897	100.2	dobra izolacja, ale		4		4	dobra izolacja, ale	korzystne warunki

												nie pełna					nie pełna	lokowania
BODZANÓW GN-3	J3	1502	27-06-1989	6.3	Cl-Na	0.81	0.82	0.45	0.96		85.4	dobra izolacja, ale nie pełna		4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
BODZANÓW IG-1	Cr1	1457	31-07-1982	7	Cl-Na	0.91	0.99	0.48	2.07	3051	1.2	wody zmieszane z infiltracyjnymi	możliwe skażenie płuczką	3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
BODZANÓW IG-1	J2	2495	24-07-1982	-	Cl-Na	0.97	0.97	0.49	1.00	1251	111.6	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
BODZANÓW IG-1	T1	3586	15-07-1982	6	Cl-Na	0.88	0.89	0.47	0.98	12838	109.5	wody zmieszane z infiltracyjnymi	rozcieńczona wodą techniczną	3		5	wody reliktowe	bardzo korzystne warunki do lokowania
BODZANÓW IG-1	C	4526	18-04-1982	-	Cl-Na-Ca	0.62	0.62	0.38	0.18		207.3	wody reliktowe, całkowita izolacja		6		6	wody reliktowe, całkowita izolacja	najlepsze warunki do lokowania
BRONISZEWICE 1	P1	3319	13-08-1995	5.54	Cl-Na-Ca	0.62	0.62	0.38	0.13	223	328.6	wody reliktowe, całkowita izolacja		6		6	wody reliktowe, całkowita izolacja	najlepsze warunki do lokowania
BRZEŚĆ KUJAWSKI IG-1	J2	947	07-04-1988	7.38	Cl-Na	0.91	0.92	0.48	0.34	1936	24.4	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
BRZEŚĆ KUJAWSKI IG-1	J1	1598	31-03-1988	7.1	Cl-Na	0.91	0.91	0.48	1.30	2602	68.5	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
BRZEŚĆ KUJAWSKI IG-1	J1	1899	27-03-1988	10.7	Cl-Na	0.92	0.93	0.48	2.14	5353	81.0	wody zmieszane z infiltracyjnymi	możliwe skażenie płuczką	3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
BRZEŚĆ KUJAWSKI IG-2	J2	1042	06-05-1988	6.24	Cl-Na	0.90	0.91	0.47	0.99	32907	25.6	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
BRZEŚĆ KUJAWSKI IG-2	J2	1130	05-05-1988	5.65	Cl-Na	0.94	0.95	0.49	1.08		22.3	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora

BRZEŚĆ KUJAWSKI IG-2	J1	1305	01-05-1988	6.04	Cl-Na	0.94	0.95	0.48	0.94	39894	31.2	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
BRZEŚĆ KUJAWSKI IG-2	J1	1508	24-04-1988	5.8	Cl-Na	0.94	0.95	0.49	1.39		36.0	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
BRZEŚĆ KUJAWSKI IG-3	J2	1222	12-11-1987	6.2	Cl-Na	0.94	0.95	0.48	1.06	35161	26.9	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
BRZEŚĆ KUJAWSKI IG-3	J1	1633	08-11-1987	5.93	Cl-Na	0.93	0.94	0.48	1.30	58150	44.7	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
BUDZISZEWICE IG-1	J1	1325	09-04-1983	6.8	Cl-Na	0.96	1.01	0.49	1.21	770	5.6	wody infiltracyjne	możliwe skażenie płuczką	1		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
BUDZISZEWICE IG-1	T1	3436	29-03-1983	6.3	Cl-Na-Ca	0.70	0.71	0.41	1.02	875	101.5	dobra izolacja, ale nie pełna		4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
BUKÓW 1	T3	1652	16-07-1978	9.6	Cl-Na	0.74	0.74	0.43	0.34		51.7	dobra izolacja, ale nie pełna	woda z płuczką	4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
BUKÓW 1	T2	3000	11-07-1978	10.2	Cl-Na	0.74	0.74	0.43	0.34		53.8	dobra izolacja, ale nie pełna	możliwe skażenie płuczką	4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
BUKÓW 2	T2	2576	22-08-1986	12.2	Cl-Na	0.98	0.98	0.49	0.55	168	164.5	wody zmieszane z infiltracyjnymi	woda z płuczką	3		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
BYCZYNA 1	T3	2495	24-08-1984	7.6	Cl-Na	0.53	0.54	0.35	1.27		94.7	wody reliktowe		6		6	wody reliktowe, całkowita izolacja	najlepsze warunki do lokowania
BYDGOSZCZ IG-1	T3	1870	01-05-1989	8.62	Cl-Na	1.05	1.05	0.51	12.05	2308	125.1	wody infiltracyjne, rozpuszczanie soli	możliwe skażenie płuczką	2		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
CHEŁMŻA 1	Cr1	795	14-08-1973	7.4	Cl-Na	1.04	1.04	0.51	0.67	4795	4.0	wody infiltracyjne, rozpuszczanie soli		2		2	wody infiltracyjne, rozpuszczanie soli	nie można lokować, brak szczelności
CHEŁMŻA 1	J2	1685	13-06-	6.6	Cl-Na	0.89	0.89	0.47	0.47	121872	89.7	wody		3		3	wody	lokowanie

			1973									zmieszane z infiltracyjnymi					zmieszane z infiltracyjnymi	warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
CIECHOCINEK 14 (TERMA I)	J2	530	20-06-2008	6.9	Cl-Na	0.86	0.88	0.46	0.27	7990	43.6	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
CIECHOCINEK 16 (TERMA II)	J1	966	20-06-2008	6.6	Cl-Na	0.88	0.89	0.47	0.99	734	53.1	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
CIECHOCINEK 18 (TERMA III)	J1	1275	28-05-1993	6.81	Cl-Na	0.87	0.87	0.47	1.01	1107	70.6	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
CIECHOCINEK IG-1	J2	765	10-07-1989	6.96	Cl-Na	0.88	0.89	0.47	0.03	1034	50.4	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
CIECHOCINEK IG-1	J2	950	26-06-1989	6.89	Cl-Na	0.88	0.89	0.47	0.61	1055	58.6	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
CIECHOCINEK IG-1	T1	1839	22-06-1989	6.51	Cl-Na-Ca	0.61	0.61	0.38	1.08	520	159.7	wody reliktowe		5		5	wody reliktowe	bardzo korzystne warunki do lokowania
CIECHOCINEK IG-1	T1	1949	16-06-1989	7.5	Cl-Na	0.95	0.96	0.49	3.02	558	28.2	wody zmieszane z infiltracyjnymi	możliwe skażenie płuczką	3		5	wody reliktowe	bardzo korzystne warunki do lokowania
CIECHOCINEK IG-2	J2	1118	09-06-1990	10.6	Cl-Na	0.94	0.94	0.48	0.94	1082	37.4	wody zmieszane z infiltracyjnymi	możliwe skażenie płuczką	3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
CIECHOCINEK IG-2	J2	1400	07-06-1990	6.37	Cl-Na	0.92	0.93	0.48	0.27	1283	39.8	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
CIECHOCINEK IG-2	J2	1649	06-06-1990	6.76	Cl-Na	0.88	0.88	0.47	0.02	1334	62.4	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
CIECHOCINEK IG-	J2	1930	29-05-	7.48	Cl-Na	0.89	0.89	0.47	0.57	1484	98.7	wody		3		3	wody	lokowanie

2			1990									zmieszane z infiltracyjnymi					zmieszane z infiltracyjnymi	warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
CIECHOCINEK IG-3	J2	1300	23-07-1988	6.04	Cl-Na	0.95	0.95	0.49	0.52	72800	55.0	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
CIECHOCINEK IG-3	J2	1601	20-07-1988	5.35	Cl-Na	0.92	0.92	0.48	1.23	20375	76.0	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
CYKOWO IG-1	Cr1	917	24-02-1973	7	Cl-Na	0.88	0.88	0.47	2.01	1141	41.2	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	nie można lokować, brak szczelności
CYKOWO IG-1	J3	1105	17-02-1973	7	Cl-Na	0.85	0.86	0.46	2.13	1224	77.6	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
CYKOWO IG-1	J2	1556	15-10-1972	6	Cl-Na	0.86	0.87	0.46	1.29	1205	97.7	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
CYKOWO IG-1	J2	1753	31-10-1972	6	Cl-Na	0.89	0.90	0.47	1.34	1396	104.9	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
CZARNOWO-1	J3	1071	05-10-1989	8.2	Cl-Na	1.52	1.52	0.60	21.06		17.3	wody infiltracyjne?, rozpuszczanie soli	możliwe skażenie płuczką	2		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
CZARNOWO-1	J2	1606	04-09-1989	7.3	Cl-Na	0.91	0.91	0.48	0.02	1315	79.6	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
CZARNOWO-1	J1	1680	25-08-1989	7.1	Cl-Na	0.92	0.92	0.48	0.56	1489	96.5	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
CZERNIKOWO IG-1	J2	1444	13-01-1990	6.88	Cl-Na	0.92	0.92	0.48	0.50	1448	91.5	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora

CZERNIKOWO IG-1	J2	1544	08-01-1990	6.82	Cl-Na	0.89	0.90	0.47	0.52	1521	76.5	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
CZERNIKOWO IG-1	J1	1788	29-12-1989	6.75	Cl-Na	0.96	0.96	0.49	0.94	1364	97.9	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
CZERNIKOWO IG-1	T3	2260	10-11-1989	6.22	Cl-Na	0.79	0.79	0.44	0.58	467	150.4	wody zmieszane z infiltracyjnymi		4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
DOBRÓW IGH-1	Cr1	2438	18-02-1980	7	Cl-Na	0.92	0.92	0.48	2.06		93.4	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
DZIAŁDOWO 2	T1	2357	13-05-1967	6.5	Cl-Na-Ca	0.61	0.61	0.38	1.12		162.1	wody reliktowe		6		6	wody reliktowe, całkowita izolacja	najlepsze warunki do lokowania
DZIAŁDOWO 2	P2	2940	10-05-1967	6.2	Cl-Na	0.61	0.61	0.38	0.89		281.7	wody reliktowe, całkowita izolacja		6		6	wody reliktowe, całkowita izolacja	najlepsze warunki do lokowania
FLORENTYNA IG-2	J1	1487	17-03-1982	7	Cl-Na	0.90	0.90	0.47	0.03	306	356.6	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
FLORENTYNA IG-2	T1	2800	08-03-1982	5	Cl-Ca-Na	0.39	0.40	0.28	0.03	306	351.5	wody reliktowe, całkowita izolacja		6		6	wody reliktowe, całkowita izolacja	najlepsze warunki do lokowania
GOLUB-DOBRZYŃ 1	Cr1	1283	21-12-1988	8.9	Cl-Na	0.85	0.86	0.46	4.04	861	13.1	wody zmieszane z infiltracyjnymi	możliwe skażenie płuczką	3		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
GOLUB-DOBRZYŃ 1	J3	1866	17-04-1988	7.2	Cl-Na	0.79	0.79	0.44	0.90	677	74.9	dobra izolacja, ale nie pełna		4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
GOLUB-DOBRZYŃ 1	T3	2808	13-12-1988	6.7	Cl-Na	0.88	0.88	0.47	0.72	1466	120.4	wody zmieszane z infiltracyjnymi	możliwe skażenie płuczką	3		5	wody reliktowe	bardzo korzystne warunki do lokowania
GOŁUCHÓW 2	P2	3113	03-12-1995	6.52	Cl-Na-Ca	0.60	0.60	0.37	0.07	1048	318.4	wody reliktowe, całkowita izolacja		5		5	wody reliktowe	bardzo korzystne warunki do lokowania
GOSTYNIN 5	J3	1447	11-10-1972	6.3	Cl-Na	0.84	0.84	0.46	1.10		48.5	dobra izolacja, ale		4		4	dobra izolacja, ale	korzystne warunki

												nie pełna					nie pełna	lokowania
GOSTYNIN 6	J3	966	29-04-1972	7.5	Cl-Na	0.83	0.83	0.45	7.41		29.9	dobra izolacja, ale nie pełna		4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
GOSTYNIN 6	J3	1484	13-06-1972	-	Cl-Na	0.83	0.83	0.45	0.71		58.8	dobra izolacja, ale nie pełna		4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
GOSTYNIN 7	J3	1374	30-09-1984	6.6	Cl-Na	0.99	1.00	0.50	0.15		45.3	wody infiltracyjne, rozpuszczanie soli		2		2	wody infiltracyjne, rozpuszczanie soli	nie można lokować, brak szczelności
GOSTYNIN 7	J3	1446	25-09-1984	7.1	Cl-Na	0.79	0.80	0.44	0.90		51.9	dobra izolacja, ale nie pełna		4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
GOSTYNIN 7	J3	1535	22-07-1984	6.4	Cl-Na	0.74	0.74	0.43	17.32		64.8	dobra izolacja, ale nie pełna		4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
GOSTYNIN 7	J2	1960	12-08-1984	7.65	Cl-Na	0.84	0.84	0.46	0.02		71.8	dobra izolacja, ale nie pełna		4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
GOSTYNIN 7	J2	1997	20-09-1984	6.7	Cl-Na	0.78	0.78	0.44	0.07		78.7	dobra izolacja, ale nie pełna		4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
GOSTYNIN 7	J3	2069	28-08-1984	7.05	Cl-Na	0.84	0.84	0.46	0.06		101.5	dobra izolacja, ale nie pełna		4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
GOSTYNIN 7	J3	2158	07-09-1984	6.65	Cl-Na	0.88	0.89	0.47	0.74		100.6	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
GOSTYNIN 8	Cr1	1217	05-06-1985	7.2	HCO3-Cl-Na	3.14	3.14	0.76	45.60	20	0.8	wody infiltracyjne		1		1	wody infiltracyjne	nie można lokować, brak szczelności
GOSTYNIN 8	Cr1	1360	25-05-0185	7.2	HCO3-Cl-Na-Ca	1.83	1.83	0.65	12.26	14	1.3	wody infiltracyjne		1		1	wody infiltracyjne	nie można lokować, brak szczelności
GOSTYNIN 8	Cr1	1434	16-05-1985	7.2	Cl-HCO3-Na	1.14	1.14	0.53	3.05	351	5.5	wody infiltracyjne, rozpuszczanie soli		2		2	wody infiltracyjne, rozpuszczanie soli	nie można lokować, brak szczelności
GOSTYNIN 8	J3	2031	17-04-1985	6.3	Cl-Na	0.84	0.84	0.46	4.09	2220	99.6	dobra izolacja, ale nie pełna		4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
GOSTYNIN IG1A	J3	1035	01-06-1967	7	Cl-Na	0.85	0.85	0.46	29.39	700	25.5	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora

GOSTYNIN IG-1A	Cr1	928	24-07-1967	7	Cl-Na	1.18	1.21	0.54	8.26	49	1.4	wody infiltracyjne	możliwe skażenie wodami technicznymi	1		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	nie można lokować, brak szczelności
GOSTYNIN IG-1A	J3	1238	01-06-1967	-	Cl-Na	0.81	0.82	0.45	5.53	813	45.9	dobra izolacja, ale nie pełna		4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
GOSTYNIN IG-1A	J2	1850	17-01-1967	7	Cl-Na	0.85	0.86	0.46	1.49	1307	66.1	dobra izolacja, ale nie pełna		4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
GOSTYNIN IG-1A	J2	1952	02-01-1967	7	Cl-Na	0.81	0.82	0.45	0.34	1274	62.8	dobra izolacja, ale nie pełna		4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
GOSTYNIN IG-1A	J2	2060	19-12-1966	7	Cl-Na	0.85	0.85	0.46	1.03	1344	104.1	dobra izolacja, ale nie pełna		4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
GOSTYNIN IG-1A	J1	2245	22-11-1966	7	Cl-Na	0.84	0.84	0.46	0.95	1322	104.4	dobra izolacja, ale nie pełna		4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
GOSTYNIN IG-3	J2	1312	06-03-1967	-	Cl-Na	0.79	0.80	0.44	8.89	1283	36.3	dobra izolacja, ale nie pełna		4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
GOSTYNIN IG-3	J2	1514	23-02-1967	7	Cl-Na	0.90	0.90	0.47	3.43	995	6.2	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
GOSTYNIN IG-3	J2	1838	11-02-1967	7	Cl-Na	0.83	0.83	0.45	2.88	824	23.3	długa izoplacja, ale nie pełna		4		4	długa izoplacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
GOSTYNIN IG-3	J2	2096	26-01-1967	7	Cl-Na	0.96	0.96	0.49	0.98	1405	102.4	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
GOSTYNIN IG-4	J3	1475	23-05-1968	7	Cl-Na	0.83	0.84	0.45	11.58	666	37.8	dobra izolacja, ale nie pełna		4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
GOSTYNIN IG-4	J2	2385	04-1989	7	Cl-Na	0.84	0.86	0.46	0.56	1279	102.8	dobra izolacja, ale nie pełna		4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
GOSTYNIN IG-4	J2	2478	19-03-1968	7	Cl-Na	0.83	0.84	0.45	0.94	1250	105.3	dobra izolacja, ale nie pełna		4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
GOSTYNIN IG-4	J1	2662	16-02-1968	-	Cl-Na	0.82	0.83	0.45	1.04	1154	102.1	dobra izolacja, ale nie pełna		4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
GRADZANOWO-4	Cr2	989	28-03-	10	Cl-Na-Ca	0.66	0.66	0.40	1.26		4.5	wody	możliwe	6		4	dobra	korzystne

			1972									reliktowe	skażenie płuczką				izolacja, ale nie pełna	warunki lokowania
GRADZANOWO-4	Cr1	1091	20-03-1972	9	Cl-SO4-Na-Ca	1.07	1.07	0.52	26.86		3.9	wody infiltracyjne, rozpuszczanie soli	możliwe skażenie płuczką	2		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
GRADZANOWO-4	Cm	3155	15-02-1972	7.5	Cl-SO4-Ca	0.22	0.22	0.18	63.72		1.2	wody reliktowe - wody infiltracyjne?	możliwe skażenie płuczką	6		6	wody reliktowe - wody infiltracyjne?	najlepsze warunki do lokowania
GRODZISKO-5	Cr1	759	08-01-1996	7.2	HCO3-Ca-Mg	0.71	0.85	0.41	709.00		0.3	dobra izolacja, ale nie pełna		4		1	wody infiltracyjne	nie można lokować, brak szczelności
GRONOWO 1	Cr2	1030	01-07-1991	6.2	Cl-Na	0.86	0.87	0.46	2.39		31.9	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
GRONOWO 1	J1	2595	27-06-1991	7.5	Cl-Na	0.79	0.80	0.44	0.60	1070	119.3	dobra izolacja, ale nie pełna		4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
GRONOWO 1	T1	2990	22-06-1991	6.2	Cl-Na	0.77	0.78	0.44	0.58	960	120.8	dobra izolacja, ale nie pełna		4		5	wody reliktowe	bardzo korzystne warunki do lokowania
GRUDZIĄDZ IG-1	Cr1	1037	21-08-1971	6	Cl-Na	1.09	1.10	0.52	2.02	2178	3.3	wody infiltracyjne, rozpuszczanie soli		2		2	wody infiltracyjne, rozpuszczanie soli	nie można lokować, brak szczelności
GRUDZIĄDZ IG-1	J1	1607	15-09-2009	6.2	Cl-Na	0.85	0.86	0.46	47.44	1550	75.9	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
GRUDZIĄDZ IG-1	T1	1947	29-05-1972	7	Cl-Ca-Na	0.36	0.39	0.27	0.22	159	347.6	wody reliktowe, całkowita izolacja		6		6	wody reliktowe, całkowita izolacja	najlepsze warunki do lokowania
GRUDZIĄDZ IG-1	P1	2772	11-12-1971	6	Cl-Ca-Na	0.25	0.27	0.20	0.04	147	361.6	wody reliktowe, całkowita izolacja		6		6	wody reliktowe, całkowita izolacja	najlepsze warunki do lokowania
GRUNDY GÓRNE IG-1	J1	1032	-	7	Cl-Na	0.80	0.81	0.44	1.28	8283	13.1	dobra izolacja, ale nie pełna	możliwe skażenie płuczką	4		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
JAROCIN 6	C	3033	14-01-1992	-	Cl-Na	0.82	0.82	0.45	0.74	684	232.0	dobra izolacja, ale nie pełna		4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania

JAROCIN 7	P1	2778	08-12-1994	6.12	Cl-Na-Ca	0.57	0.57	0.36	0.32	216	286.7	wody reliktowe, całkowita izolacja		6		6	wody reliktowe, całkowita izolacja	najlepsze warunki do lokowania
JAROCIN GN-4	P1	2851	07-05-1978	6.4	Cl-Na-Ca	0.67	0.67	0.40	0.08		253.6	dobra izolacja, ale nie pełna		4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
JEŻÓW IG-1	J1	1635	26-04-1973	-	Cl-Na	1.05	1.06	0.51	2.59	402	2.4	wody infiltracyjne	możliwe skażenie płuczką	1		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
JEŻÓW IG-1	J1	1712	17-04-1973	6	Cl-Na	0.82	0.82	0.45	0.44	334	13.4	dobra izolacja, ale nie pełna	możliwe skażenie płuczką	4		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
JEŻÓW IG-1	T3	1893	24-03-1973	6	Cl-Na-Ca	0.69	0.69	0.41	0.43	356	62.6	dobra izolacja, ale nie pełna	możliwe skażenie płuczką	4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
JEŻÓW IG-1	T1	2726	27-02-1973	7	Cl-Ca-Na	0.32	0.34	0.24	0.06	252	346.9	wody reliktowe, całkowita izolacja		6		6	wody reliktowe, całkowita izolacja	najlepsze warunki do lokowania
KALISZ IG-1	J1	1185	11-06-1974	7	Cl-Na	0.85	0.88	0.46	8.50	529	2.4	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
KALISZ IG-1	P	3025	22-11-1973	7	Cl-Na	0.67	0.73	0.40	0.14		326.2	dobra izolacja, ale nie pełna		4		5	wody reliktowe	bardzo korzystne warunki do lokowania
KAMIONKI 1	J3	1808	02-08-1972	5.5	Cl-Na	0.94	0.94	0.48	0.60		83.7	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
KAMIONKI 1	J2	2740	13-01-1973	7	Cl-Na	0.80	0.80	0.44	0.39		91.5	dobra izolacja, ale nie pełna		4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
KAMIONKI IG-3	J2	2750	28-08-1987	6.64	Cl-Na	0.93	0.93	0.48	0.87	1438	112.0	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
KAMIONKI IG-3	C	4750	03-08-1987	5.55	Cl-Na-Ca	0.49	0.49	0.33	0.15	184	248.8	wody reliktowe, całkowita izolacja		6		6	wody reliktowe, całkowita izolacja	najlepsze warunki do lokowania
KAMIONKI-2	J3	1713	29-07-	5.5	Cl-Na	0.95	0.95	0.49	0.57		83.3	wody		3		3	wody	lokowanie

			1972									zmieszane z infiltracyjnymi					zmieszane z infiltracyjnymi	warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
KAMIONKI-2	J3	2162	09-09-1972	6	Cl-Na	1.20	1.20	0.55	0.73		52.2	wody infiltracyjne, rozpuszczanie soli	możliwe skażenie płuczką	2		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
KARNKOWO IG-1	Cr1	1479	23-06-1984	10.7	Cl-Na	1.51	1.58	0.60	17.12	210	1.0	wody infiltracyjne	możliwe skażenie płuczką	1		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
KARNKOWO IG-1	J2	2500	17-06-1984	7.43	Cl-Na	0.91	0.91	0.48	1.40	1825	95.1	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
KARNKOWO IG-1	T1	3177	09-06-1984	7.69	Cl-Na	0.77	0.78	0.44	1.87	678	103.6	dobra izolacja, ale nie pełna	możliwe skażenie płuczką	4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
KASZEWY 1	J1	1070	21-10-2010	8.4	Cl-Na	0.85	0.93	0.46	0.04		3.7	wody zmieszane z infiltracyjnymi	możliwe skażenie płuczką	3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
KASZEWY 1	J1	1315	17-10-2010	7.6	Cl-Na	0.66	0.90	0.40	1.35		15.9	dobra izolacja, ale nie pełna		4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
KASZEWY 1	J1	1510	26-10-2010	6.17	Cl-Na	0.72	0.81	0.42	1.07	5179	32.6	dobra izolacja, ale nie pełna		4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
KIJEWO 1	Cr1	899	29-09-1984	6.7	Cl-HCO3-SO4-Na	1.30	1.34	0.56	41.87		4.0	wody infiltracyjne, rozpuszczanie soli		2		2	wody infiltracyjne, rozpuszczanie soli	nie można lokować, brak szczelności
KLICZKÓW-8	P1	2842	27-01-1973	5.5	Cl-Na-Ca	0.75	0.75	0.43	0.26	1137	289.3	dobra izolacja, ale nie pełna		4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
KOŁO IG-3	Cr1	1773	01-12-1969	-	Cl-Na	1.04	1.05	0.51	2.74		7.8	wody infiltracyjne, rozpuszczanie soli		2		2	wody infiltracyjne, rozpuszczanie soli	nie można lokować, brak szczelności
KOŁO IG-4	Cr1	1717	18-04-1970	-	Cl-Na	1.29	1.33	0.56	5.21		1.8	wody infiltracyjne		1		1	wody infiltracyjne	nie można lokować, brak szczelności
KOŁO IG-4	J3	1870	-	-	Cl-Na	1.18	1.19	0.54	0.33	3741	3.3	wody infiltracyjne, rozpuszczanie soli		2		2	wody infiltracyjne, rozpuszczanie soli	nie można lokować, brak szczelności

KOŁO IG-4	J3	2117	01-06-1970	-	Cl-Na	0.82	0.82	0.45	1.67	1276	110.3	dobra izolacja, ale nie pełna		4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
KOŁO IG-4	J3	2183	06-06-1970	-	Cl-Na	0.84	0.85	0.46	1.39	1914	112.5	dobra izolacja, ale nie pełna		4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
KOŁO IG-4	J3	2369	22-06-1970	-	Cl-Na	0.82	0.83	0.45	1.41	1872	115.0	dobra izolacja, ale nie pełna		4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
KOMPINA II	J3	1640			Cl-Na	0.87					47.8	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
KOMPINA II	J2	2665			Cl-Na	0.90					114.2	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
KOMPINA II	T3	3644			Cl-Na	0.55				237.05	149.9	wody reliktowe, całkowita izolacja		6		6	wody reliktowe, całkowita izolacja	najlepsze warunki do lokowania
KONARY IG-1	J2	635	19-01-1974	7	Cl-Na	0.87	0.87	0.47	2.07	1398	41.4	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
KONARY IG-1	J2	748	11-01-1974	7	Cl-Na	0.81	0.82	0.45	0.69	1315	45.1	dobra izolacja, ale nie pełna		4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
KONARY IG-1	J2	783	05-01-1974	7	Cl-Na	0.86	0.87	0.46	1.36	1960	43.5	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
KONARY IG-1	J2	847	20-12-1973	7	Cl-Na	0.88	0.88	0.47	1.18	1750	53.7	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
KONARY IG-1	J1	1280	23-11-1972	7	Cl-Na	0.90	0.90	0.47	1.82	1969	49.0	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
KONIN GT-1	J1	2578	10-04-2015	6.04	Cl-Na	1.06	1.07	0.52	1.80	4333	155.3	wody infiltracyjne, rozpuszczanie soli	możliwe skażenie płuczką	2	5	5	wody reliktowe	bardzo korzystne warunki do lokowania
KONOPKI 1	Cr1	1110	13-04-1968	7.7	Cl-Na	0.87	0.87	0.47	2.88	599	12.1	wody zmieszane z		3		3	wody zmieszane z	lokowanie warunkowe, po

											infiltracyjnymi					infiltracyjnymi	szczegółowym rozpoznaniu kolektora
KONOPKI 1	J3	1244	10-04-1968	7.95	Cl-Na	0.87	0.87	0.47	2.05	1157	50.2	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
KOŃCZEWICE-1	Cr1	855	03-03-1985	11.8	Cl-SO4-Na	2.11	2.11	0.68	57.61	1311	4.4	wody infiltracyjne, rozpuszczanie soli	możliwe skażenie płuczką	2		2	wody infiltracyjne, rozpuszczanie soli	nie można lokować, brak szczelności
KOŃCZEWICE-1	Cr1	1018	1985	6.6	Cl-HCO3-Na-Ca	1.18	1.18	0.54	28.65	9953	13.8	wody infiltracyjne, rozpuszczanie soli		2		2	wody infiltracyjne, rozpuszczanie soli	nie można lokować, brak szczelności
KOŃCZEWICE-1	J3	1154	04-02-1985	6.3	Cl-SO4-Na	1.03	1.03	0.51	28.37	8376	18.6	wody infiltracyjne, rozpuszczanie soli		2		2	wody infiltracyjne, rozpuszczanie soli	nie można lokować, brak szczelności
KOTLIN 1	P1	3127	17-09-1993	5.67	Cl-Na-Ca	0.63	0.63	0.39	0.05	444	313.5	wody reliktowe, całkowita izolacja		5		5	wody reliktowe	bardzo korzystne warunki do lokowania
KOTLIN 2	P2	3120	12-02-1996	6.76	Cl-Na-Ca	0.59	0.59	0.37	0.15	184	311.2	wody reliktowe, całkowita izolacja		6		6	wody reliktowe, całkowita izolacja	najlepsze warunki do lokowania
KROŚNIEWICE IG-1	T2	4022	31-10-1966	7	Cl-Na	0.96	0.96	0.49	2.20	3074	247.0	wody zmieszane z infiltracyjnymi	możliwe skażenie płuczką	5	0	5	wody reliktowe	bardzo korzystne warunki do lokowania
LIPNO 2	J3	1640	14-12-1972	7.5	Cl-Na	0.99	0.99	0.50	1.82		76.3	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
LIPNO 2	J2	1993	14-01-1972	7.5	Cl-Na	0.93	0.93	0.48	0.85		91.6	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
LUTOMIERSK 2	J3	1226	17-02-1971	11	Cl-Na	0.84	0.89	0.46	0.65		9.5	wody zmieszane z infiltracyjnymi	możliwe skażenie płuczką	3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
LUTOMIERSK 3	J3	1597	07-07-1970	7.5	Cl-Na	0.90	0.90	0.47	3.99	548	16.1	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora

LUTOMIERSK 3	J3	1638	05-07-1970	7.5	Cl-Na	0.96	0.96	0.49	6.06	771	11.4	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
ŁOWICZ IG-1	J2	1675	02-10-1971	7	Cl-Na	1.35	1.37	0.57	37.24	3147	9.1	wody infiltracyjne, rozpuszczanie soli		2		2	wody infiltracyjne, rozpuszczanie soli	nie można lokować, brak szczelności
ŁOWICZ IG-1	J1	2033	01-10-1971	5	Cl-Na	0.80	0.81	0.45	1.09	1145	83.0	wody zmieszane z infiltracyjnymi		4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
ŁÓDŹ EC II-3	Cr1	814	15-11-1995	7.1	HCO3-Ca-Mg	1.01	1.10	0.50	393.89		0.3	wody infiltracyjne		1		1	wody infiltracyjne	nie można lokować, brak szczelności
ŁÓDŹ TELEFONICZNA 78 NR 1	J3	843	28-10-1986	8	SO4-Cl-Na	2.41	2.41	0.71	176.41		0.3	wody infiltracyjne		1		1	wody infiltracyjne	nie można lokować, brak szczelności
ŁUSZCZANÓW 2	P2	3198	15-04-1999	5.83	Cl-Na-Ca	0.51	0.51	0.34	0.03	150	299.5	wody reliktowe, całkowita izolacja		6		6	wody reliktowe, całkowita izolacja	najlepsze warunki do lokowania
MADAJE STARE IG-1	Cr1	1478	18-03-1968	-	HCO3-Ca-Na	3.48	3.80	0.78	83.26	32	0.4	wody infiltracyjne	możliwe skażenie woda techniczną	1		1	wody infiltracyjne	nie można lokować, brak szczelności
MADAJE STARE IG-1	J3	1929	07-02-1968	7	Cl-Na	0.81	0.82	0.45	1.26	880	54.8	dobra izolacja, ale nie pełna	możliwe skażenie płuczką	4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
MADAJE STARE IG-1	J3	2178	24-01-1968	9	Cl-Na	0.80	0.80	0.44	1.94	998	96.5	dobra izolacja, ale nie pełna	możliwe skażenie płuczką	4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
MADAJE STARE IG-1	J3	2262	06-01-1968	9	Cl-Na	0.83	0.84	0.45	2.06	1020	68.9	dobra izolacja, ale nie pełna	woda z płuczką	4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
MŁYNY-1	Cr1	1150	26-08-1969	6.65	Cl-Mg-Ca	1.04	1.04	0.51	0.22	1974	28.7	wody infiltracyjne, rozpuszczanie soli		2		2	wody infiltracyjne, rozpuszczanie soli	nie można lokować, brak szczelności
MŁYNY-1	J3	1778	05-01-1970	5.85	Cl-Mg-Na	0.31	0.31	0.24	0.04	358	150.7	wody reliktowe, całkowita izolacja		6		6	wody reliktowe, całkowita izolacja	najlepsze warunki do lokowania
MSZCZONÓW IG-1	Cr1	1603	09-07-2010	6.81	HCO3-Ca-Na	3.78	4.79	0.79	43.11		0.4	wody infiltracyjne		1		1	wody infiltracyjne	nie można lokować, brak szczelności
Mszczonów IG2	J2	2394			Cl-Na	0.92	0.94			395.37	94.0	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym

																		rozpoznaniu kolektora
NADARZYN IG 1	Cr1	1209				0.72	0.73			609.22	11.4	dobra izolacja, ale nie pełna		4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
NADARZYN IG 1	J2	1825			Cl-Na	0.79	0.80			659.78	84.4	dobra izolacja, ale nie pełna		4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
NADARZYN IG 1	T1	2534			Cl-Na-Ca	0.61	0.62			182.21	175.0	wody reliktowe, całkowita izolacja		6		6	wody reliktowe, całkowita izolacja	najlepsze warunki do lokowania
NADARZYN IG 1	C	3441			Cl-Na	0.43	0.43			76.17	282.0	wody reliktowe, całkowita izolacja		6		6	wody reliktowe, całkowita izolacja	najlepsze warunki do lokowania
NIDZICA IG-1	Cr2	715	19-02-1964	7	Cl-Na-Ca	0.79	0.79	0.44	17.00	201	0.9	dobra izolacja, ale nie pełna	możliwe skażenie wodą techniczną	4		1	wody infiltracyjne	nie można lokować, brak szczelności
NIDZICA IG-1	Cr2	965	06-02-1964	7	Cl-Na	1.03	1.03	0.51	6.07	705	6.2	wody infiltracyjne, rozpuszczanie soli		2		2	wody infiltracyjne, rozpuszczanie soli	nie można lokować, brak szczelności
NIDZICA IG-1	J3	1115	16-01-1964	7	Cl-Na	0.88	0.88	0.47	2.86	775	29.9	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
NIDZICA IG-1	J2	1420	04-01-1964	7	Cl-Na	0.90	0.90	0.47	2.48	759	35.3	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
NIDZICA IG-1	J1	1555	13-12-1963	7.5	Cl-Na	0.74	0.74	0.43	1.63	637	52.7	dobra izolacja, ale nie pełna		4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
ORPISZEW 1	P2	2123	25-06-1975	5.5	Cl-Na	0.69	0.69	0.41	0.42	8916	206.0	dobra izolacja, ale nie pełna		4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
OSTRÓW KALISKI 2	P2	1909	13-07-1998	5	Cl-Na	0.39	0.39	0.28	0.02		271.1	wody reliktowe		6		6	wody reliktowe, całkowita izolacja	najlepsze warunki do lokowania
OSTRÓW KALISKI 2	P2	2227	09-06-1998	6.5	Cl-Na	0.87	0.87	0.47	0.04		137.8	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora

PŁOŃSK IG-1BIS	J3	1485	07-1967	-	Cl-Na	0.98	1.03	0.50	8.81	4936	12.0	wody infiltracyjne, rozpuszczanie soli		2		2	wody infiltracyjne, rozpuszczanie soli	nie można lokować, brak szczelności
PŁOŃSK IG-1BIS	J2	1929	07-1967	-	Cl-Na	0.87	0.87	0.46	2.44	2566	88.3	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
PŁOŃSK IG-1BIS	T3	2476	07-1967	-	Cl-Na	0.80	0.81	0.45	1.79	427	32.5	wody zmieszane z infiltracyjnymi	możliwe skażenie płuczką	4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
PŁOŃSK IG-1BIS	Cm1	3600	07-1968	-	Cl-Na	0.48	0.49	0.32	0.13	211	295.1	wody reliktowe, całkowita izolacja		6		6	wody reliktowe, całkowita izolacja	najlepsze warunki do lokowania
PŁOŃSK PIG-2/2A	J3	1264	31-10-1970	8.5	Cl-HCO3-Na	1.28	1.28	0.56	3.94		2.3	wody infiltracyjne	możliwe skażenie w technicznymi	1		2	wody infiltracyjne, rozpuszczanie soli	nie można lokować, brak szczelności
PŁOŃSK PIG-2/2A	J3	1596	31-10-1970	8.5	Cl-HCO3-Na	1.14	1.14	0.53	1.87		4.7	wody infiltracyjne, rozpuszczanie soli	możliwe skażenie w technicznymi	2		2	wody infiltracyjne, rozpuszczanie soli	nie można lokować, brak szczelności
PODDĘBICE GT-2	Cr1	1962	14-01-2015	6.96	HCO3-Na-Ca	4.44	4.60	0.82	55.72		0.4	wody infiltracyjne		1	1	1	wody infiltracyjne	nie można lokować, brak szczelności
PODDĘBICE IG-1	Cr1	2150	21-12-1971	6	Cl-Na	0.86	0.86	0.46	0.22	1332	24.7	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
PODDĘBICE IG-1	J3	2545	12-02-1971	6	Cl-Na	0.82	0.83	0.45	1.30	2120	123.4	dobra izolacja, ale nie pełna		4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
PODDĘBICE IG-1	J3	3035	21-10-1971	6	Cl-Na	0.82	0.83	0.45	0.70	1223	148.6	dobra izolacja, ale nie pełna		4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
POLIK IG-1	Cr2	1215	26-04-1987	7.62	Cl-Na	1.05	1.07	0.51	3.31	968	3.2	wody infiltracyjne, rozpuszczanie soli		2		2	wody infiltracyjne, rozpuszczanie soli	nie można lokować, brak szczelności
POLIK IG-1	T1	2620	14-04-1987	6.42	Cl-Na	0.83	0.84	0.45	5.35	741	77.1	dobra izolacja, ale nie pełna		4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
POLIK IG-1	T1	2777	08-04-1987	6.73	Cl-Na	0.81	0.81	0.45	1.47	506	133.9	dobra izolacja, ale nie pełna		4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
PRZYBYŁÓW 1	Cr1	1751	24-04-	6.5	Cl-Na	1.04	1.04	0.51	3.18	1745	10.0	wody		2		2	wody	nie można

			1989									infiltracyjne, rozpuszczanie soli					infiltracyjne, rozpuszczanie soli	lokować, brak szczelności
PRZYBYŁÓW 1	J1	2741	11-02-1989	6.2	Cl-Na	0.85	0.85	0.46	0.99	1112	155.8	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
RADUCZ IG-1	Cr1	1157	20-10-1977	7	Cl-Na-Ca	1.00	1.02	0.50	3.55	1478	0.9	wody infiltracyjne		1		1	wody infiltracyjne	nie można lokować, brak szczelności
RADUCZ IG-1	J3	1485	20-10-1977	7	Cl-SO4-Na	1.35	1.37	0.57	37.24	3147	9.5	wody infiltracyjne, rozpuszczanie soli		2		2	wody infiltracyjne, rozpuszczanie soli	nie można lokować, brak szczelności
RADUCZ IG-1	J2	2305	07-10-1977	7	Cl-Na	0.92	0.93	0.48	0.86	1098	93.0	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
RADUCZ IG-1	J1	2625	23-09-1977	7	Cl-Na	0.82	0.82	0.45	0.96	959	101.7	dobra izolacja, ale nie pełna		4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
RDUTÓW 2	J2	642	01-03-1991	10.4	Cl-Na	0.81	0.83	0.45	0.27		21.5	dobra izolacja, ale nie pełna	możliwe skażenie płuczką	4		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
RÓŻYCE IG-2	J1	3105	14-11-1986	6.8	Cl-Na	0.84	0.84	0.46	0.93	1008	122.0	dobra izolacja, ale nie pełna	możliwe skażenie płuczką	4		5	wody reliktowe	bardzo korzystne warunki do lokowania
SADOWIE 1	P2	1524	15-11-1980	8.3	Cl-Na	0.95	0.95	0.49	0.23		265.0	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
SADOWIE 1	P2	1770	10-12-1980	7.5	Cl-Na	0.94	0.94	0.48	0.21		313.4	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
SARNÓW IG-1	Cr1	1607	28-07-1968	-	HCO3-Na	7.27	7.56	0.88	0.82		0.7	wody infiltracyjne		1		1	wody infiltracyjne	nie można lokować, brak szczelności
SARNÓW IG-1	J3	2090	29-09-1968	6	Cl-Na	0.84	0.85	0.46	2.20	1206	81.0	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
SIERPC 2	Cr1	1172	04-02-	6	Cl-Na	0.95	0.95	0.49	1.30		28.9	wody		3		3	wody	lokowanie

			1973									zmieszane z infiltracyjnymi					zmieszane z infiltracyjnymi	warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
SKĘPE-1	J3	1716	16-10-1971	7.5	Cl-Na	0.95	0.95	0.49	0.11		68.9	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
SKĘPE-1	J3	2050	14-03-1972	7	Cl-Na	0.93	0.93	0.48	1.31		99.7	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
SKĘPE-1	J2	2135	23-08-1972	7.5	Cl-Na	0.99	0.99	0.50	0.90		106.3	wody infiltracyjne, rozpuszczanie soli		3		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
SKIERNIEWICE GT-1	J3	1274	-	7.4	Cl-SO4-Na	1.18	1.18	0.54	56.79		6.5	wody infiltracyjne, rozpuszczanie soli		2		2	wody infiltracyjne, rozpuszczanie soli	nie można lokować, brak szczelności
SKIERNIEWICE GT-1	J3	1490	14-11-1990	6.6	Cl-SO4-Na-Ca	0.87	0.87	0.46	27.86		19.1	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	nie można lokować, brak szczelności
SKIERNIEWICE GT-1	J2	1724	23-11-1990	6.8	Cl-Na	0.87	0.87	0.47	19.64		23.8	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
SKIERNIEWICE GT-1	J1	2195	16-12-1990	6.5	Cl-Na	0.89	0.89	0.47	0.82		79.4	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
SKIERNIEWICE GT-1	J1	2526	05-01-1990	6.3	Cl-Na	0.91	0.91	0.48	0.70		109.0	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
SKIERNIEWICE GT-1	J1	2875	11-09-2010	6.36	Cl-Na	0.88	0.88	0.47	0.41	1833	103.8	wody zmieszane z infiltracyjnymi	możliwe skażenie płuczką	3	5	5	wody reliktowe	bardzo korzystne warunki do lokowania
SOBIESĘKI 3	P2	2807	13-04-1988	5.5	Cl-Na	0.87	0.87	0.47	0.21	687	321.0	wody zmieszane z infiltracyjnymi	możliwe skażenie płuczką	3		5	wody reliktowe	bardzo korzystne warunki do lokowania
SOBIESĘKI 3	P2	2934	06-01-1988	7.5	Cl-Na	0.99	0.99	0.50	0.05		131.7	wody zmieszane z infiltracyjnymi	możliwe skażenie płuczką	3		4	wody zmieszane z infiltracyjnymi	korzystne warunki lokowania
SOCHACZEW 1	J3	1644	17-02-	7.5	Cl-Na	0.92	0.92	0.48	2.10		85.8	wody		3		3	wody	lokowanie

			1972									zmieszane z infiltracyjnymi					zmieszane z infiltracyjnymi	warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
SOCHACZEW 1	J2	1946	04-03-1972	7.5	Cl-Na	0.98	0.98	0.49	1.31		95.5	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
SOCHACZEW 1	J1	2465	12-04-1972	7.5	Cl-Na	0.80	0.80	0.44	1.25		99.0	dobra izolacja, ale nie pełna		4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
SOCHACZEW 1	J1	2816	19-05-1972	7.5	Cl-Na	0.76	0.76	0.43	0.39		108.5	dobra izolacja, ale nie pełna		4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
SOCHACZEW 2	J2	2617	07-06-1974	6.3	Cl-Na	0.95	0.95	0.49	0.35		109.9	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
SOCHACZEW-3	J3	2464	18-06-1972	-	Cl-Na	0.92	0.92	0.48	0.50		98.2	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
STRZELNO IG-1	J2	2095	08-10-1965	7	Cl-Na-Ca	0.73	0.74	0.42	0.25	869	209.6	dobra izolacja, ale nie pełna		4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
STRZELNO IG-1	T3	2675	26-09-1965	7.5	Cl-Na-Ca	0.56	0.57	0.36	0.10	562	294.9	wody reliktowe, całkowita izolacja		5		5	wody reliktowe	bardzo korzystne warunki do lokowania
STUDZIANNA IG-2	T3	1848	26-06-1973	7.95	Cl-Na	1.02	1.03	0.51	3.73	2662	4.8	wody infiltracyjne, rozpuszczanie soli	możliwe skażenie płuczką	2		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
SZCZAWNO 1	J2	1861	16-06-1971	7.5	Cl-Na	1.07	1.07	0.52	0.52		88.3	wody infiltracyjne, rozpuszczanie soli	możliwe skażenie płuczką	2		3	wody infiltracyjne, rozpuszczanie soli	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
SZUBIN IG-1	P1	4971	21-11-1976	7	Cl-Na-Ca	0.58	0.59	0.37	0.07	573	306.1	wody reliktowe		5		5	wody reliktowe	bardzo korzystne warunki do lokowania
SZWEJKI IG3	J2	1620				0.47	0.90			522.51	9.7	wody reliktowe		5		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora

SZWEJKI IG3	T1	3675			Cl-Na-Ca	0.61	0.61			643.76	245.9	wody reliktowe	12	5		5	wody reliktowe	bardzo korzystne warunki do lokowania
ŚLESIN IGH-1	Cr1	2388	27-11-1979	7.4	Cl-Na	0.89	0.89	0.47	23.27		95.8	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
TORUŃ TG-1	J1	1893	24-09-2021	5.9	Cl-Na	0.76	0.76	0.43	0.96	1766	107.3	długotrwała izolacja, ale nie pełna		4	5	4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
TORUŃ TG-2 (CHŁONNY)	J1	1903	03-12-2009	6.22	Cl-Na	0.87	0.88	0.47	0.98		108.5	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
TUSZYN 9	J3	1530	18-12-1968	7.2	SO4-HCO3-Cl-Na-Ca	2.33	2.33	0.70	210.84		2.3	wody infiltracyjne		1		1	wody infiltracyjne	nie można lokować, brak szczelności
TUSZYN 9	J3	1625	07-12-1968	7.4	SO4-HCO3-Cl-Na	2.54	2.54	0.72	125.44		2.4	wody infiltracyjne		1		1	wody infiltracyjne	nie można lokować, brak szczelności
TUSZYN 9	J2	1905	21-11-1968	7.9	Cl-Na	0.99	0.99	0.50	6.22		7.9	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
TUSZYN 9	J2	1986	09-11-1968	7.6	Cl-Na	0.98	0.98	0.50	3.92		8.0	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
TUSZYN 9	J1	2485	29-10-1969	6.3	Cl-Na	0.84	0.84	0.46	0.49		35.5	dobra izolacja, ale nie pełna		4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
UNIEJÓW IGH-1 (CHŁONNY)	Cr1	1957	04-11-2004	6.79	Cl-Na	0.86	0.86	0.46	0.76		7.5	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
UNIEJÓW PIG/AGH-2	Cr1	1897	04-02-2011	7.23	Cl-Na	0.93	0.93	0.48	1.54	3534	7.1	wody zmieszane z infiltracyjnymi	możliwe skażenie płuczką	3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
UNISŁAW IG-1	D3	4585	25-05-1982	6	Cl-Na	0.60	0.61	0.37	0.20	194	245.8	wody reliktowe, całkowita izolacja		6		6	wody reliktowe, całkowita izolacja	najlepsze warunki do lokowania
WARTKOWICE 1	J3	1720	26-01-1973	6.5	Cl-Na	0.87	0.87	0.47	2.60	2487	75.0	wody zmieszane z infiltracyjnymi	woda z płuczką	4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania

WARTKOWICE 1	J3	1955	19-01-1973	6.6	Cl-Na	0.75	0.75	0.43	2.19	4342	81.7	dobra izolacja, ale nie pełna	woda z płuczką	4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
WARTKOWICE 1	J3	2078	04-01-1973	6.8	Cl-Na	0.85	0.85	0.46	2.60	3653	75.0	wody zmieszane z infiltracyjnymi	woda z płuczką	4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
WARTKOWICE 2	J3	1549	07-02-1973	6.5	Cl-Na	0.89	0.89	0.47	2.29	914	79.2	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
WARTKOWICE-3	J3	2142	14-03-1973	7.5	Cl-Na	0.88	0.88	0.47	1.40	1182	115.6	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
WARTKOWICE-3	J2	2350	25-04-1973	7.8	Cl-Na	0.84	0.84	0.46	0.08		74.7	dobra izolacja, ale nie pełna		4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
WIELGIE IG-2	J2	2075	22-11-1985	7.05	Cl-Na	0.93	0.94	0.48	0.87	1568	97.2	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
WIELGIE IG-2	T2	3100	15-11-1985	6.1	Cl-Na-Ca	0.64	0.65	0.39	0.16	666	238.5	wody reliktowe, całkowita izolacja		5		5	wody reliktowe	bardzo korzystne warunki do lokowania
WILCZE IG-1	J1	935	02-07-1985	7.29	Cl-Na	1.01	1.01	0.50	1.40	1341	23.9	wody infiltracyjne, rozpuszczanie soli		2		2	wody infiltracyjne, rozpuszczanie soli	nie można lokować, brak szczelności
WILCZE IG-1	T1	1815	27-06-1985	5.96	Cl-Na-Ca	0.80	0.80	0.44	0.56	378	205.1	dobra izolacja, ale nie pełna		4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
WITASZYCE GN-1	P2	2935	20-11-1978	5.5	Cl-Na-Ca	0.57	0.57	0.36	0.03		293.8	wody reliktowe, całkowita izolacja		6		6	wody reliktowe, całkowita izolacja	najlepsze warunki do lokowania
WOJSZYCE IG-4	J2	1572	05-04-1989	8.3	Cl-Na	1.58	1.59	0.61	3.73	10021	12.5	wody infiltracyjne, rozpuszczanie soli		2		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
WOJSZYCE IG-4	J2	1813	31-03-1989	7.94	Cl-Na	1.30	1.30	0.56	1.61	17513	16.9	wody infiltracyjne, rozpuszczanie soli		2		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
WOJSZYCE IG-4	J1	1957	22-03-	7.14	Cl-Na	1.03	1.04	0.51	0.79	1397	84.0	wody		2		3	wody	lokowanie

			1989									infiltracyjne, rozpuszczanie soli					zmieszane z infiltracyjnymi	warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
WOJSZYCE IG-1A	J2	715	26-05-1988	6.15	Cl-Na	1.18	1.19	0.54	3.15	2862	11.7	wody infiltracyjne, rozpuszczanie soli		2		2	wody infiltracyjne, rozpuszczanie soli	nie można lokować, brak szczelności
WOJSZYCE IG-1A	J2	910	25-05-1988	6.07	HCO3-Cl-Na	1.99	2.05	0.67	8.17	1384	3.3	wody infiltracyjne, rozpuszczanie soli		2		2	wody infiltracyjne, rozpuszczanie soli	nie można lokować, brak szczelności
WOJSZYCE IG-3	J2	552	07-06-1989	9.02	Cl-HCO3-Na	2.17	2.23	0.68	9.44	82	0.7	wody infiltracyjne	możliwe skażenie płuczką	1		2	wody infiltracyjne, rozpuszczanie soli	nie można lokować, brak szczelności
WOJSZYCE IG-3	J2	805	13-01-1990	10.4	Cl-Na	1.00	1.01	0.50	1.69	2220	17.5	wody infiltracyjne, rozpuszczanie soli	możliwe skażenie płuczką	2		2	wody infiltracyjne, rozpuszczanie soli	nie można lokować, brak szczelności
WOJSZYCE IG-3	J2	1485	06-01-1990	6.75	Cl-Na	0.97	0.98	0.49	0.91	2072	31.2	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
WOJSZYCE IG-3	J1	1580	05-01-1990	7.96	Cl-Na	0.94	0.95	0.48	0.83	2488	46.7	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
WOJSZYCE IG-3	J1	1716	18-12-1989	6.96	Cl-Na	0.99	1.00	0.50	0.82	4673	58.9	wody infiltracyjne, rozpuszczanie soli	możliwe skażenie płuczką	2		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
WUDZYŃ 1	Cr2	1047	19-01-1973	6.2	Cl-Na-Ca	0.76	0.76	0.43	9.85		13.1	dobra izolacja, ale nie pełna		4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
WUDZYŃ 1	J1	2580	14-01-1972	6.4	Cl-Na	0.79	0.79	0.44	0.57	918	80.2	dobra izolacja, ale nie pełna		4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
WYSZOGRÓD 1	J3	1690	07-12-1972	7	Cl-Na	0.84	0.84	0.46	0.54		89.4	dobra izolacja, ale nie pełna		4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
WYSZOGRÓD 1	J2	2091	25-12-1972	7	Cl-Na	0.94	0.94	0.48	0.82		55.9	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
WYSZOGRÓD 1	J1	2489	17-01-	7	Cl-Na	0.88	0.88	0.47	0.50		86.1	wody		3		3	wody	lokowanie

			1973									zmieszane z infiltracyjnymi					zmieszane z infiltracyjnymi	warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
ZAKRZYN IG-1	J2	1620	23-03-1984	7.5	Cl-Na	0.96	0.96	0.49	2.69		52.6	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
ZAKRZYN IG-1	T1	3300	12-03-1984	5.6	Cl-Ca-Na	0.39	0.42	0.28	0.01		353.5	wody reliktowe, całkowita izolacja		6		6	wody reliktowe, całkowita izolacja	najlepsze warunki do lokowania
ZAOSIE 2	J1	518	20-08-1989	11.5	Cl-SO4-Ca-Na	0.76	0.86	0.43	41.29		2.1	dobra izolacja, ale nie pełna	woda z płuczką	4		1	wody infiltracyjne	nie można lokować, brak szczelności
ZAOSIE 2	J1	1077	12-08-1989	11.5	Cl-Ca	0.03	0.09	0.03	1.56		4.6	wody reliktowe	możliwe skażenie płuczką	5		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
ZAOSIE 2	T2	2043	30-07-1989	5.3	Cl-Na-Ca	0.53	0.53	0.35	0.16	376	248.2	wody reliktowe, całkowita izolacja		6		6	wody reliktowe, całkowita izolacja	najlepsze warunki do lokowania
ZGIERZ IG-1	J2	1915	15-06-1985	9.28	Cl-Na	0.84	0.85	0.46	0.43	2902	60.5	dobra izolacja, ale nie pełna	możliwe skażenie płuczką	4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
ŻYCHLIN IG-3	Cr1	603	-	-	HCO3-Ca-Na	3.27	4.07	0.77	30.39		0.3	wody infiltracyjne		1		1	wody infiltracyjne	nie można lokować, brak szczelności
ŻYCHLIN IG-3	J2	1875	-	-	Cl-Na	0.95	0.95	0.49	1.31	1089	39.3	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
ŻYCHLIN IG-3	J2	2203	12-09-1966	-	Cl-Na	0.84	0.84	0.46	1.04	1166	104.3	dobra izolacja, ale nie pełna		4		4	dobra izolacja, ale nie pełna	korzystne warunki lokowania
ŻYTOWICE 1	J3	1347	17-12-1969	7.5	Cl-Na	0.89	0.89	0.47	4.81	957	24.6	wody zmieszane z infiltracyjnymi		3		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
ŻYTOWICE 1	J2	1966	05-10-1969	7.5	Cl-Na	1.01	1.01	0.50	3.44		43.3	wody infiltracyjne, rozpuszczanie soli		2		3	wody zmieszane z infiltracyjnymi	lokowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora
ŻYTOWICE 2	J2	2481	20-02-	8.5	Cl-HCO3-	1.36	1.36	0.58	3.12		3.2	wody	możliwe	3		4	dobra	korzystne

			1972		Na							infiltracyjne	skażenie płuczką				izolacja, ale nie pełna	warunki lokowania

5.4.3 Mineralizacja i rozkład ciśnień w obrębie wód podziemnych

(Zbigniew Kaczorowski)

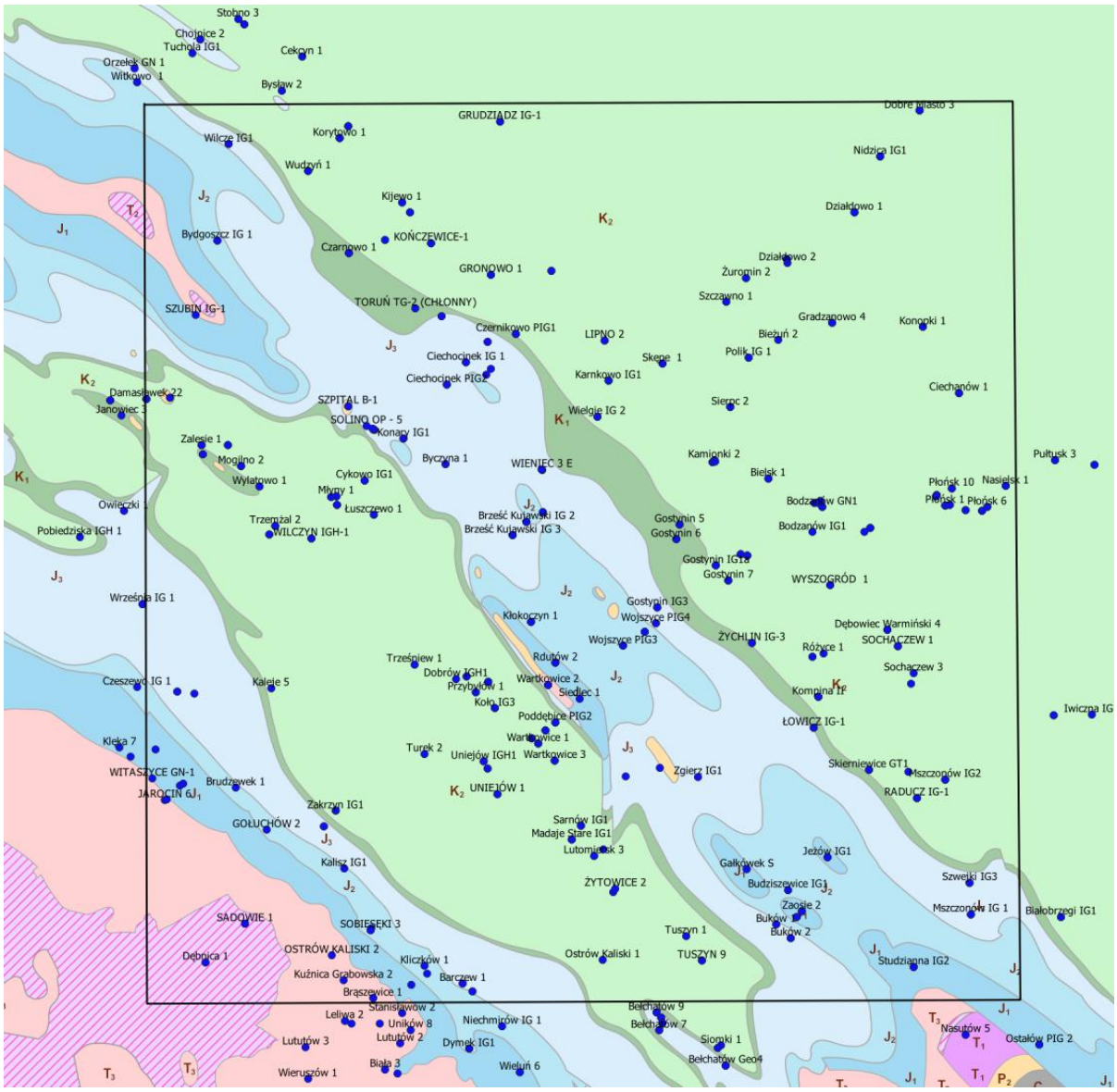


Fig. 5-32 Analizowany obszar na tle mapy ścięcia poziomego na głębokości 1000 m p.p.m. (Kotański, red., 1997) z zaznaczonymi otworami o głębokości ponad 1000 m.

Do modelu rozkładu mineralizacji wód podziemnych w obszarze badań zebrano dane z 227 otworów badawczych i złożowych o głębokości ponad 1000 m (Fig. 5-32) oraz z 14742 płytkich studni (dane z Banku Hydro i Bazy CBDG).

Analizując rozkłady mineralizacji wód podziemnych dla różnych głębokości (Fig. 5-33 – Fig. 5-36) i izopowierzchni wartości mineralizacji (Fig. 5-37 – Fig. 5-44), można przedstawić następujące wnioski:

- Widoczna jest korelacja mineralizacji z wiekiem osadów;

- Na głębokości 300 m najmniej zmineralizowane wody mają około 60 g/l i są powiązane ze skałami jury górnej;

- W rejonie Solina wody o mineralizacji 300 g/l dochodzą prawie do powierzchni terenu. Generalnie, wody o mineralizacji 35 g/l dochodzą do głębokości 700 m;

- Największą mineralizację mają wody permu (obszar N, centralny pas o rozciągłości SE-NW i SW część obszaru) rzędu 300 g/l;

- Do głębokości 2000 m dochodzą wody o mineralizacji 7 g/l, a wody z mineralizacją 1 g/l do głębokości 1700 m (Sarnów IG1) oraz do około 1550 m (Korabiewice PIG1) w utworach kredy dolnej.

Natomiast w przypadku rozkładów ciśnienia piezometrycznego[4] w obrębie poszczególnych formacji geologicznych (Fig. 5-45 – Fig. 5-49) można zaobserwować, że generalnie im głębszy poziom wodonośny tym większe ciśnienia wód podziemnych. Lokalnie mogą zdarzyć się anomalie, jak w przypadku otworu Młyny 1 gdzie obserwuje się podwyższone ciśnienia piezometryczne począwszy od kredy dolnej (Fig. 5-46), oraz w głębiej występujących formacjach geologicznych i odpowiadające im rzędne zwierciadła wody podziemnej wynoszą:

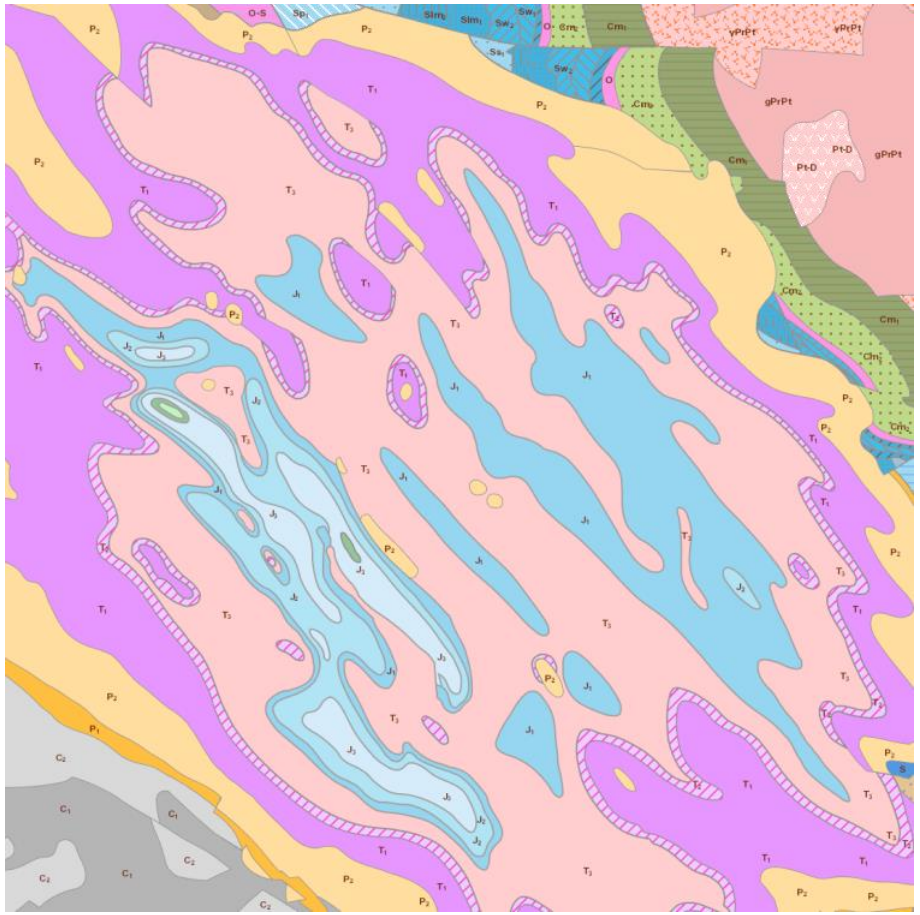
- w jurze dolnej 100-250 m,

- w jurze środkowej 50-250 m,

- w jurze górnej 150-250 m,

- kredzie dolnej 100- -50 m.

[4] Ciśnienie piezometryczne określone jest jako wysokość hydrauliczna (w metrach) i odpowiada wysokości hydraulicznej w wybranym punkcie warstwy wodonośnej. W przypadku wód zwykłych (słodkich) odpowiada to dokładnie rzędnej zwierciadła wód podziemnych (odniesionego do poziomu morza)



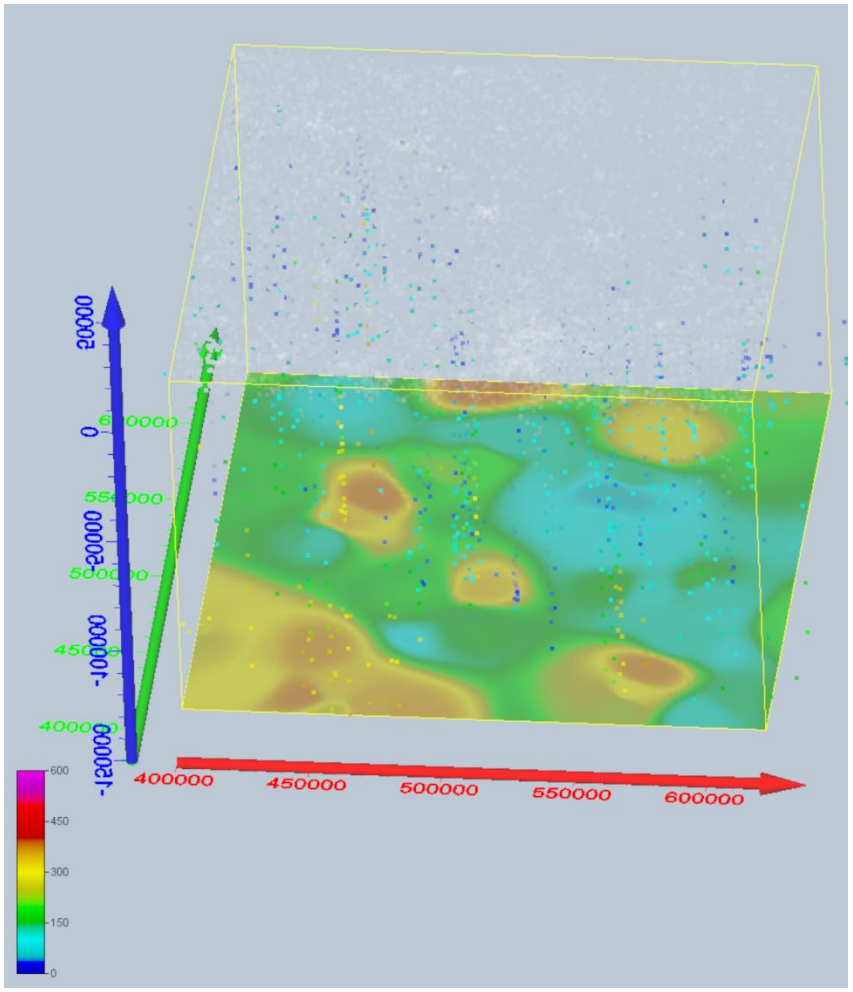


Fig. 5-33 Mapa ścięcia poziomego na głębokości 3000 m p.p.m. (Kotański, red., 1997) i rozkład mineralizacji wód podziemnych w g/l na głębokości 3000 m p.p.m.



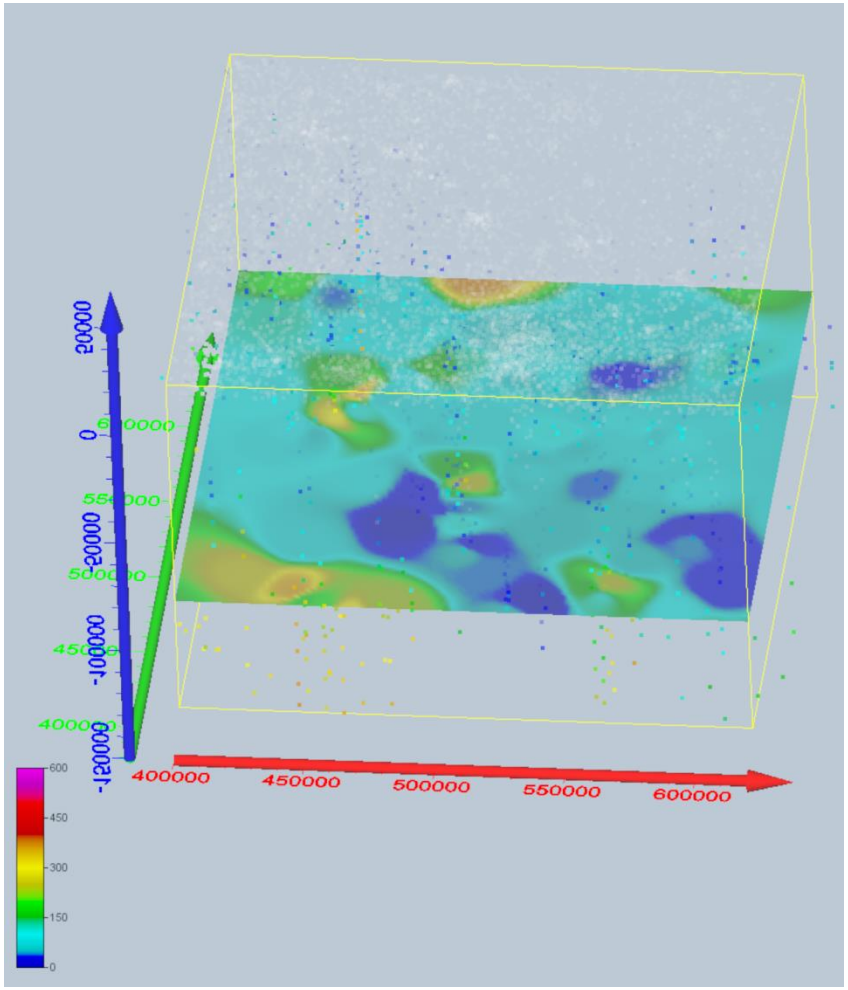
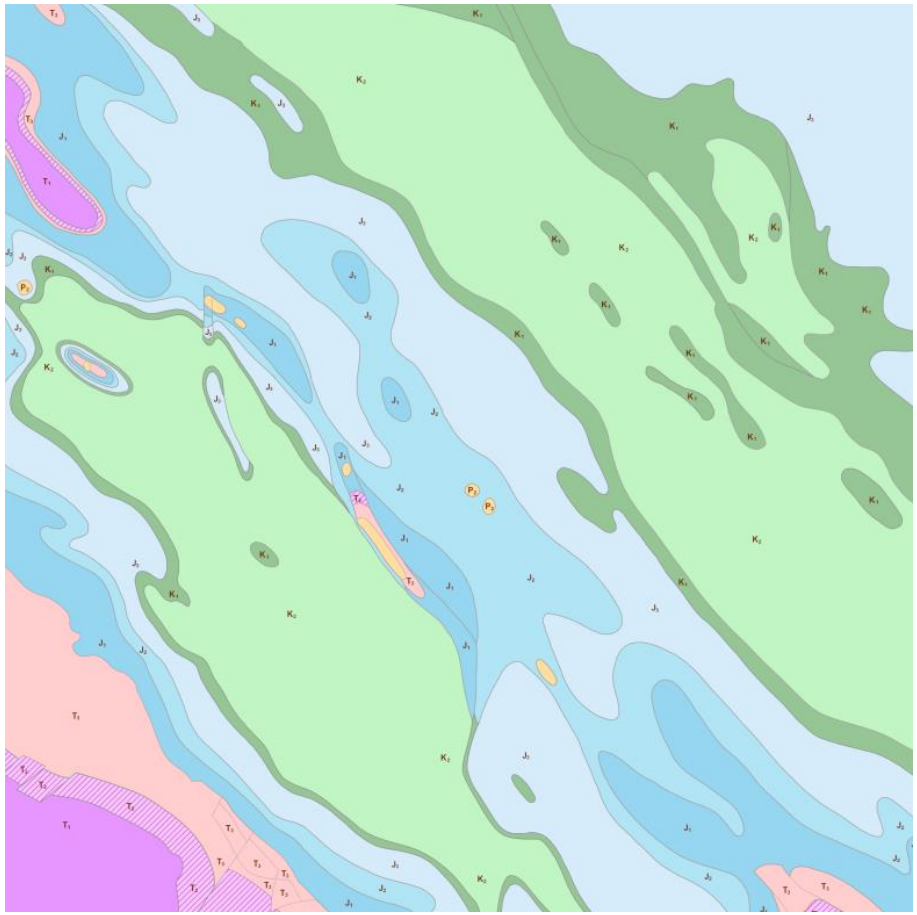


Fig. 5-34 Mapa ścięcia poziomego na głębokości 2000 m p.p.m. (Kotański, red., 1997) i rozkład mineralizacji wód podziemnych w g/l na głębokości 2000 m p.p.m.



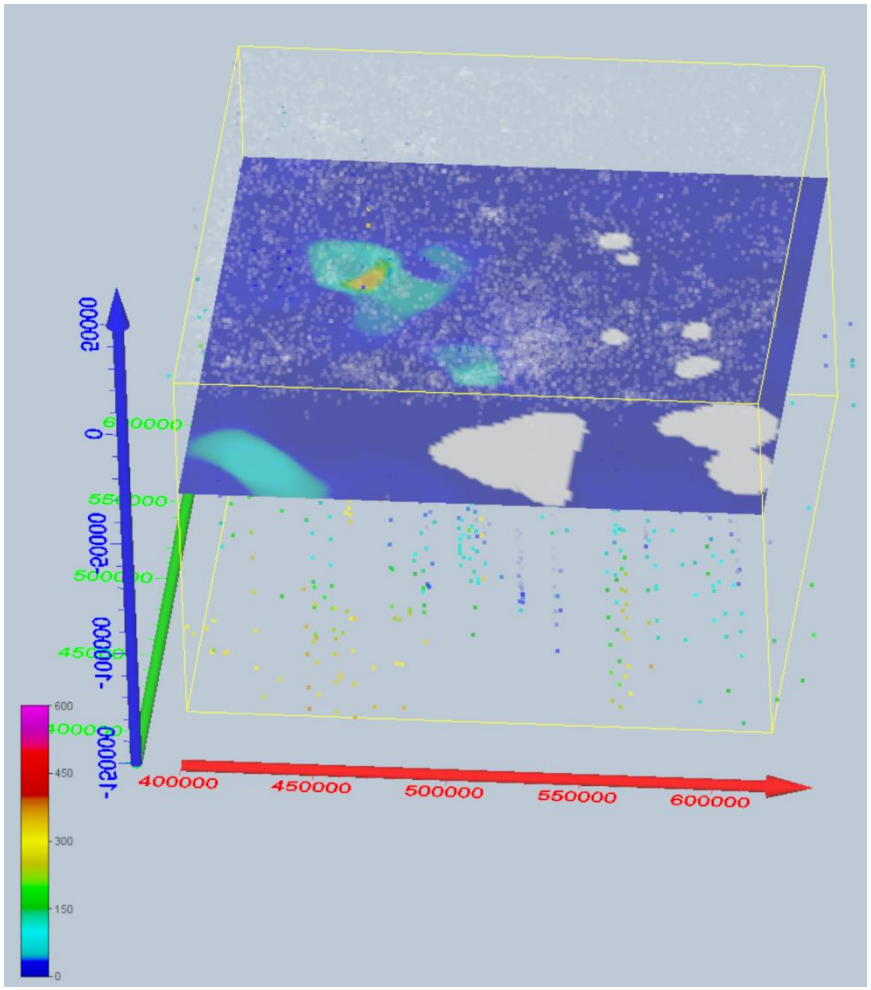
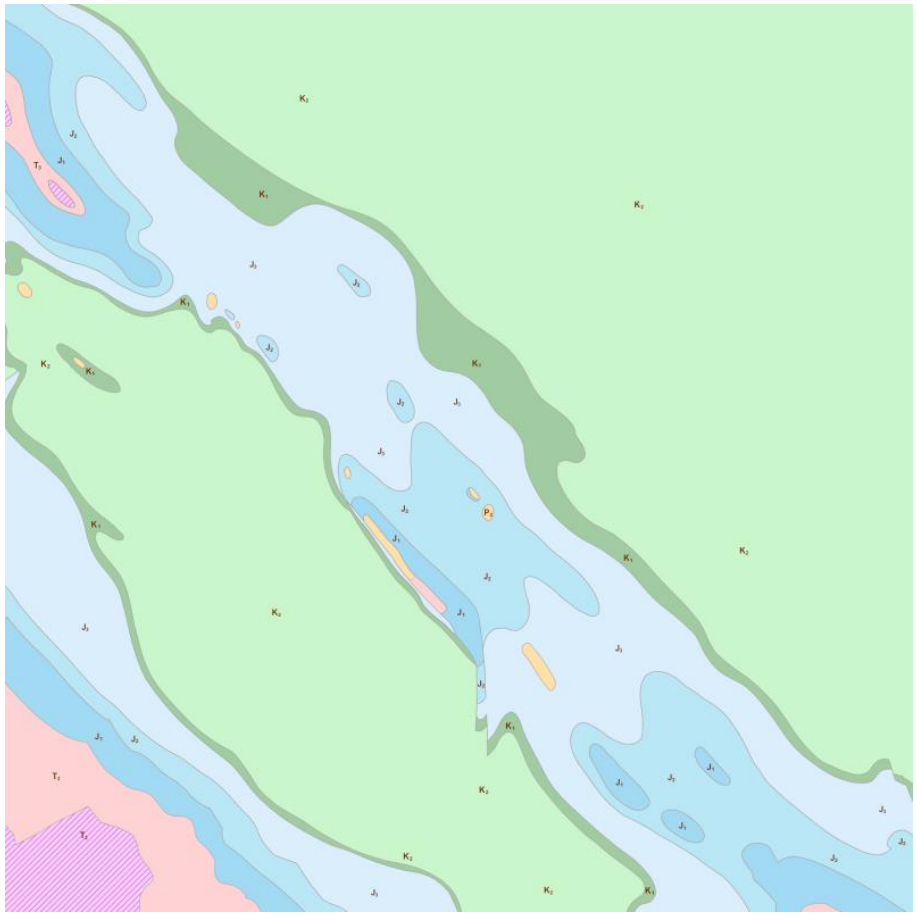


Fig. 5-35 Mapa ścięcia poziomego na głębokości 1000 m p.p.m. (Kotański, red., 1997) i rozkład mineralizacji wód podziemnych w g/l na głębokości 1000 m p.p.m.



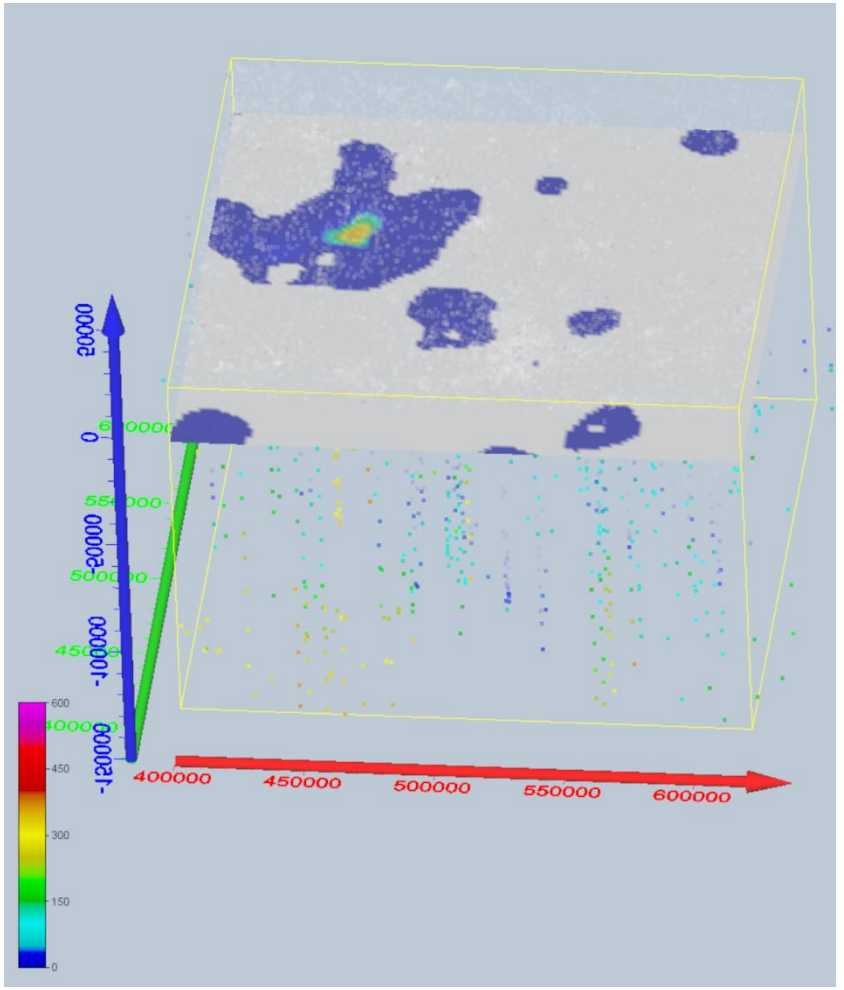


Fig. 5-36 Mapa ścięcia poziomego na głębokości 500 m p.p.m. (Kotański, red., 1997) i rozkład mineralizacji wód podziemnych w g/l na głębokości 500 m p.p.m.

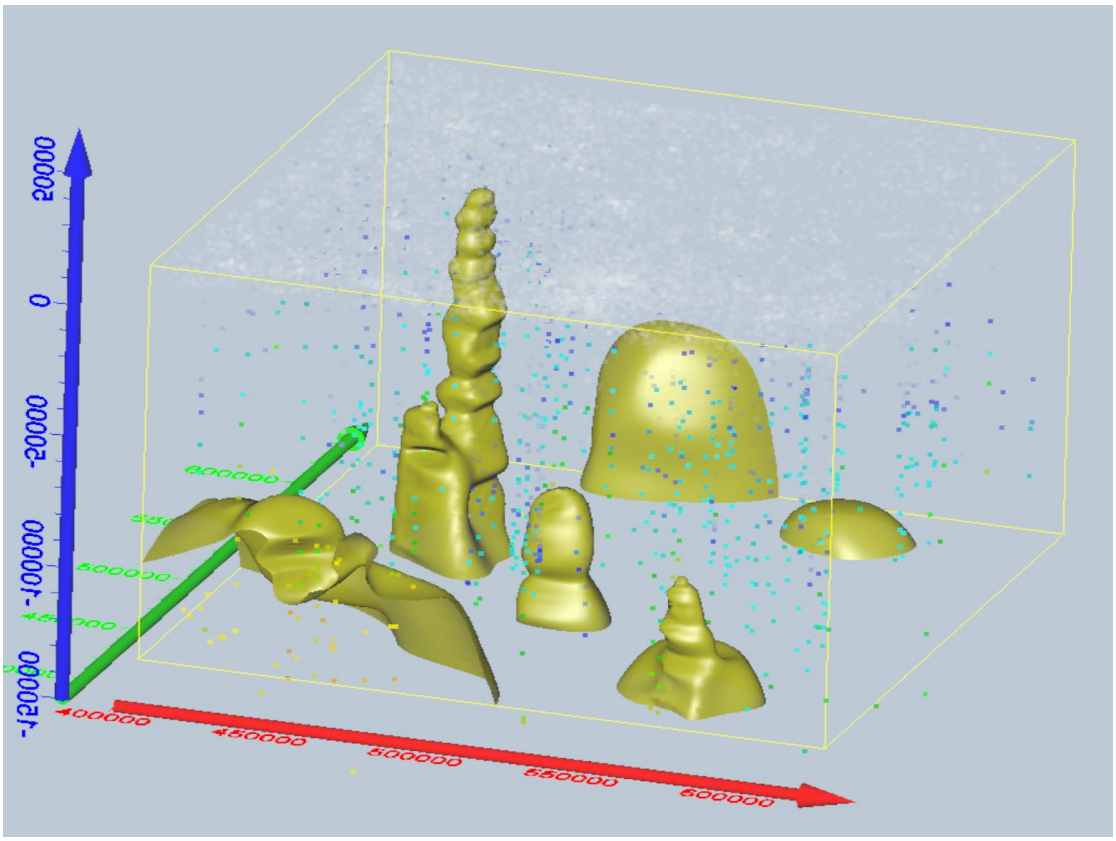


Fig. 5-37 Rozkład mineralizacji wód podziemnych – izopowierzchnie dla mineralizacji 250 g/l

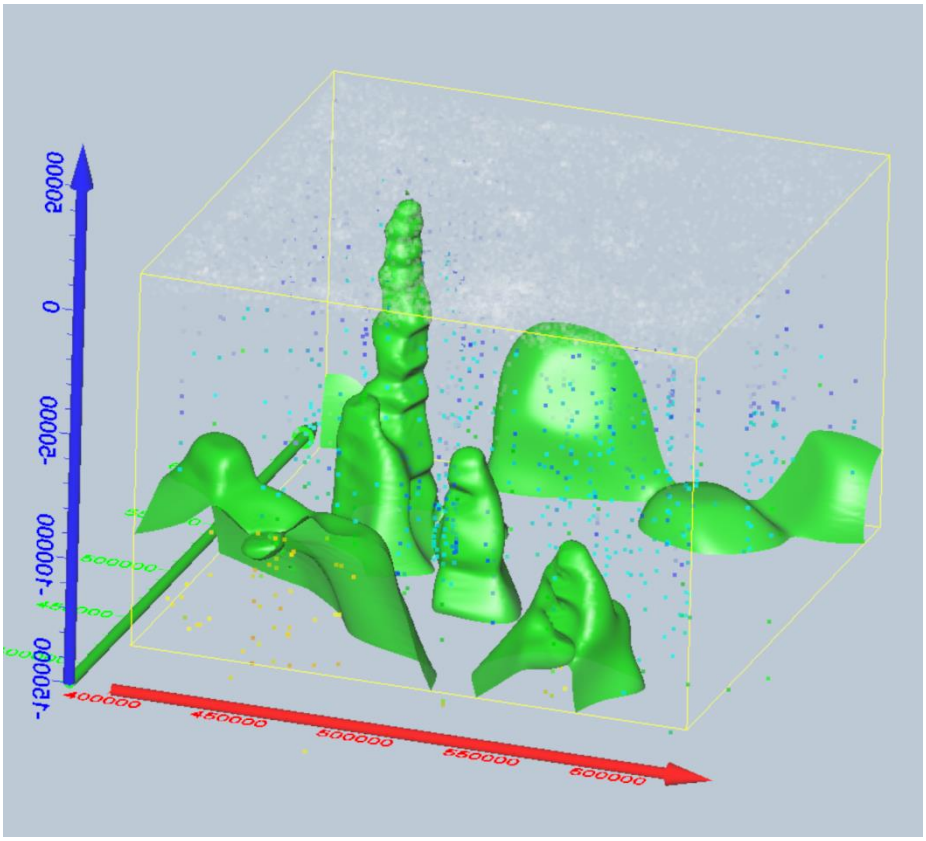


Fig. 5-38 Rozkład mineralizacji wód podziemnych – izopowierzchnie dla mineralizacji 200 g/l

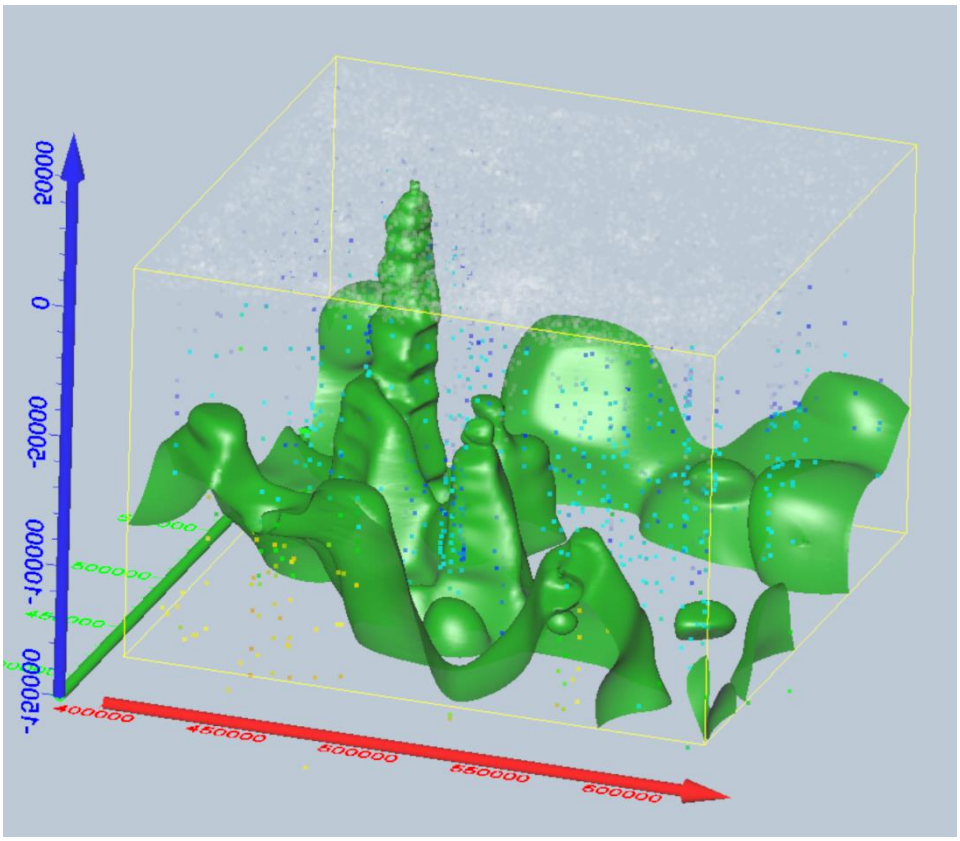


Fig. 5-39 Rozkład mineralizacji wód podziemnych – izopowierzchnie dla mineralizacji 150 g/l

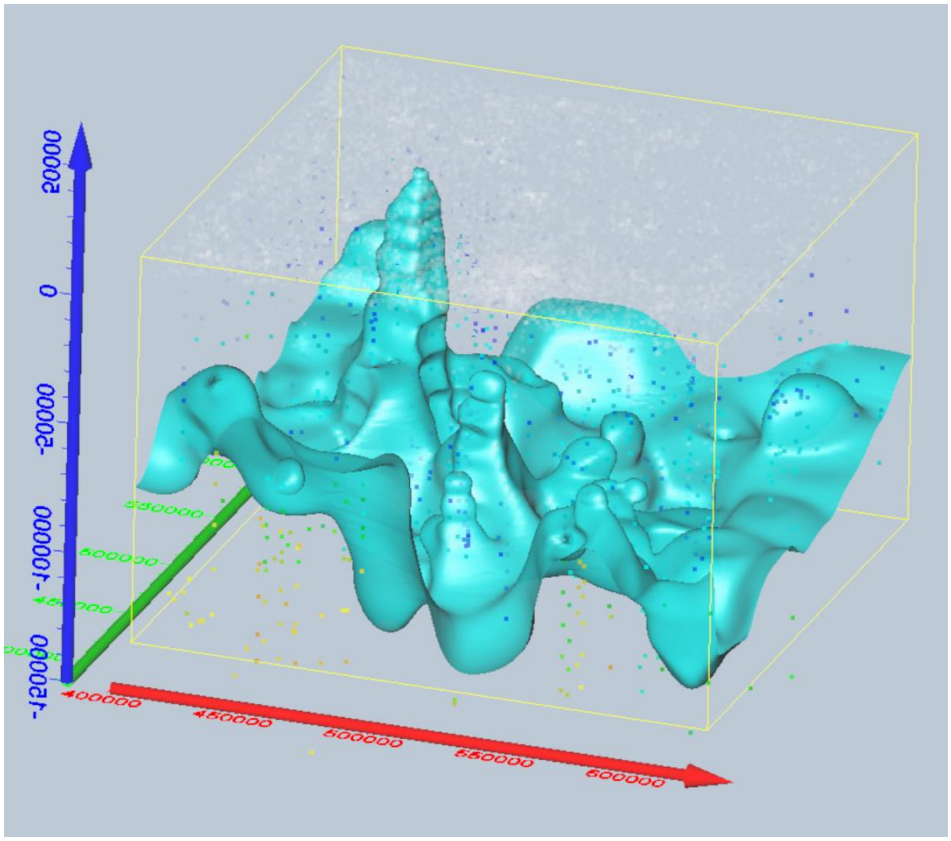


Fig. 5-40 Rozkład mineralizacji wód podziemnych – izopowierzchnie dla mineralizacji 100 g/l

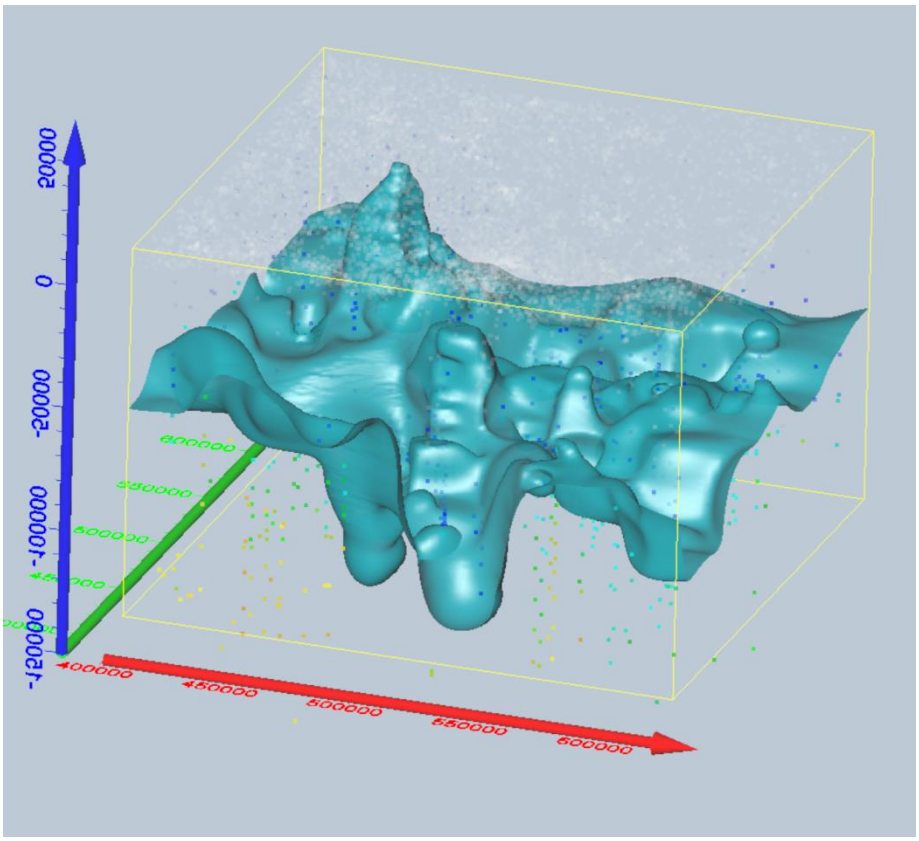


Fig. 5-41 Rozkład mineralizacji wód podziemnych – izopowierzchnie dla mineralizacji 50 g/l

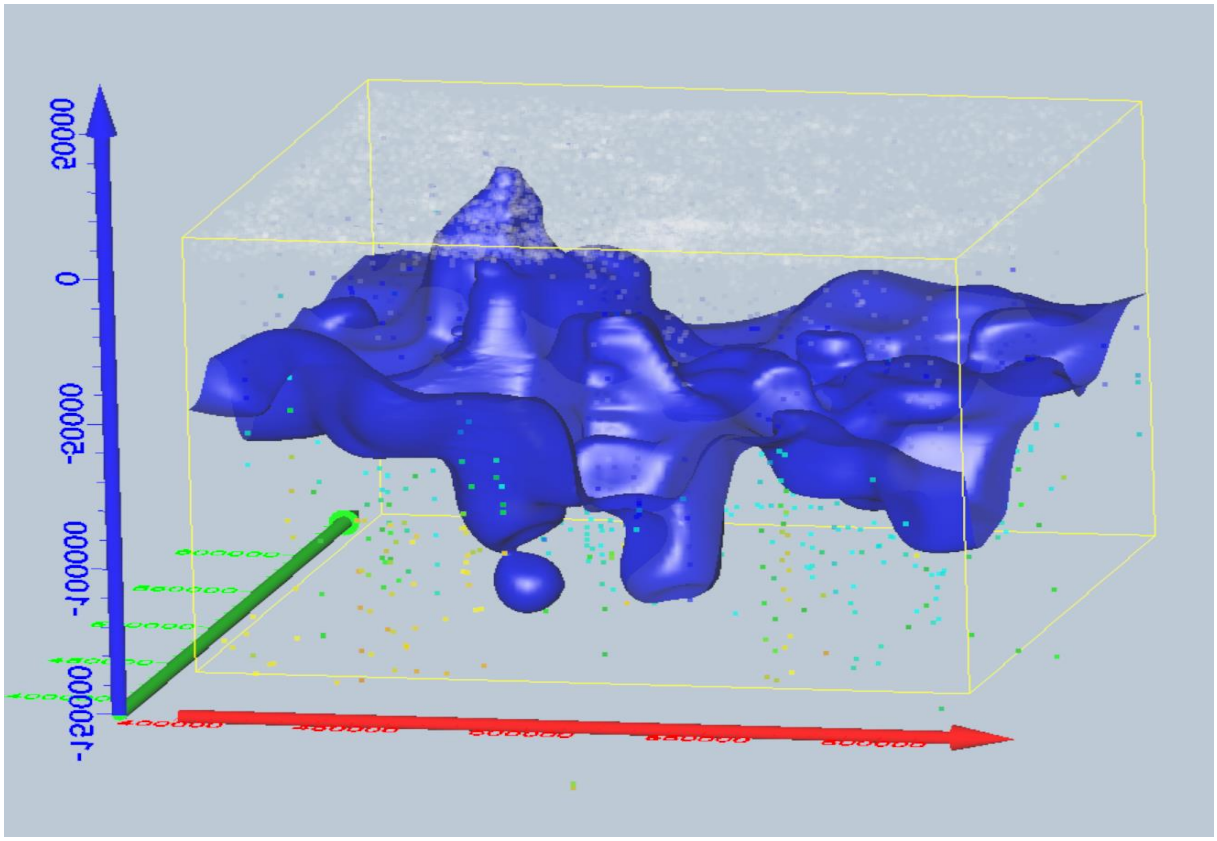


Fig. 5-42 Rozkład mineralizacji wód podziemnych – izopowierzchnie dla mineralizacji 35 g/l

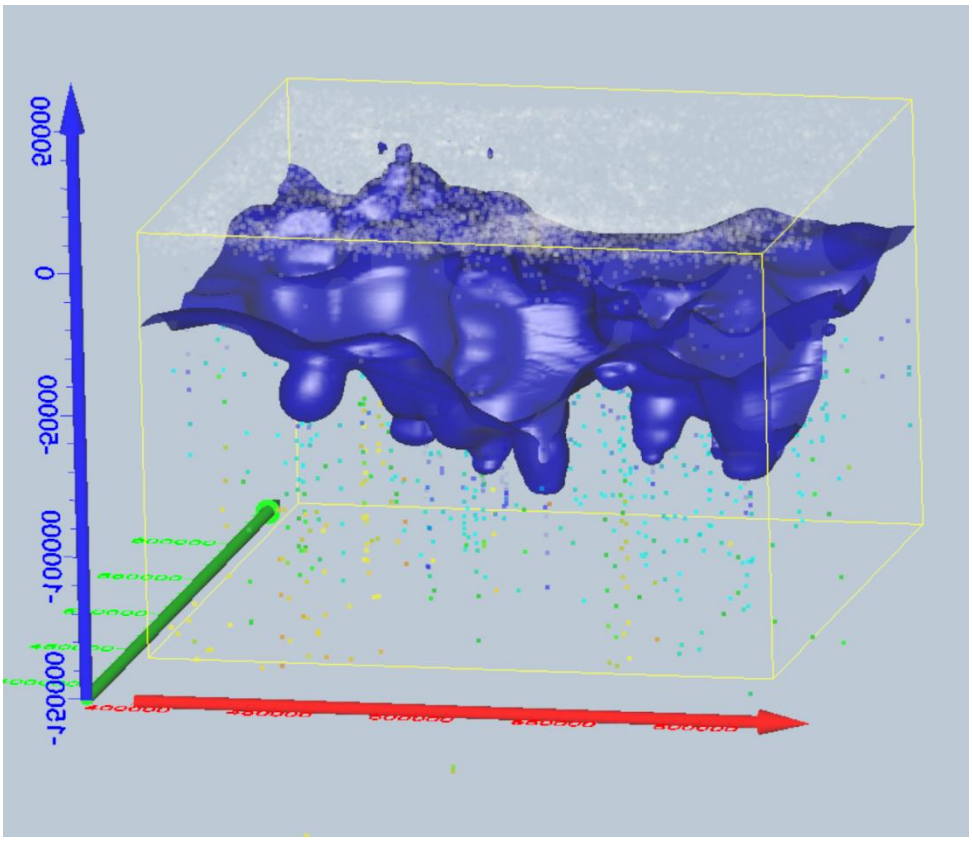


Fig. 5-43 Rozkład mineralizacji wód podziemnych – izopowierzchnie dla mineralizacji 5 g/l

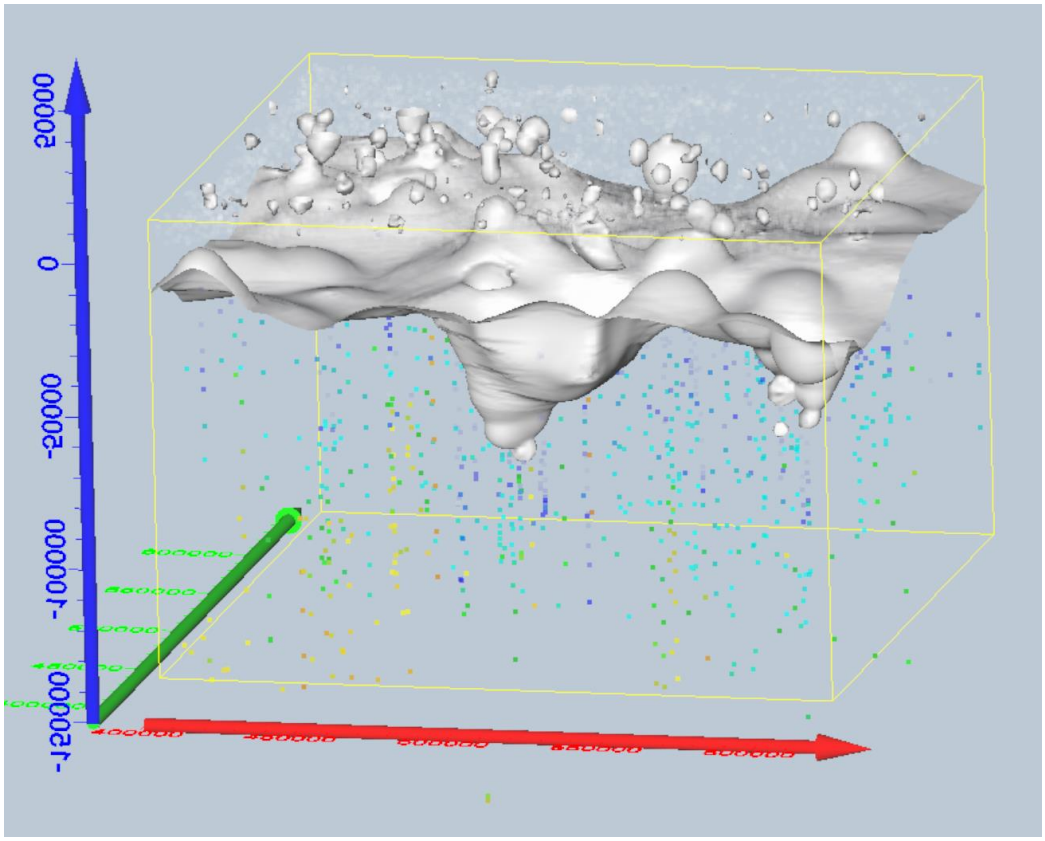


Fig. 5-44 Rozkład mineralizacji wód podziemnych – izopowierzchnie dla mineralizacji 1 g/l

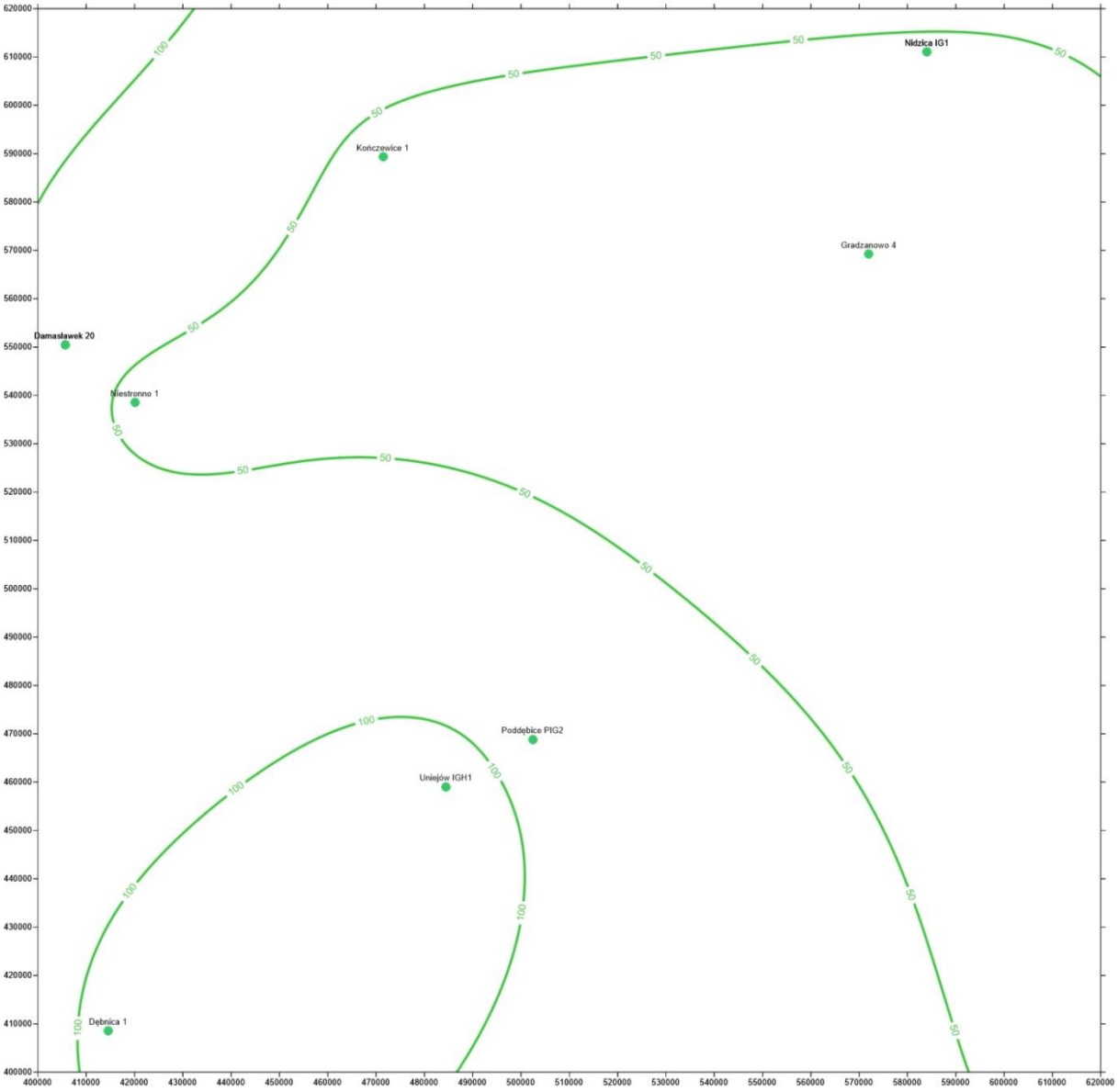


Fig. 5-45 Rozkład ciśnień piezometrycznych wód podziemnych - Kreda górna

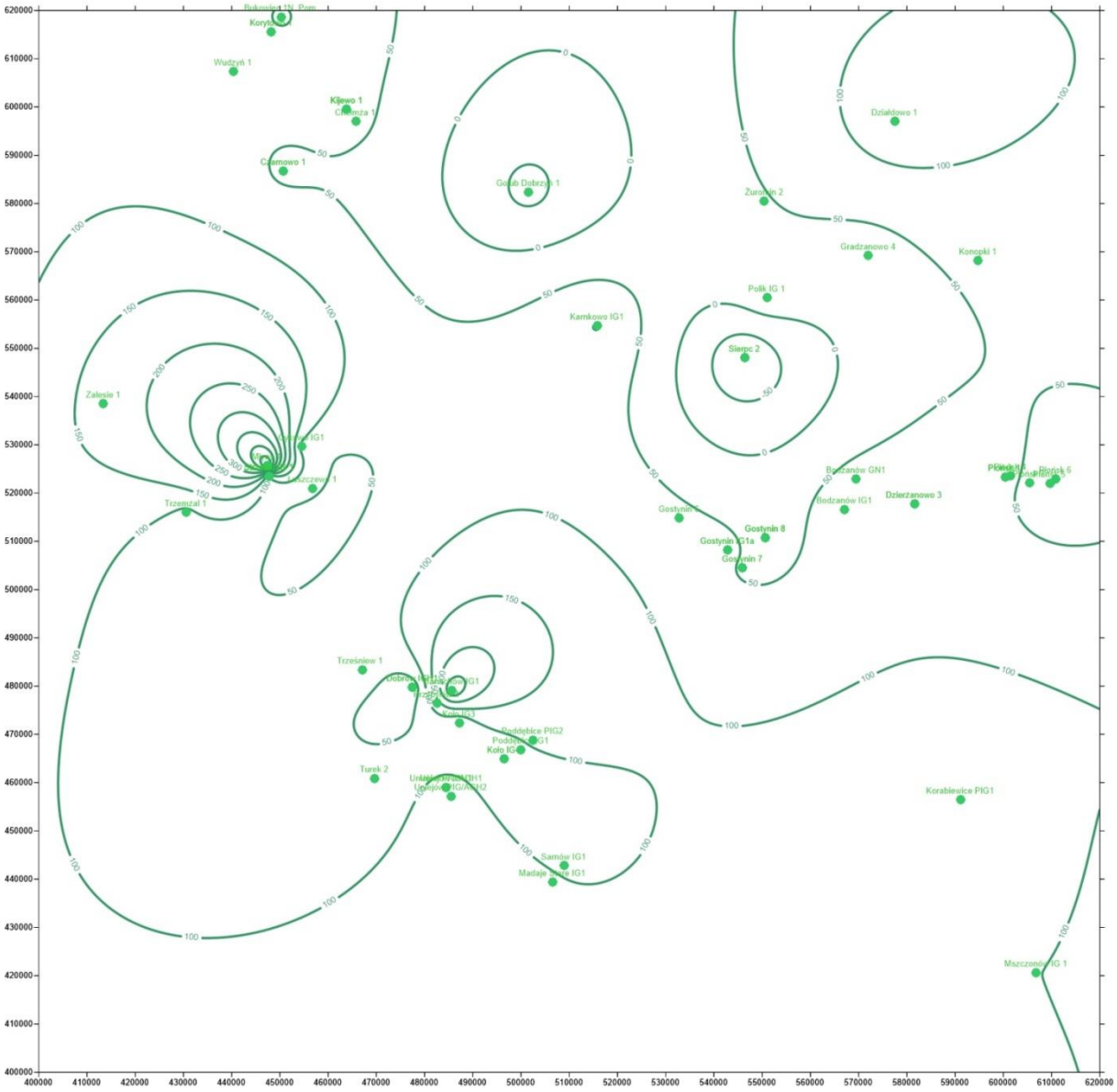


Fig. 5-46 Rozkład ciśnień piezometrycznych wód podziemnych - Kreda dolna

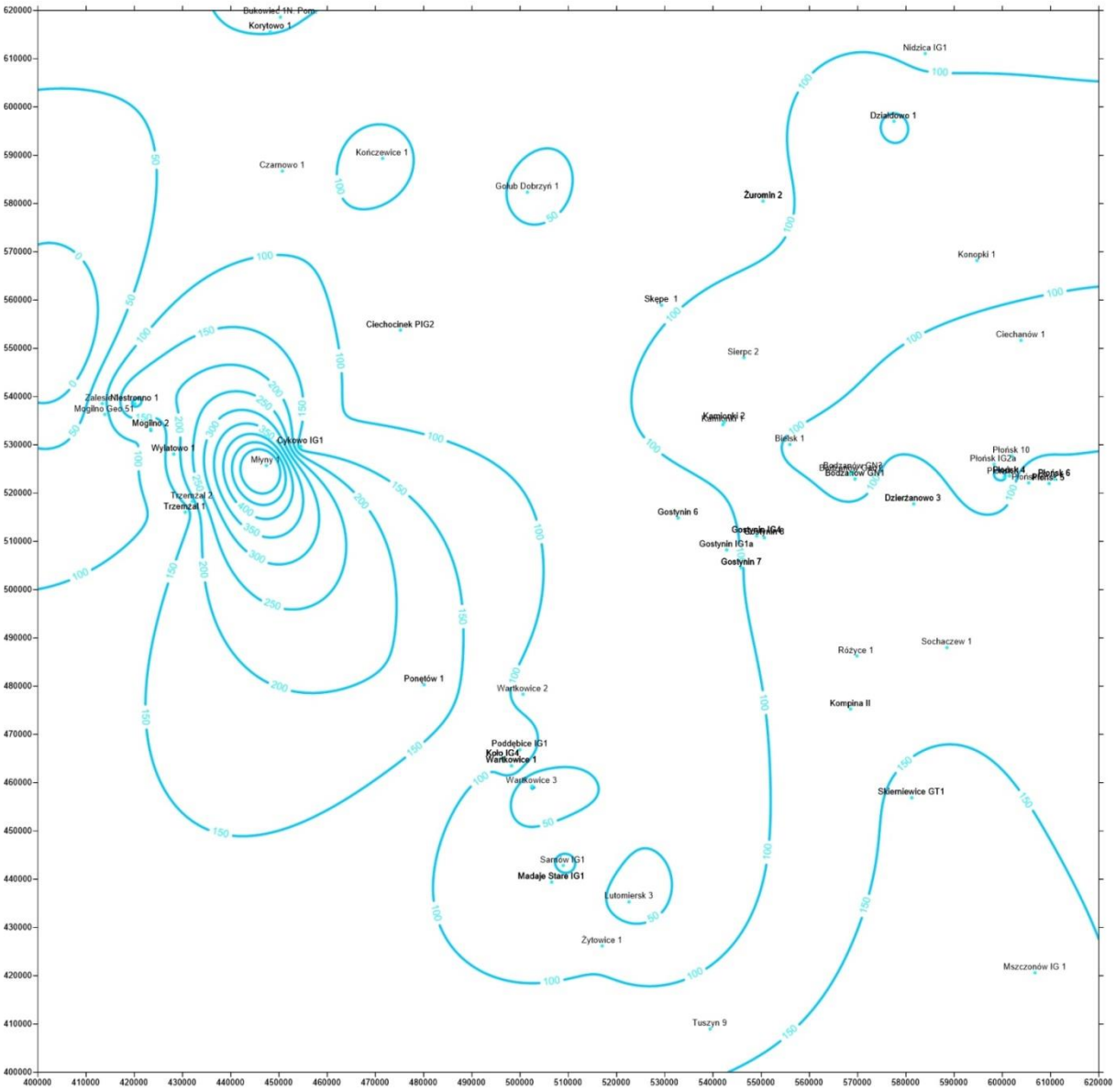


Fig. 5-47 Rozkład ciśnień piezometrycznych wód podziemnych - Jura górna

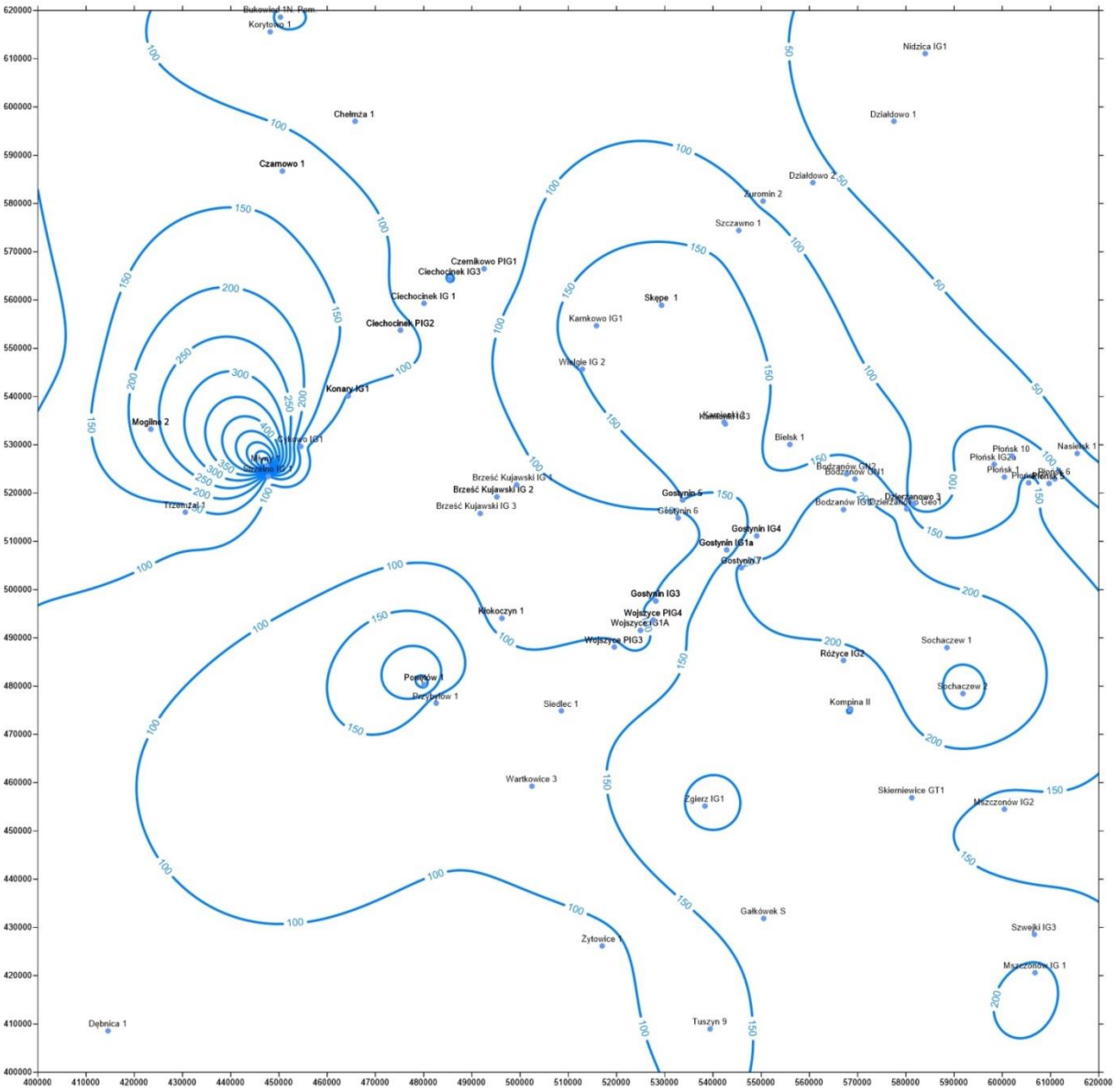


Fig. 5-48 Rozkład ciśnień piezometrycznych wód podziemnych - Jura środkowa

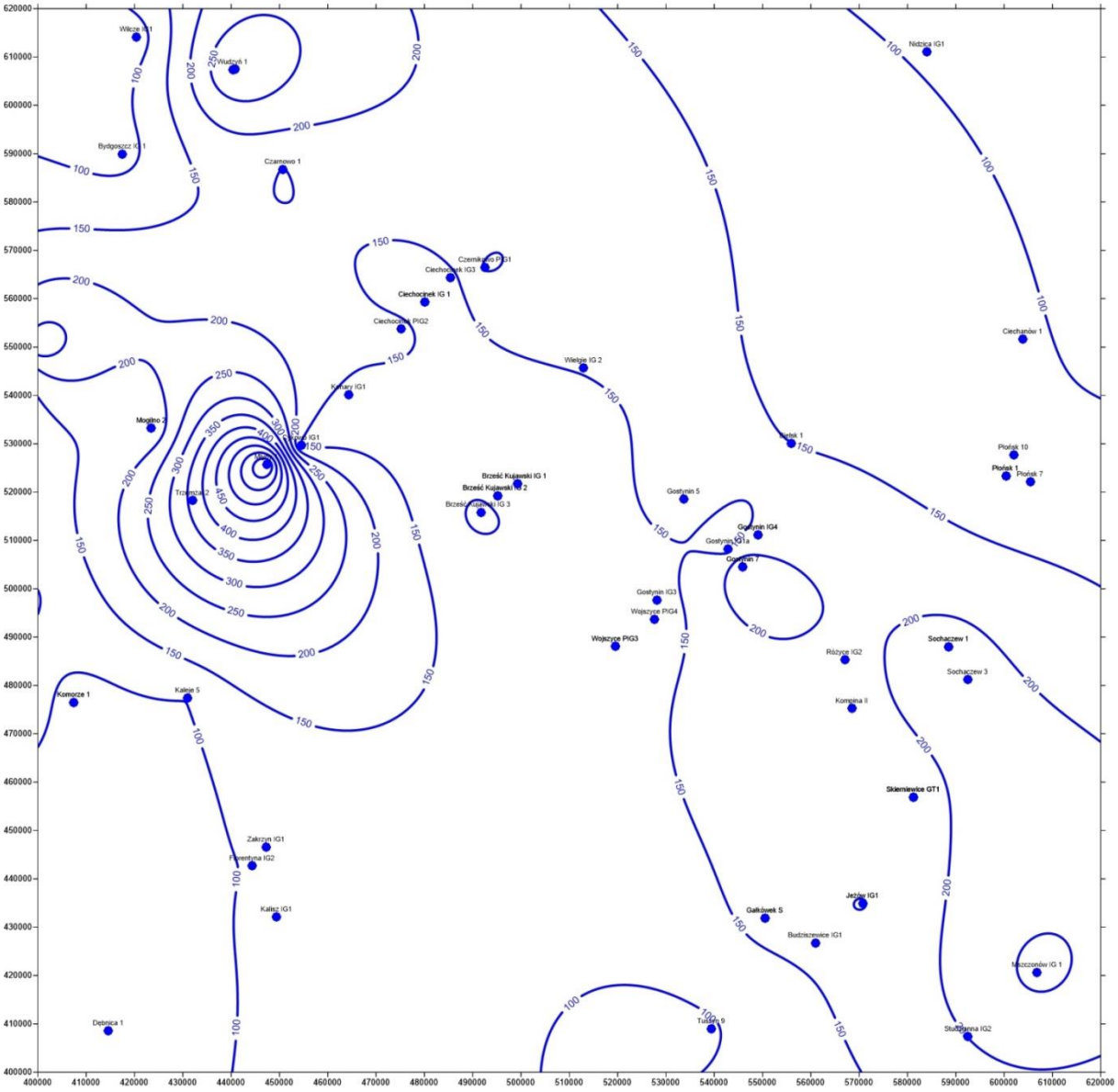


Fig. 5-49 Rozkład ciśnień piezometrycznych wód podziemnych - Jura dolna

6. Reprocessing danych sejsmicznych z obszaru trzech struktur solankowych

(Edyta Nowak-Koszla)

W celu realizacji zadania pn. „Ocena stopnia szczelności oraz charakterystyka geologiczna i geomechaniczna wybranych struktur na potrzeby podziemnego magazynowania i składowania substancji na obszarze Niżu Polskiego wykonano reprocessing archiwalnych profili sejsmicznych 2D, usytuowanych na obszarze struktur Budziszewice-Zaosie, Bielsk-Bodzanów i Konary. Lokalizację wykonanych prac na tle mapy geologicznej Polski bez utworów kenozoiku przedstawiono na Fig. 6-1.

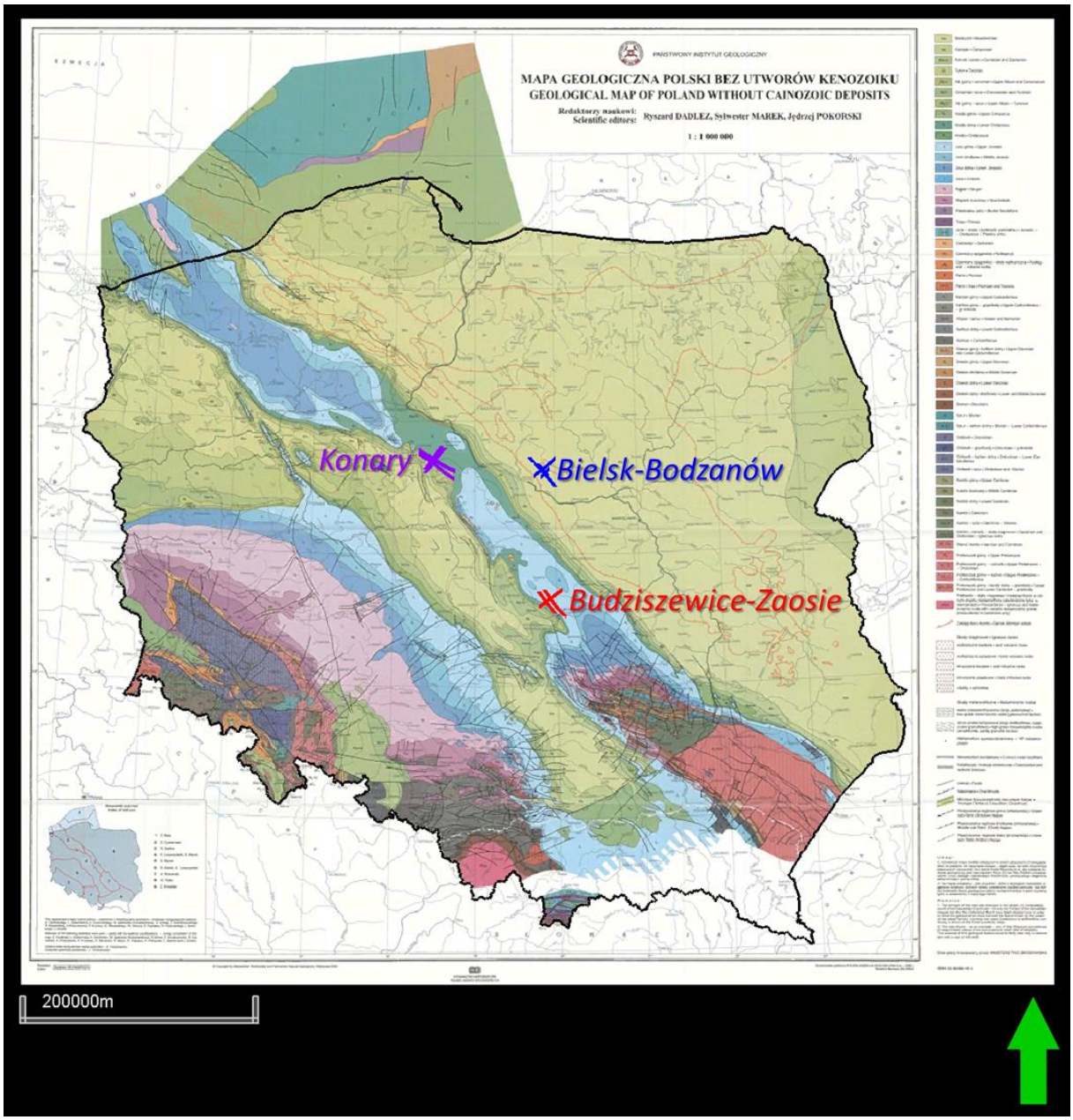


Fig. 6-1 Lokalizacja reprocessowanych profili sejsmicznych 2D w rejonie struktur Budziszewice-Zaosie, Bielsk-Bodzanów i Konary na tle mapy geologicznej Polski bez utworów kenozoiku

Źródło: Dadlez R., Marek S., Pokorski. J., 2000 – Mapa geologiczna Polski bez utworów kenozoiku (Dadlez i in., 2000)

Prace zostały zrealizowane w 2023 r. na zlecenie Państwowego Instytutu Geologicznego – Państwowego Instytutu Badawczego z siedzibą w Warszawie przy ul. Rakowieckiej 4, 00-975 Warszawa przez firmę GK Processing Sp. z o.o. z siedzibą w Balicach przy ul. Przemysłowej 17, 32-083 Balice.

Podstawą przeprowadzenia prac były:

- Umowa nr CRZP.26.1250.2022 – „Zaawansowany reprocessing danych sejsmicznych – 8 profili", obejmująca:

  - Etap I – wykonanie reprocessingu 4 profili o łącznej długości max. 80 km, przechodzących przez strukturę antyklinalną Budziszewice-Zaosie, zlokalizowaną na obszarze Niżu Polskiego w poziomach wodonośnych solankowych jury;

  - Etap II – realizację reprocessingu 4 profili o łącznej długości max. 80 km, zlokalizowanych na obszarze struktury antyklinalnej Bielsk-Bodzanów, położonej na Niżu Polskim w poziomach wodonośnych solankowych kredy.

- Umowa nr CRZP.26.00891.2023 – „Zaawansowany reprocessing danych sejsmicznych – 4 profile", na podstawie, której zrealizowano reprocessing danych sejsmicznych – 4 profili o łącznej długości max. 120 km, zlokalizowanej na obszarze struktury antyklinalnej Konary w centralnej części Niżu Polskiego w formacjach jury (prace te określane są także dalej jako Etap III reprocessingu).

6.1 Struktura Budziszewice-Zaosie

Niniejszy rozdział został opracowany na podstawie „Dokumentacji z wykonanych prac. Reprocessing danych sejsmicznych 2D. Etap I. Budziszewice-Zaosie", wykonanej w 2023 r. przez zespół firmy GK Processing Sp. z o.o. w składzie: Marek Górowski, Ewa Jaros, Olga Kurowska oraz Anna Laskownicka (Górowski i in., 2023a).

6.1.1 Cel prac

Głównym celem prac było uzyskanie możliwie najbardziej wiarygodnego odwzorowania sejsmogeologicznego w rejonie struktury Budziszewice-Zaosie w utworach mezozoiku (przede wszystkim zadanie geologiczne obejmowało rozpoznanie poziomów wodonośnych solankowych jury), które umożliwi:

- wyznaczenie warstw o małej miąższości – rzędu kilkunastu metrów (w miarę możliwości, w zależności od kontrastu prędkości i gęstości skał oraz związanych z tym współczynników odbicia),

- wyznaczenie dyslokacji, a przede wszystkim drobnych uskoków o małej amplitudzie,

- identyfikację i śledzenie serii litologicznych wzdłuż profili sejsmicznych (po dowiązaniu profili do głębokich otworów), tzn. kompleksów zbiornikowych i uszczelniających.

Na Fig. 6-2 zamieszczono zreprocessowany profil K0041274 (wersja migracji czasowej przed składaniem po aplikacji procedur CREP), zlokalizowany w rejonie struktury Budziszewice-Zaosie z zaznaczonym celem geologicznym prac.

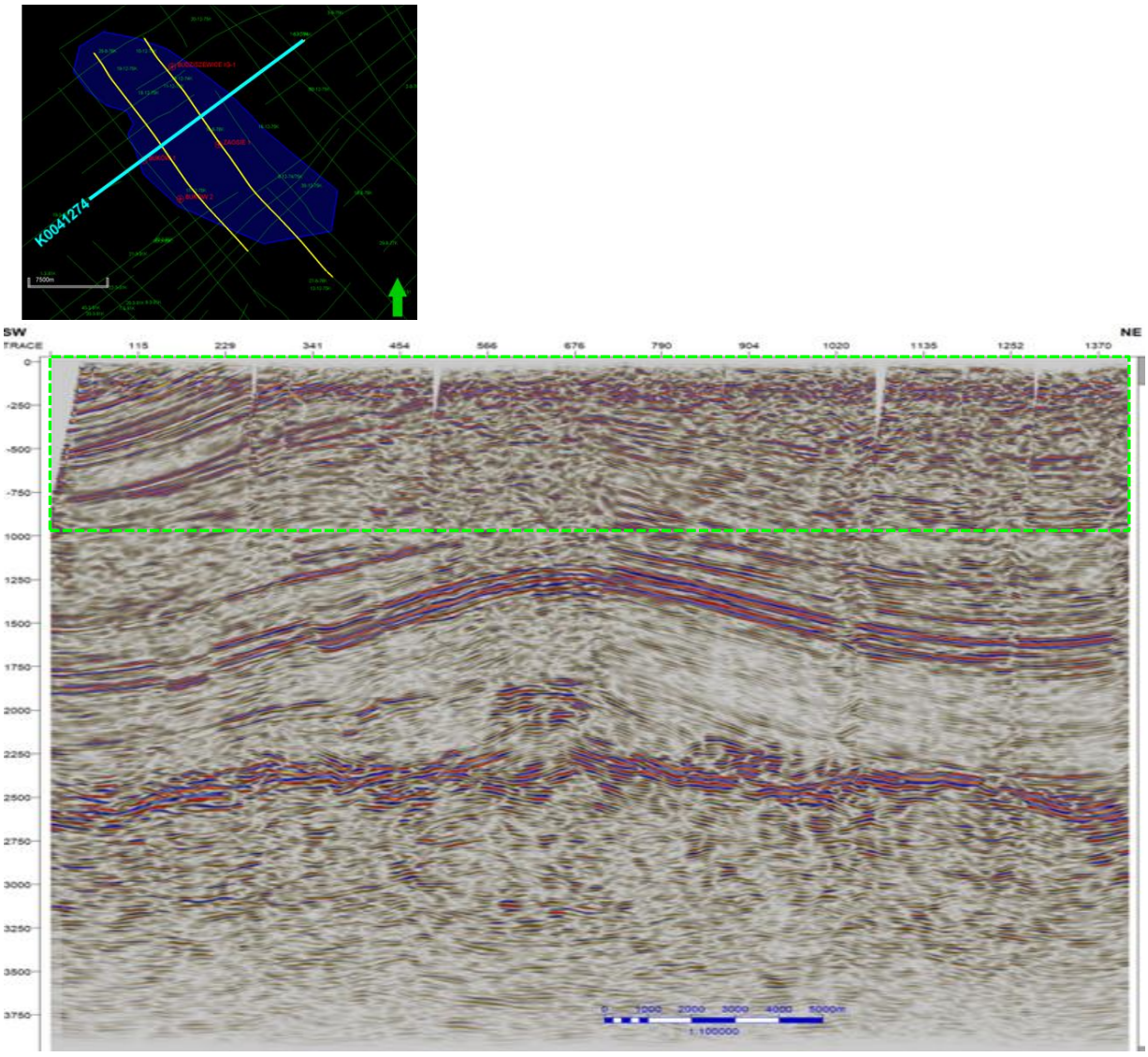


Fig. 6-2 Zreprocessowany profil K0041274 (wersja PreSTM z CREP), zlokalizowany w rejonie struktury Budziszewice-Zaosie, z zaznaczonym celem geologicznym prac

6.1.2 Zakres prac

Zakres prac obejmował wykonanie reprocessingu 4 archiwalnych profili sejsmicznych 2D o łącznej długości max. 80 km, liczonych według WPG. Profile 10-08-76K i 10-12-75K były przetwarzane w całości i połączone ze sobą. Profile 4-12-74K i 8-12-74K zostały zreprocesowane częściowo (Fig. 6-3). Zestawienie długości reprocessowanych profili i fragmentów profili sejsmicznych 2D zawiera Tabela 6-1.

Tabela 6-1 Zestawienie długości reprocessowanych profili i fragmentów profili sejsmicznych 2D w rejonie struktury Budziszewice-Zaosie

Nazwa profilu	Temat	Pierwszy PW	Ostatni PW	Długość wg WPW [km]	Długość wg WPG [km]	Długość wg WPO [km]
K0041274 (4-12-74K)	Sulejów-Tomaszów	100	924	23,87	24,69	25,56
K0081274 (8-12-74K)	Sulejów-Tomaszów	205	907	27,40	28,60	29,75
K0100876 (10-8-76K)	Łódź- Tomaszów Mazowiecki	68	322	12,70	13,88	15,05
K0101275 (10-12-75K)	Łódź- Tomaszów Mazowiecki	1	177	8,80	11,18	13,55
Razem				72,77	78,35	83,91

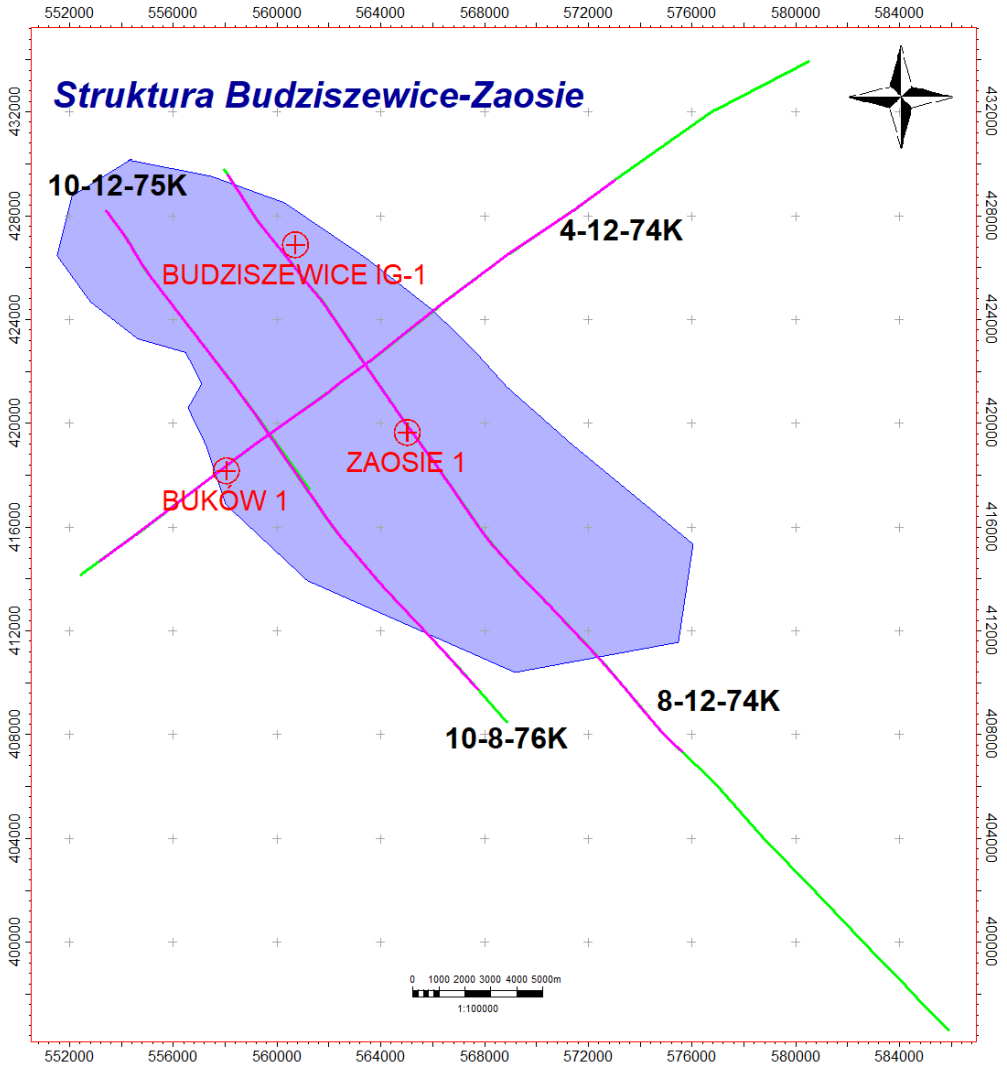


Fig. 6-3 Mapa lokalizacji reprocessowanych profili sejsmicznych 2D na obszarze struktury Budziszewice-Zaosie (kolorem zielonym zaznaczono lokalizację pełnej długości profili wg PO, kolorem różowym oznaczono lokalizację reprocessowanych profili i fragmentów profili wg WPG, kolorem czerwonym zaznaczono otwory, które wykorzystano do dowiązania danych sejsmicznych do danych otworowych)

6.1.3 Lokalizacja rejonu prac

Reprocessowane profile sejsmiczne, wykonane w rejonie struktury antyklinalnej Budziszewice-Zaosie, zlokalizowane są w centralnej części Niżu Polskiego (Fig. 6-1).

Administracyjnie profile położone są na obszarze województwa łódzkiego (Fig. 6-4), w granicach:

- powiatu łódzkiego wschodniego:
  gmina Koluszki,
- powiatu tomaszowskiego,
  gminy: Rokiciny, Będków, Ujazd, Tomaszów Mazowiecki, Lubochnia,
  Budziszewice, Żechlinek.

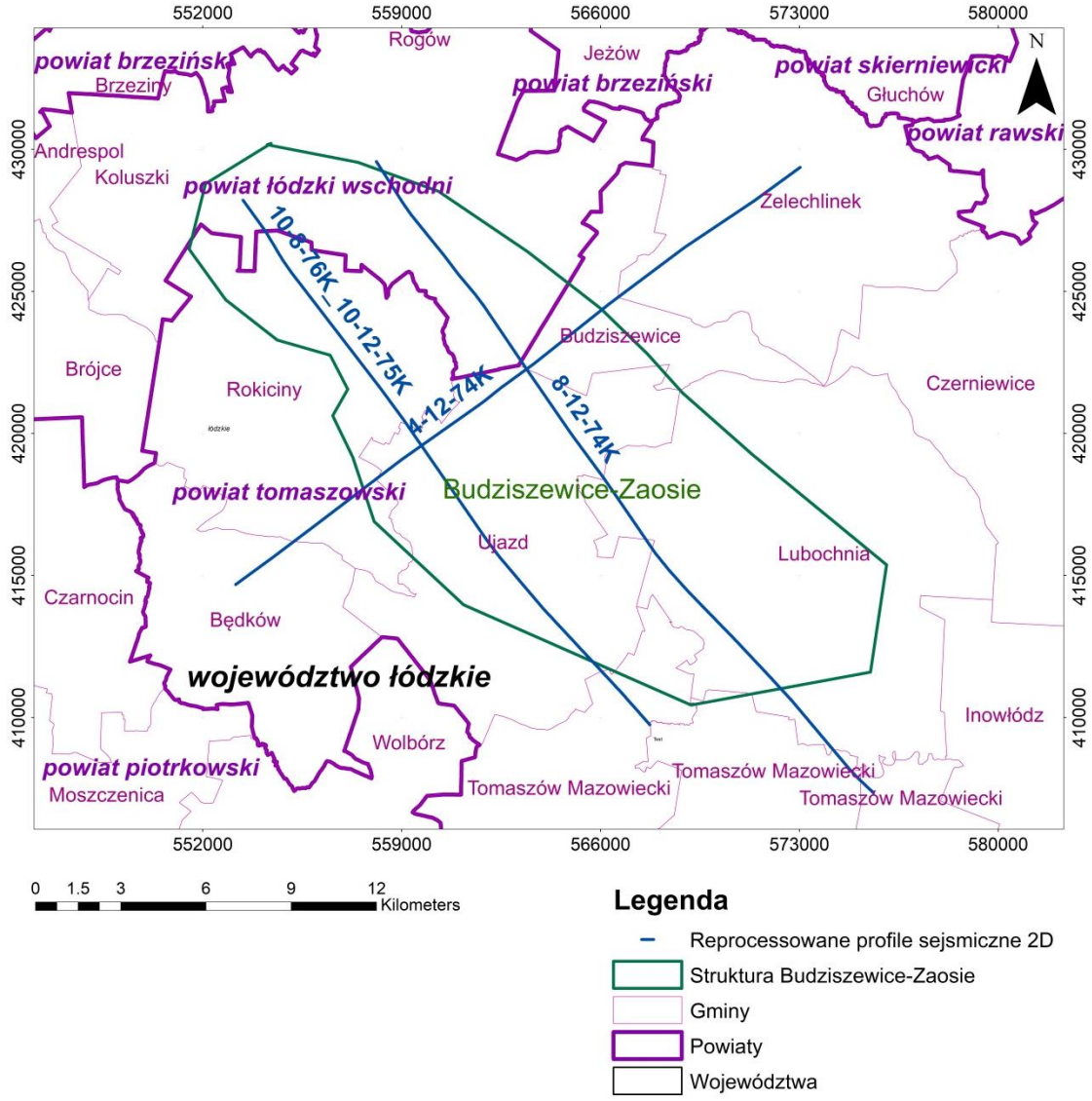


Fig. 6-4 Mapa lokalizacji reprocessowanych profili i fragmentów profili sejsmicznych 2D (wg WPG) w rejonie struktury Budziszewice-Zaosie na tle podziału administracyjnego kraju

6.1.4. Ocena jakości danych źródłowych

Reprocessowane profile sejsmiczne w rejonie struktury Budziszewice-Zaosie zostały pozyskane w latach siedemdziesiątych przez firmę Geofizyka Kraków Sp. z o.o. Parametry akwizycji, takie jak liczba kanałów aktywnych czy krotność profilowania, są ubogie (Tabela 6-2). Jest to związane z ograniczeniami technologicznymi, jakie posiadały w ówczesnych czasach cyfrowe aparatury sejsmiczne.

Tabela 6-2 Podstawowe parametry akwizycji reprocessowanych profili sejsmicznych 2D, zlokalizowanych w rejonie struktury Budziszewice-Zaosie

Nazwa profilu	Czas rejestracji [s]	Krok próbkowania [ms]	Ilość kanałów	Odległość PW [m]	Odległość PO [m]	Absolutny minimalny offset [m]	Absolutny maksymalny offset [m]	Krotność nominalna	Krotność rzeczywista	Typ rozstawu	Źródło wzbudzania
K0041274 (4-12-74K)	4	2	48	70	35	74	1732.5	12	1-15	skrajny	dynamitowe
K0081274 (8-12-74K)	4	2	48	100	50	19	2955.0	12	1-17	skrajny	dynamitowe
K0100876 (10-8-76K)	4	4	48	100	50	75	3956.0	12	1-13	skrajny	dynamitowe
K0101275 (10-12-75K)	4	2	96	100	50	65	4685.0	24	1-29	skrajny	dynamitowe

Prace realizowano przy zastosowaniu metody dynamitowej. Charakterystyczną cechą danych jest bardzo wysoka energia źródła wzbudzania. Na rekordach w niewielkim stopniu obserwowana jest fala powierzchniowa. Widoczny jest wysoki poziom zakłóceń niekoherentnych. Profile 4-12-74K i 10-8-76K nie posiadały tras z bliskich offsetów, co utrudniło pełne odwzorowanie strefy płytkiej na etapie przetwarzania. Dane dla profilu 10-8-76K prawdopodobnie zostały poddane pewnemu processingowi (filtracji?), na co wskazuje widmo amplitudowe (Fig. 6-5). Jakość danych w interwale czasowym, odpowiadającym celowi geologicznemu, jest najlepsza dla profilu 4-12-74K, a najsłabsza dla profilu 10-12-75K.

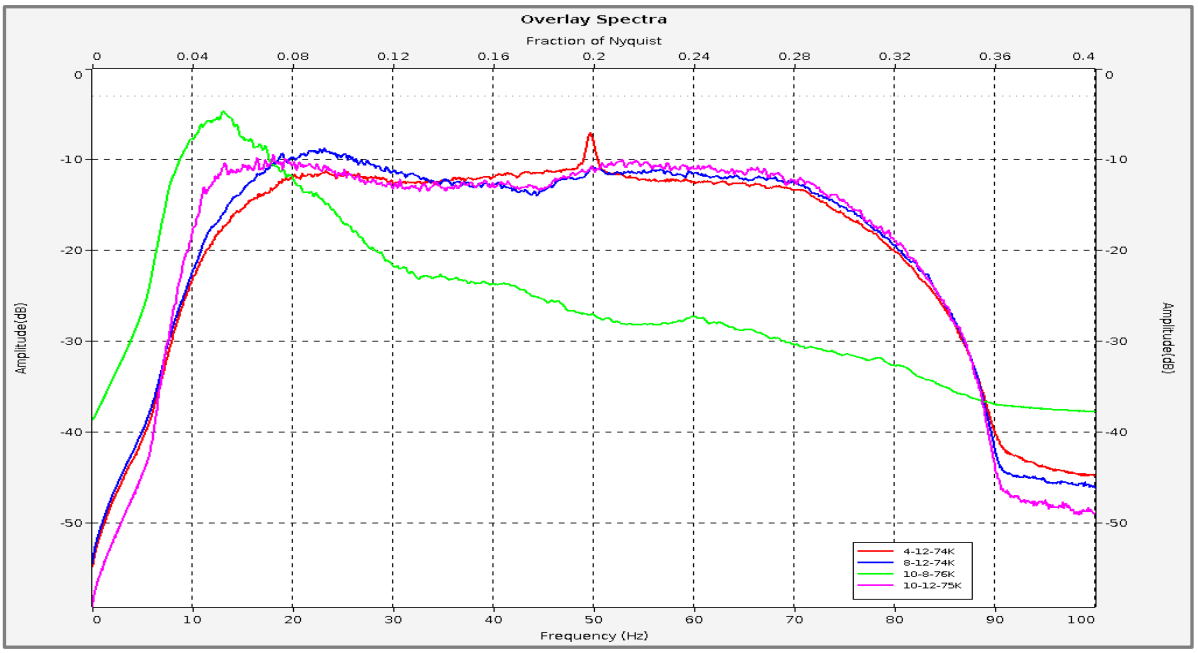


Fig. 6-5 Widma amplitudowe profili reprocessowanych w rejonie struktury Budziszewice-Zaosie, wykonane dla sum wstępnych – wersja RAP

6.1.5 Sekwencja przetwarzania

Przetwarzanie zostało zrealizowane w wersji migracji czasowej po składaniu PostSTM i migracji czasowej przed składaniem PreSTM.

Realizacja prac reprocessingowych poprzedzona była testami parametrów oraz analizą ich wyników.

Przetwarzanie do etapu sumy finalnej zostało wykonane zgodnie z następującą sekwencją:

1. wczytanie danych do programu Omega,
2. nadanie geometrii pomiarowej i jej kontrola,
3. edycja tras sejsmicznych,
4. znakowanie pierwszych wstąpień,
5. kompensacja dywergencji sferycznej i tłumienia ośrodka,
6. wstępne analizy prędkości AV0 co 2 km,
7. tłumienie zakłóceń koherentnych w domenie wspólnego punktu wzbudzania (fal powierzchniowych, bezpośrednich, refrakcyjnych itp.),
8. tłumienie niekoherentnych zakłóceń wysokoenergetycznych,
9. opracowanie modelu strefy przypowierzchniowej oraz modelu refraktorów,

10. obliczenie i wprowadzenie refrakcyjnych poprawek statycznych (poprawka statyczna pierwszego rzędu),
11. dekonwolucja powierzchniowo-zgodna Robust,
12. powierzchniowo-zgodne wyrównywanie amplitud (SCAC),
13. resztkowe tłumienie zakłóceń niekoherentnych,
14. analizy prędkości AV1 co 1 km,
15. korekta rezydualnych poprawek statycznych (pierwsza iteracja),
16. analizy prędkości AV2 co 0,5 km,
17. korekta rezydualnych poprawek statycznych (druga iteracja),
18. analizy prędkości AV3 co 0,5 km,
19. korekta resztkowych poprawek statycznych (trzecia iteracja) – Trim Statics,
20. resztkowe powierzchniowo-zgodne wyrównanie amplitud,
21. interpolacja tras i regularyzacja offsetów,
22. sumowanie tras w domenie WPG,
23. poprawa stosunku S/N po składaniu (Random Noise Attenuation),
24. poprawienie koherencji danych CREP (Structure-Guided Coherency and Resolution Enhance Processing).

Dla migracji czasowej po składaniu PostSTM wykonano przetwarzanie równoległe na zbiorze składowych bez interpolacji oraz z interpolacją.

W sekwencji przetwarzania do PostSTM wykonano następującą sekwencję procedur:

1. kompensację upadu DMO z wyjściem kolekcji WPG do analiz prędkości,
2. analizy prędkości AV-DMO co 0,5 km,
3. wprowadzenie poprawek kinematycznych,
4. określenie i zaaplikowanie mutingu interpolowanego przestrzennie,
5. kompensację finalną upadu DMO,
6. składanie tras w domenie WPG,
7. migrację czasową po składaniu PostSTM,
8. poprawę stosunku S/N (RNA),
9. poprawienie koherencji danych CREP,
10. badanie formy sygnału sejsmicznego i jego przybliżenie do sygnału zerofazowego.

Dla migracji czasowej przed składaniem PreSTM wykonano następujący processing na składowych po interpolacji:

1. eliminacja skalowania tras związanego z kompensacją dywergencji sferycznej,
2. przygotowanie migracyjnego pola prędkości,
3. pierwsza iteracja PreSTM,
4. analizy prędkości AV-pstm1 co 0,5 km
5. finalna iteracja PreSTM,
6. analizy prędkości AV-pstm2 co 0,5 km,
7. składanie tras w domenie WPG,
8. poprawa stosunku S/N (RNA),
9. poprawienie koherencji danych CREP,

10. badanie formy sygnału sejsmicznego i jego przybliżenie do sygnału zerofazowego.

Profile sejsmiczne 10-12-75K i 10-8-76K zostały połączone ze sobą na etapie interpolacji i regularyzacji danych, po aplikacji finalnych poprawek statycznych.

Omówienie zastosowanych procedur processingowych

Budowa i aplikacja geometrii

W trakcie przygotowywania geometrii zaaplikowano informacje o odwróconych i wadliwych kanałach, które były zamieszczone się źródłowych zbiorach danych ASCII.

Dla profili 4-12-74K i 8-12-74K akwizycja odbyła sią za pomocą dwóch zsynchronizowanych aparatur 24-kanałowych, więc pojedynczy rekord składa się z 48 kanałów/tras (do wprowadzenia geometrii użyto parametru SOURCE_INSTANCE, znajdującego się w zbiorach SPS i SPX).

Zapis dla profili 10-12-75K i 10-8-76K jest kombinacją wymienionych powyżej rodzajów informacji oraz powtórzeń wzbudzania dla niektórych PW (aż do wartości SOURCE_INSTANCE=6). W celu prawidłowego wykorzystania domeny wspólnego PW, zostały nadane nowe numery rekordów (bazujących na PW) i tras (TRACE_NUM).

Poprawka elewacyjna została policzona z przyjętym poziomem odniesienia 150 m i prędkością replacement 2000 m/s.

Dane zostały przetworzone w obowiązującym układzie współrzędnych PUWG 1992.

Kompensacja dywergencji sferycznej

Kompensacja dywergencji sferycznej została zaaplikowana bazując na następujących parametrach:

- 4-12-74K – funkcja ekspotencjalna 0.4,
- 8-12-74K – funkcja ekspotencjalna 0.8,
- 10-8-76K – funkcja ekspotencjalna 0.8,
- 10-12-75K – funkcja ekspotencjalna 0.6.

Tłumienie zakłóceń koherentnych

Fala powierzchniowa była widoczna na kolekcjach wspólnego punktu wzbudzania w niewielkim stopniu.

W celu jej usunięcia zastosowano procedurę NUCNS (Non Uniform Coherent Noise Supression) z następującymi parametrami: zakres prędkości dla szumu 100/150-2000/2200 m/s, zakres częstotliwości 0.1/1-15/20 Hz.

Zakłócenia monochromatyczne o częstotliwościach 50 Hz i 100 Hz zaobserwowano tylko dla profili 4-12-74K i 8-12-74K. Dla tych profili została zastosowana procedura MONO_NOISE_SUPPRESS.

Tłumienie zakłóceń niekoherentnych

Do tłumienia zakłóceń niekoherentnych wykorzystano procedurę AAA (Anomalous Amplitude Attenuation). Efekt tłumienia zakłóceń wysokoamplitudowych był obserwowany najsilniej w zakresie

wysokich częstotliwości. Zostało wykonanych 5 iteracji procedury w domenie WPW, z różnym zakresem częstotliwości oraz parametrów tłumienia.

Powtórzenie procedury AAA wykonano po etapie dekonwolucji.

Aplikacja poprawek statycznych pierwszego rzędu

Pierwsze wstąpienia zostały wypunktowane automatycznie, a następnie poddane ręcznej korekcie.

W źródłowych zbiorach danych ASCII zostały zamieszczone informacje, dotyczące interpretacji SMP. Dane te zostały zweryfikowane i sformatowane oraz wykorzystane do budowy modelu, celem obliczania refrakcyjnych poprawek statycznych.

Model strefy małych prędkości (weathering) zbudowano w oparciu o interpretację sond LVL.

Poniżej wyszczególniono parametry zastosowanego rozwiązania poprawek statycznych pierwszego rzędu:

profil 10-8-76K:

- rozwiązanie: Delay Time,
- zakres offsetów 1 refraktor: 800-1600 m,
- zakres prędkości 1 refraktor: 3450-4050 m/s,
- zakres offsetów 2 refraktor: 1700-3500 m,
- zakres prędkości 2 refraktor: 4760-5570 m/s,
- promień gładzenia prędkości refraktora: 1000 m,
- pośredni poziom odniesienia: -400 m n.p.m.,
- finalny poziom odniesienia: 150 m n.p.m.,
- replacement velocity: 2000 m/s.

profil 4-12-74K:

- rozwiązanie: VNS Tomography,
- zakres offsetów: 100-800 m,
- pośredni poziom odniesienia: -150 m n.p.m.,
- finalny poziom odniesienia: 150 m n.p.m.,
- replacement velocity: 2000 m/s,

profil 8-12-74K:

- rozwiązanie: VNS Tomography,
- zakres offsetów: 500-1200 m,
- pośredni poziom odniesienia: -150 m n.p.m.,
- finalny poziom odniesienia: 150 m n.p.m.,
- replacement velocity: 2000 m/s,

profil 10-12-75K:

- rozwiązanie: VNS Tomography,
- zakres offsetów: 200-2200 m,

- pośredni poziom odniesienia: -150 m n.p.m.,
- finalny poziom odniesienia: 150 m n.p.m.,
- replacement velocity: 2000 m/s.

Dekonwolucja

Dekonwolucja powierzchniowo-zgodna została wykonana przy użyciu algorytmu ROBUST_SC_DECON.

Zastosowano następujące parametry:

- krok predykcji:
  2 ms dla profili 8-12-74K i 10-12-75K,
  2 ms (0-1500 ms)/8 ms (2000-4000 ms) dla profilu 4-12-74K,
  4 ms (0-1500 ms)/8 ms (2000-4000 ms) dla profilu 10-8-76K,
- długość operatora: 120 ms dla wszystkich profili,
- procent wybielania: 0.01 % dla wszystkich profili.

Analizy prędkości i końcowy muting

Na początkowym etapie przetwarzania posłużono się istniejącymi prędkościami archiwalnymi, na podstawie których wykonano wstępne analizy prędkości AV0 z krokiem 2 km. Prędkości te wykorzystano do przygotowania sum kontrolnych na etapie tłumienia zakłóceń, a także do precyzyjnego definiowania okien hiperbolicznych w trakcie tłumienia zakłóceń koherentnych i niekoherentnych oraz dekonwolucji.

Po aplikacji statyki pierwszego rzędu wykonano pierwsze analizy prędkości AV1 co 1 km. Kolejne analizy AV2 przeprowadzono na danych po pierwszej iteracji rezydualnych poprawek statycznych z krokiem 0,5 km. Ostatnią analizę prędkości składania AV3 wykonano po drugiej iteracji rezydualnych poprawek statycznych co 0,5 km.

W trakcie wykonywania procedury DMO wykonano kolejne analizy prędkości AV-DMO co 0,5 km.

Procedura migracji czasowej przed składaniem wiązała się z potrzebą wykonania kolejnych analiz prędkości AV-pstm1 co 0,5 km po pierwszej iteracji PreSTM w celu przygotowania poprawnego pola migracyjnego. Końcowe analizy AV-pstm2, prowadzone co 0,5 km, pozwoliły na uzyskanie optymalnych prędkości składania dla zmigrowanych kolekcji WPG.

Po ostatnich analizach prędkości na kolekcjach WPG został przygotowany zmienny przestrzennie muting.

Rezydualne poprawki statyczne

Do obliczenia resztkowych poprawek statycznych (dwie iteracje) zastosowano moduł powierzchniowo-zgodnego wyznaczania rezydualnej statyki (REFLECTION_ MISER).

W pierwszej iteracji zastosowano następujące parametry:

dla profilu 4-12-74K, 8-12-74K i 10-8-76K:

- shift=24 ms,
- okno = 200-2600 ms,
- 100% maksymalnego offsetu,

natomiast dla profilu 10-12-75K:

- shift=24 ms,
- okno = 0-3200 ms,
- 100% maksymalnego offsetu.

W drugiej iteracji zaaplikowano dla wszystkich profili wyszczególnione poniżej parametry:

- shift=12 ms,
- okno = 200-2600 ms,
- 100% maksymalnego offsetu.

Końcowe poprawki statyczne zostały obliczone z użyciem procedury DIRECT_REFL_STATICS, która umożliwiła wyliczenie poprawek statycznych powierzchniowo-zgodnych, rozbitych na pojedyncze trasy sejsmiczne w formie korekty czasowej (TRIM_STATICS).

Zastosowano następujące parametry:

- algorytm: Repeated 1-D Minimization,
- okno czasowe korelacji 200-2600 ms,
- maksymalny shift: 28 ms.

Usuwanie fal krotnych długookresowych

Podczas analiz prędkości, zarówno na mapach energii (semblance), jak i na kolekcjach super-gathers, nie zaobserwowano ewidentnych wstąpień, związanych z występowaniem długookresowych fal krotnych. Wyniki testów pokazały niską efektywność procedur do tłumienia fal krotnych, w związku z czym zrezygnowano z ich realizacji.

Interpolacja i regularyzacja tras

W ramach przygotowania danych do migracji przed składaniem wykonano grupowanie offsetów w domenie WPG z regularnym krokiem próbkowania przestrzennego. Element ten był także niezbędny do wykonania interpolacji tras w wybranych grupach offsetowych. Zastosowano w tym celu program MPFI (Matching Pursuit Fourier Interpolation). Algorytm ten, celem rozdzielenia energii rzeczywistej od jej zaliasingowanej części, obliczał wagi od tej części widma, która nie zawiera aliasingu. Wagi te uwzględniane były przy określaniu komponentu o największej amplitudzie, który dodawano do widma iteracyjnie.

Dane wejściowe posortowano do grup offsetowych, wprowadzono resztkową poprawkę kinematyczną, a jako target podano zregularyzowaną środkową grupę offsetową.

Zastosowano następujące parametry:

- regularyzacja w obrębie pojedynczych 35/50 m grup offsetowych,
- interpolacja strukturalna 3D o promieniu 5 x 5 WPG,

- część Nyquista do utworzenia modelu sygnału: 40%,
- częstotliwość minimalna niezaliasingowana: 15 Hz,
- częstotliwość maksymalna niezaliasingowana: 30 Hz,
- otoczenie do budowy widma: 50 x 50 WPG.

Dane po interpolacji zastosowano również do migracji po składaniu. Wykonano sumy DMO oraz PostSTM. Z uwagi na to, że otrzymany po interpolacji obraz strukturalny był w kilku lokalizacjach niejednoznaczny, w porównaniu z obrazem dla danych nieinterpolowanych, przetwarzanie w ramach procedur DMO i PostSTM kontynuowano dwutorowo (w wersji dla danych interpolowanych i nieinterpolowanych).

DMO

Składowe WPG z zaaplikowanymi finalnymi statycznymi poprawkami rezydualnymi, zarówno z interpolacją jak i bez interpolacji, zostały poddane procesowi DMO (Dip Moveout Correction) w wersji 2D_COMMON_OFFSET.

Na superbinach DMO wykonano analizy prędkości AV-DMO, a następnie powtórzono procedurę DMO, wykorzystując nowe pole prędkości. Przygotowano sumę skorygowaną o wpływ upadu.

Zastosowano następujące parametry:

- wielkość grupy offsetowej - pojedyncza grupa offsetowa 35 m lub 50 m,
- apertura 51 tras/WPG,
- maksymalny upad 70°,
- zakres częstotliwości 6-110 Hz.

Migracja czasowa po składaniu PostSTM

Danymi wejściowymi do migracji były sumy DMO w wersji RAP. Aby uzyskać odwzorowanie ośrodka w rzeczywistym położeniu horyzontów czasowych, wykonano migrację po składaniu przy wykorzystaniu algorytmu FD.

Zastosowano następujące parametry:

- maksymalny upad 70°,
- częstotliwość do 100 Hz.

W celu zapewnienia optymalnego działania algorytmu migracji pole prędkości do migracji przygotowano na podstawie pola prędkości AV-pstm1, wygładzonego czasowo i przestrzennie (21 ms x 3000 m).

Migracja czasowa Kirchhoffa przed składaniem PreSTM

Do migracji czasowej na kolekcjach tras przed sumowaniem zastosowano algorytm Kirchhoffa. Dane wejściowe stanowiły składowe WPG na poziomie wygładzonej wartości elewacji (floating datum), po trzeciej iteracji rezydualnych poprawek statycznych, na których wykonano regularyzację offsetów i interpolację tras.

Zrealizowano dwie iteracje migracji czasowej przed składaniem. Wejściowym polem prędkości do pierwszej iteracji PreSTM była wersja AV3. Po pierwszej iteracji wykonano analizy prędkości AV-pstm1, ukierunkowane na uzyskanie optymalnego pola prędkości migracyjnych (stabilny horyzontalny rozkład prędkości interwałowych). Po finalnej iteracji PreSTM kolejna analiza prędkości AV-pstm2 miała na celu otrzymanie optymalnego pola prędkości składania dla zmigrowanych kolekcji WPG.

Do finalnej iteracji migracji zastosowano następujące parametry:

- algorytm migracji Kirchhoffa,
- pole prędkości AV-pstm1, gładzone wzdłuż osi czasu (21 próbek) oraz przestrzennie z promieniem 3000 m,
- apertura: 1500 m,
- zmienny kąt upadu: 65° w górnej i 40° w dolnej części sekcji,
- wielkość grup offsetowych: pojedyncza grupa offsetowa 35/50 m,
- respektowanie pełnych absolutnych offsetów,
- metoda trasowania promieni – Curved Ray Isotropic Finite Difference,
- czasowo zmienny zakres częstotliwości powiązany z kątem upadu i aperturą.

Składowe po drugiej iteracji przesortowano z powrotem do domeny WPG, skorygowano finalny muting i po sumowaniu zrealizowano przetwarzanie po składaniu, analogiczne jak dla wersji migracji po składaniu.

Processing po składaniu oraz poprawa koherencji i rozdzielczości danych

Profile sejsmiczne zostały przygotowane w trzech wersjach:

- RAP – odtworzenie rzeczywistych relacji amplitud, po składaniu użyto tylko procedury BP filter 6/12-70/90 Hz,

- AGC – dla sumy finalnej zastosowano wyrównanie amplitud przed i po składaniu (odpowiednio 128/512 ms i 128/1024 ms), a dla migracji tylko RMS 128/1024 ms; dla wszystkich profili zastosowano procedurę Random Noise Attenuation (RNA: operator 7 tras, okno czasowe 300 ms, okno przestrzenne 60 tras), BP filter 6/12-70/90 Hz, filtrację FK respektującą upady do +/- 10 ms/trasa,

- CREP (Structure-Guided Coherency and Resolution Enhance Processing) – zestaw procedur, pozwalający na poprawę koherencji sygnału sejsmicznego oraz zwiększenie rozdzielczości pionowej profilu sejsmicznego w wersji CREP2: DIP_ESTIMATION_3D + COHERENCY_FILTER_3D.

Rozwiązanie CREP2 zapewniło optymalny balans pomiędzy poprawą koherencji i rozdzielczości danych wejściowych. Procedura CREP2 efektywnie uzupełniła dane w strefie płytkiej w rejonach luk offsetowych, w związku z czym dodatkowa interpolacja post-stack nie była konieczna.

Zastosowany zestaw procedur CREP2 obejmował:

DIP_ESTIMATION_3D:

- algorytm: Dip Estimation by Scanning Method,

- wielkość analizowanego binu (w kierunku Inline i Xline): 35/50 m,
- szerokość operatora Dip Scannig: 5 (5 x 35/50 m),
- zakres analizowanych upadów w ms na trasę: +- 10 ms,

COHERENCY_FILTER_3D:

- szerokość operatora w kierunku Inline: 11,
- szerokość operatora w kierunku Xline: 5,
- pole upadów wyskalowane w stopniach.

Po zaaplikowaniu zestawu procedur CREP2 zastosowano wyrównanie amplitud oraz BP filter 6/12-55/65 Hz.

Dopasowanie profili sejsmicznych do danych otworowych

Do wykonania sejsmogramu syntetycznego wykorzystano dane z trzech otworów: Zaosie-1, Budziszewice IG-1 i Buków-1. Otwór Zaosie-1 wykonano pomiary PAdt w zakresie 2655-3414 m, znajdującym się poniżej celu badań. Dla otworów Budziszewice IG-1 i Buków-1 zostały wykonane sejsmogramy syntetyczne i wstawione, jako trasy pomocnicze, do profili sejsmicznych (odpowiednio 8-12-74K i 4-12-74K). Następnie profile sejsmiczne zostały poddane procedurze rotacji tak, aby dopasowanie do sejsmogramu syntetycznego było jak najdokładniejsze. Dla profilu 4-12-74K współczynnik korelacji po rotacji o kąt -148° i przesunięciu czasowym (shift) -15 ms wyniósł 0.23, a dla 8-12-74K współczynnik korelacji po rotacji o kąt -104° i przesunięciu czasowym (shift) -14 ms wyniósł 0.34.

Finalnie profile sejsmiczne poddano standardowej procedurze przesunięcia o stałą wartość przesunięcia czasowego, w celu dopasowania refleksów na krzyżówkach profili. Jako profil referencyjny przyjęto profil 4-12-74K. Po dopasowaniu do sejsmogramu syntetycznego profil 8-12-74K nie wymagał już dodatkowego przesunięcia czasowego. Profil 10-8-76K_10-12-75K poddano przesunięciu o 51 ms oraz rotacji fazy o 159° w celu dopasowania do profilu referencyjnego 4-12-74K.

Zastosowane parametry przedstawia Tabela 6-3.

Tabela 6-3 Dopasowanie profili sejsmicznych do danych otworowych w rejonie struktury Budziszewice-Zaosie

Nazwa profilu	Dopasowanie do sejsmogramu syntetycznego	Dopasowanie na krzyżówkach
K0041274 (4-12-74K)	rotacja fazy: -148° time shift: -15 ms	referencyjny
K0081274 (8-12-74K)	rotacja fazy: -104° time shift -14 ms	rotacja fazy: 0° time shift: 0 ms
Połączone: K0100876 (10-8-76K) K0101275 (10-12-75K)	-	rotacja fazy: 159° time shift: 51 ms

6.1.6 Wnioski

Cechą charakterystyczną reprocessowanych danych w rejonie struktury Budziszewice-Zaosie jest ich duża nieregularność, niska krotność profilowania, a także znaczące odległości pomiędzy punktami odbioru i wzbudzania. Takie parametry akwizycji mają wpływ na występowanie aliasingu przestrzennego. Zjawisko to zostało zredukowane dzięki zastosowaniu interpolacji danych MPFI.

Zbudowanie bazy geometrii było skomplikowane, gdyż wiązało się z wykorzystywaniem synchronizowanych aparatur sejsmicznych oraz powtarzaniem wzbudzania w jednym punkcie, przy równoczesnej zmianie rozstawu aktywnego.

Brak bliskich offsetów dla profilu 8-12-74K oraz 10-8-76K implikował wiele problemów, między innymi z wyborem optymalnego okna czasowego dla potrzeb obliczeń rezydualnych poprawek statycznych. Właściwe odwzorowanie strefy płytkiej w sytuacji występowania luk offsetowych było utrudnione.

Uzyskany w wyniku reprocessingu obraz pokazuje wyraźną poprawę jakości profili sejsmicznych w stosunku do danych archiwalnych, szczególnie w płytszych częściach sekcji. Porównanie jakości archiwalnego processingu i zreprocessowanej wersji profilu K0041274 oraz K0081274 zamieszczono odpowiednio na Fig. 6-6 i Fig. 6-7.

Opracowanie „Dokumentacja z wykonanych prac. Reprocessing danych sejsmicznych 2D. Etap I. Budziszewice-Zaosie” wraz z danymi cyfrowymi, stanowiącymi wyniki zrealizowanych prac jest zamieszczone na DVD w katalogu /Prace podwykonawców/Reprocessing danych sejsmicznych/ETAP_I/ DANE_FINALNE_ETAP_I.

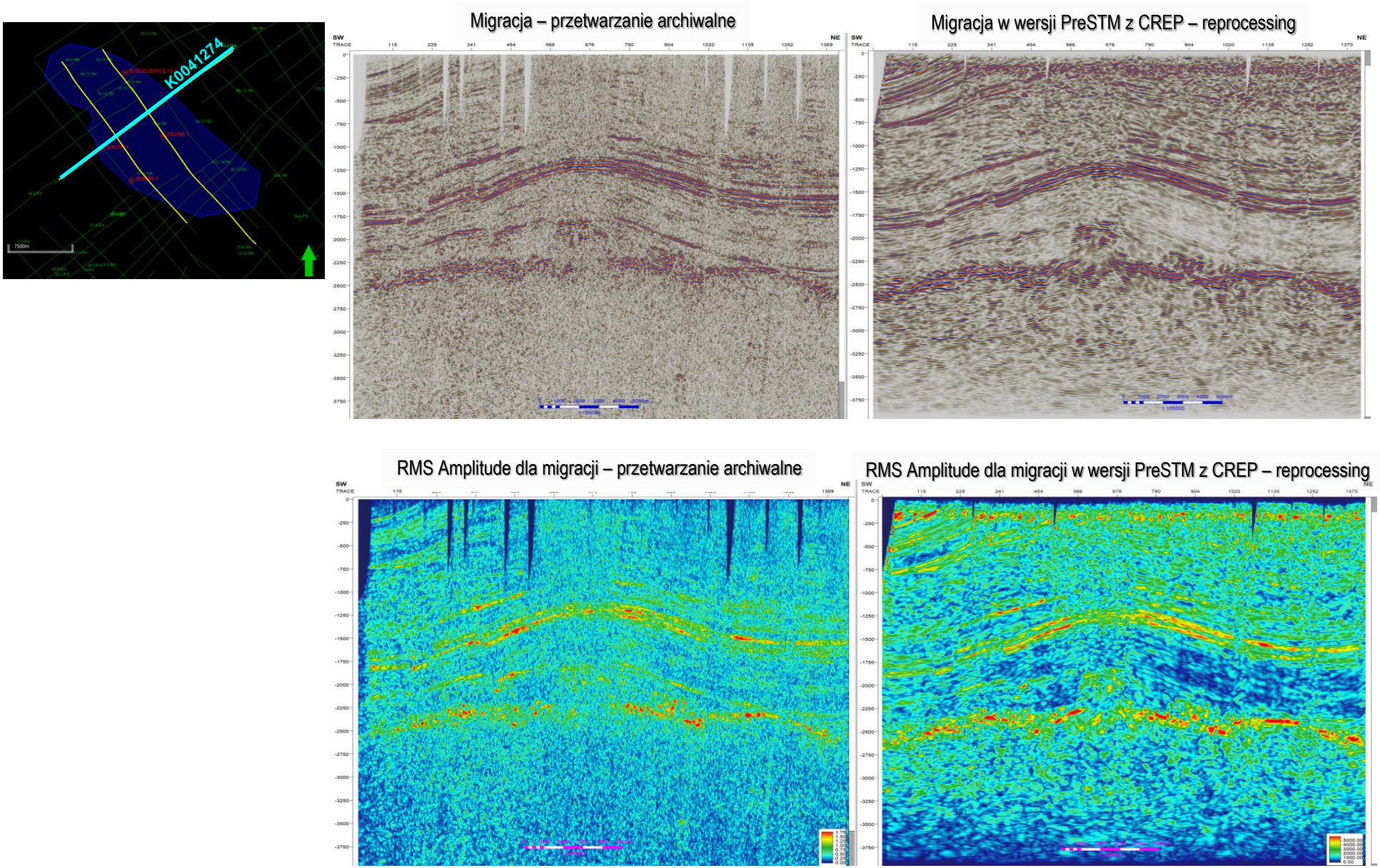
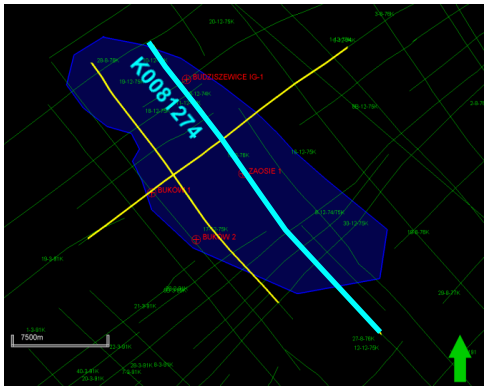
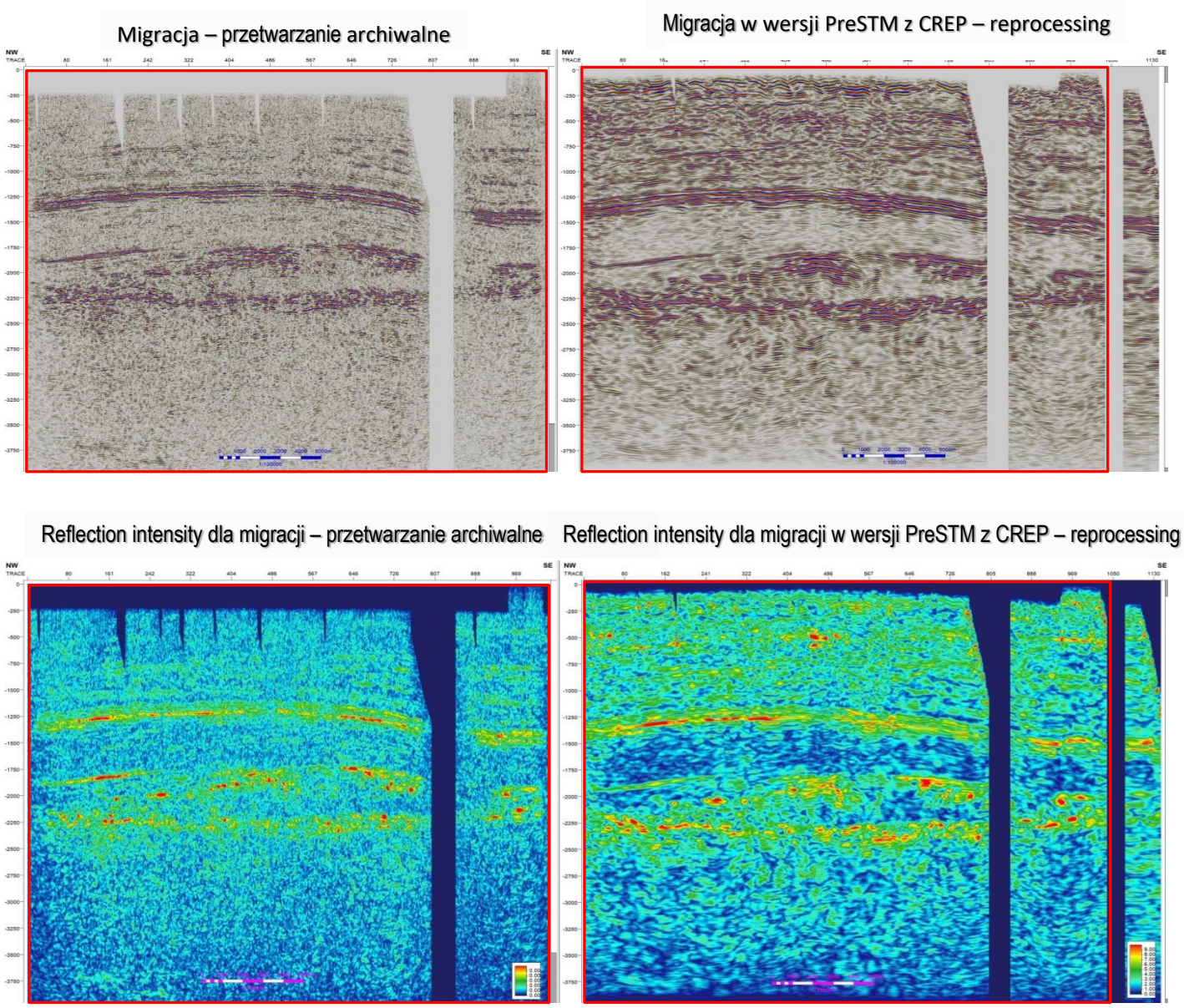


Fig. 6-6 Porównanie jakości archiwalnego processingu i zreprocessowanej wersji profilu K0041274





– *wspólna część profilu*

Fig. 6-7 Porównanie jakości archiwalnego processingu i zreprocessowanej wersji profilu K0081274

6.2 Struktura Bielsk-Bodzanów

Niniejszy rozdział został opracowany na podstawie „Dokumentacji z wykonanych prac. Reprocessing danych sejsmicznych 2D. Etap II. Bielsk-Bodzanów”, wykonanej w 2023 r. przez zespół firmy GK Processing Sp. z o.o. w składzie: Marek Górowski, Ewa Jaros, Olga Kurowska oraz Anna Laskownicka (Górowski i in., 2023b).

6.2.1 Cel prac

Głównym celem prac było uzyskanie możliwie najbardziej wiarygodnego odwzorowania sejsmogeologicznego w rejonie struktury Bielsk-Bodzanów w utworach mezozoiku (przede wszystkim zadanie geologiczne obejmowało rozpoznanie poziomów wodonośnych solankowych kredy), które umożliwi:

- wyznaczenie warstw o małej miąższości – rzędu kilkunastu metrów (w miarę możliwości, w zależności od kontrastu prędkości i gęstości skał oraz związanych z tym współczynników odbicia),
- wyznaczenie dyslokacji, a przede wszystkim drobnych uskoków o małej amplitudzie,
- identyfikację i śledzenie serii litologicznych wzdłuż profili sejsmicznych (po dowiązaniu profili do głębokich otworów), tzn. kompleksów zbiornikowych i uszczelniających.

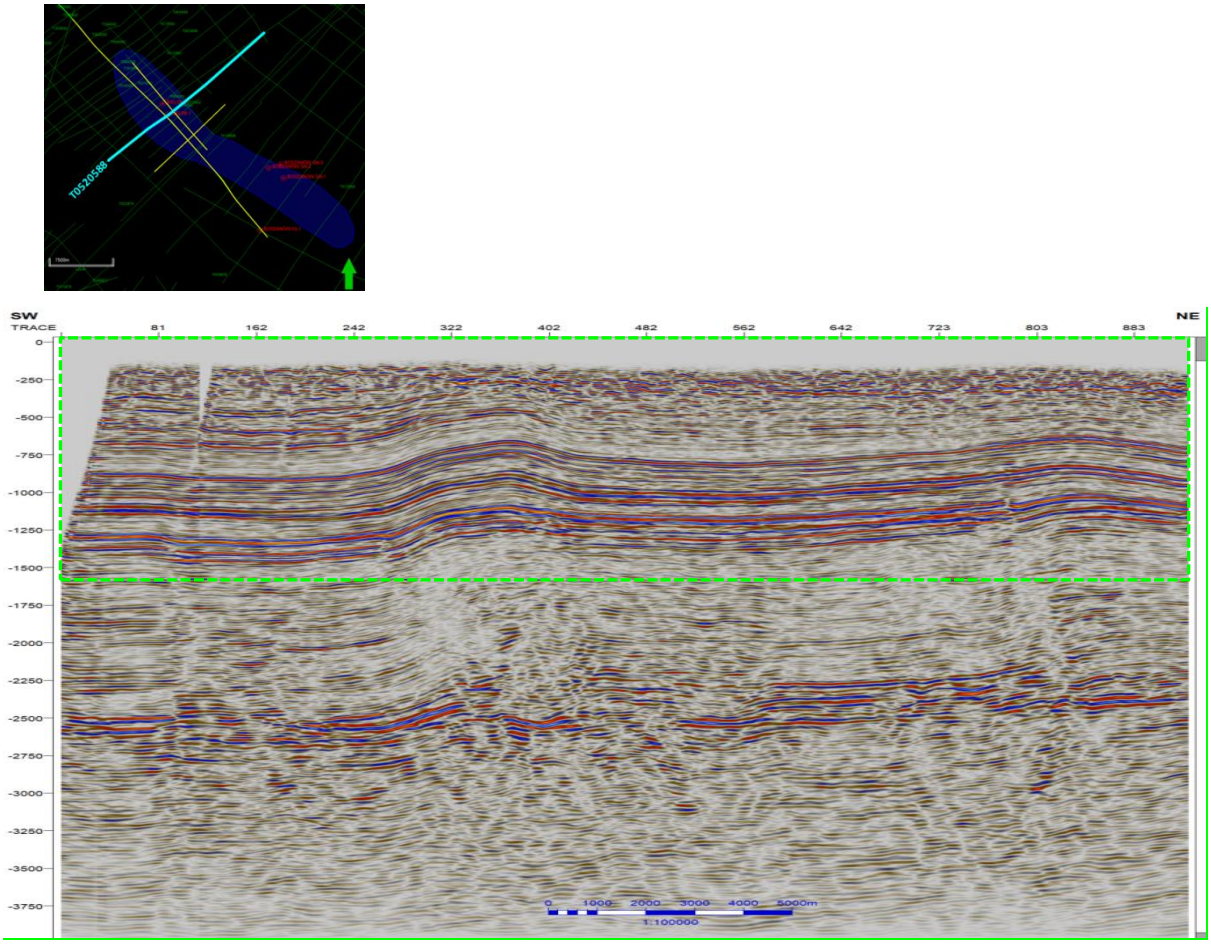


Fig. 6-8 Zreprocessowany profil K0520588 (wersja PreSTM z CREP), zlokalizowany w rejonie struktury Bielsk-Bodzanów z zaznaczonym celem geologicznym prac

– *cel geologiczny prac*

Na Fig. 6-8 zamieszczono zreprocessowany profil K0520588 (wersja migracji czasowej przed składaniem z procedurami CREP), zlokalizowany w rejonie struktury Bielsk-Bodzanów z zaznaczonym celem geologicznym prac.

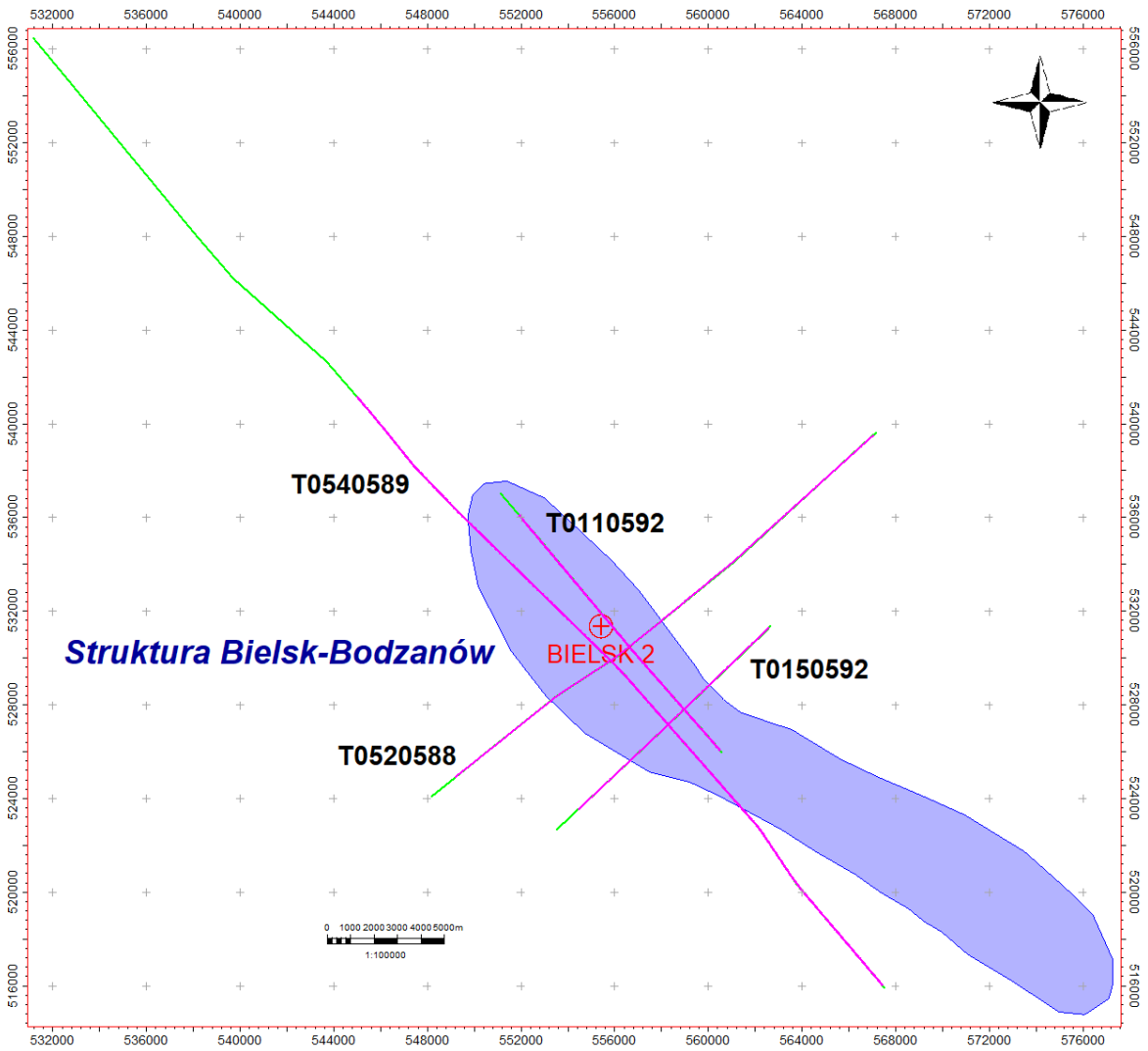


Fig. 6-9 Mapa lokalizacji reprocessowanych profili sejsmicznych 2D na obszarze struktury Bielsk-Bodzanów (kolorem zielonym zaznaczono lokalizację pełnej długości profili wg PO, kolorem różowym oznaczono lokalizację reprocessowanych profili i fragmentów profili wg WPG, kolorem czerwonym zaznaczono otwór, który wykorzystano do dowiązania danych sejsmicznych do danych otworowych)

6.2.2 Zakres prac

Zakres prac obejmował wykonanie reprocessingu 4 archiwalnych profili sejsmicznych łącznej długości max. 80 km liczonych według WPG. Profile T0520588, T0110592 i T0150592 zostały przetworzone w całości. Profil T0540589 zreprocesowano częściowo (Fig. 6-9). Zestawienie długości reprocessowanych profili i fragmentu profilu sejsmicznego 2D przedstawia Tabela 6-4.

Tabela 6-4 Zestawienie długości reprocessowanych profili i fragmentu profilu sejsmicznego 2D w rejonie struktury Bielsk-Bodzanów

Nazwa profilu	Temat	Pierwszy PW	Ostatni PW	Długość wg WPW [km]	Długość wg WPG [km]	Długość wg WPO [km]
T0110592	Rypin-Wyszogród, Kamionki - Bielsk	51	293	12,10	14,40	13,25
T0150592	Rypin-Wyszogród, Kamionki - Bielsk	52	254	10,10	12,45	11,28
T0520588	Rypin-Wyszogród, Kamionki - Sierpc	54	494	22,00	24,35	23,18
T0540589	Rypin-Wyszogród, Kamionki - Sierpc	442	1094	32,60	34,95	33,78
Razem				76,80	86,15	81,49

6.2.3 Lokalizacja rejonu prac

Reprocessowane profile sejsmiczne, wykonane w rejonie struktury antyklinalnej Bielsk-Bodzanów, zlokalizowane są w centralnej części Niżu Polskiego (Fig. 6-1).

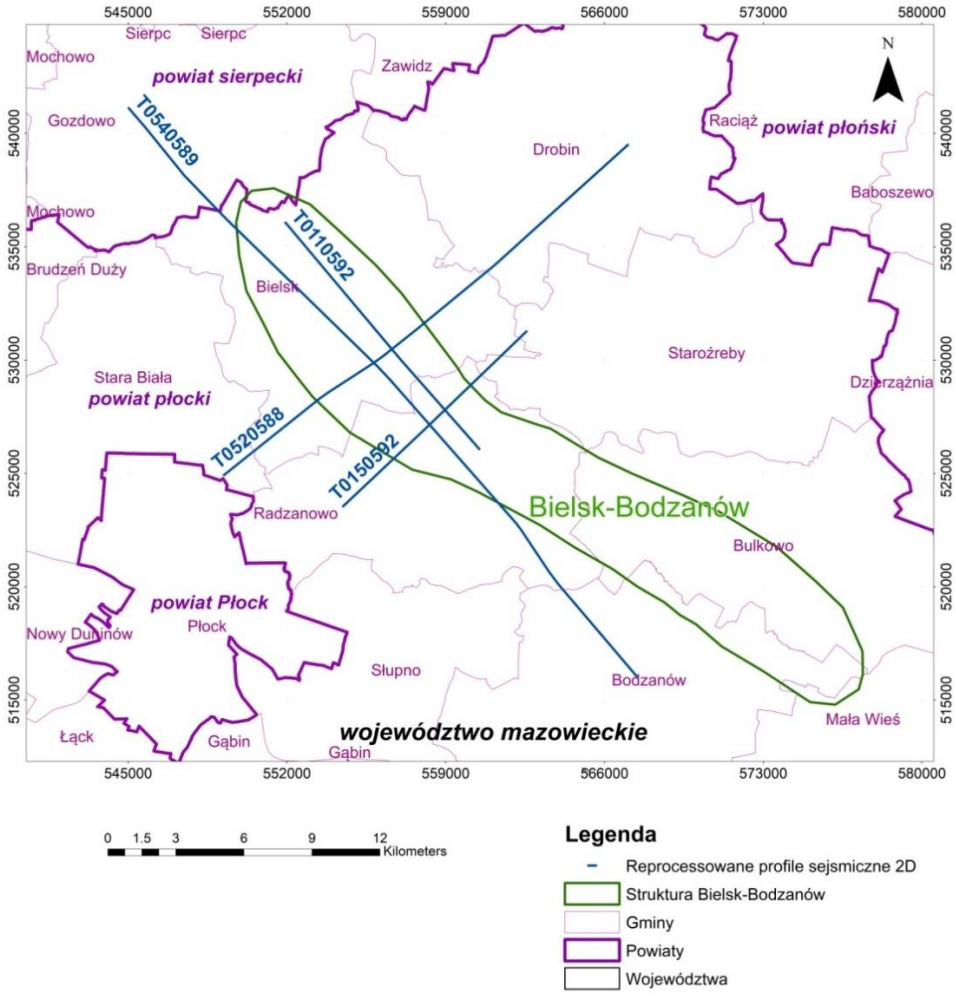


Fig. 6-10 Mapa lokalizacji reprocessowanych profili i fragmentu profilu sejsmicznego 2D (wg WPG) w rejonie struktury Bielsk-Bodzanów na tle podziału administracyjnego kraju

Administracyjnie profile położone są na obszarze województwa mazowieckiego (Fig. 6-10) w granicach:

- powiatu płockiego:
  gminy: Stara Biała, Bielsk, Drobin, Radzanowo, Staroźreby, Bodzanów, Bulkowo, Mała Wieś,
- powiatu sierpeckiego,
  gmina Gozdowo.

6.2.4 Ocena jakości danych źródłowych

Reprocessowane profile sejsmiczne w rejonie struktury Bielsk-Bodzanów zostały pozyskane przez firmę Geofizyka Toruń pod koniec lat osiemdziesiątych (profile T520588 i T0540589) i na początku lat dziewięćdziesiątych (profile T0110592 i T0150592). Parametry akwizycji, takie jak liczba kanałów aktywnych czy krotność profilowania, są ubogie (Tabela 6-5).

).

Tabela 6-5 Podstawowe parametry akwizycji reprocessowanych profili sejsmicznych 2D, zlokalizowanych w rejonie struktury Bielsk-Bodzanów

Nazwa profilu	Czas rejestracji [s]	Krok próbkowania [ms]	Ilość kanałów	Odległość PW [m]	Odległość PO [m]	Absolutny minimalny offset [m]	Absolutny maksymalny offset [m]	Krotność nominalna	Krotność rzeczywista	Typ rozstawu	Źródło wzbudzania
T0110592	4	4	48	50	50	174	2567	24	1-24	skrajny	wibratorowe
T0150592	4	4	48	50	50	199	2570	24	1-25	skrajny	wibratorowe
T0520588	4	2	48	50	50	260	2681	24	1-25	skrajny	dynamitowe
T0540589	4	2	48	50	50	268	2683	24	1-25	skrajny	dynamitowe

Prace realizowano przy zastosowaniu metody dynamitowej (profile T0540589 i T0520488) oraz wibratorowej (profile T0110592 i T0150592). Sposób wzbudzania fali sejsmicznej prezentuje się wyraźnie na widmach amplitudowych (Fig. 6-11). Dane wibratorowe charakteryzują się znacznie węższym zakresem rejestrowanych częstotliwości, co związane jest z parametrami sweep'u, takimi jak: częstotliwość początkowa (16 Hz), częstotliwość końcowa (68 Hz) oraz taper (cosinus/500 ms).

Dane dynamitowe charakteryzują się wysoką energią. Ich widmo amplitudowe jest szersze niż widmo danych wibratorowych i charakteryzują się częstotliwością dominującą, przesuniętą w stronę niższych wartości.

Dane cechują się dobrą jakością z wyraźnie reprezentującymi się refleksami związanymi z granicami sejsmicznymi o wyraźnie zdefiniowanym kontraście akustycznym. Widoczne są fale krotne długookresowe i krótkookresowe międzywarstwowe.

Poziom zakłóceń zarówno koherentnych jak i niekoherentnych jest umiarkowany.

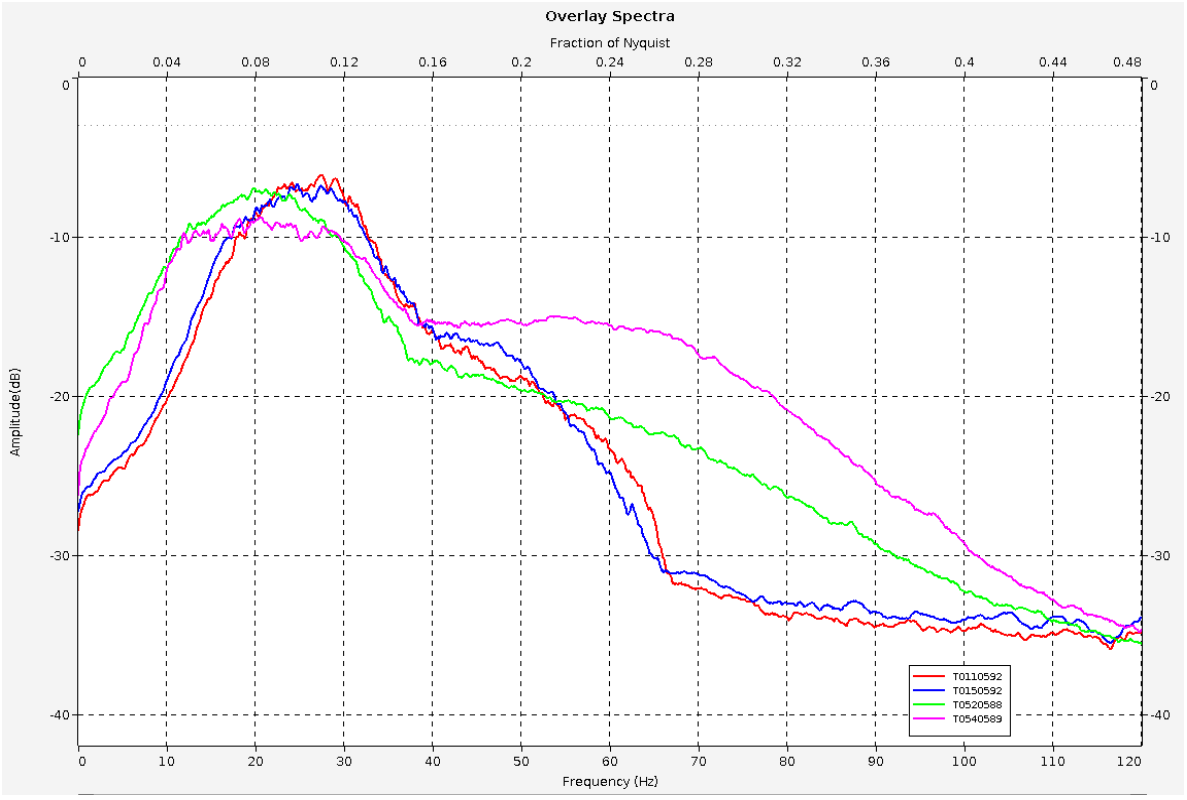


Fig. 6-11 Widma amplitudowe dla poszczególnych profili reprocessowanych w rejonie struktury Bielsk-Bodzanów, wykonane dla sum wstępnych – wersja RAP

6.2.5 Sekwencja przetwarzania

Przetwarzanie zostało zrealizowane w wersji migracji czasowej po składaniu PostSTM i migracji czasowej przed składaniem PreSTM.

Realizacja prac reprocessingowych poprzedzona była testami parametrów i analizą ich wyników.

Przetwarzanie zostało wykonane zgodnie z następującą sekwencją do etapu sumy finalnej:

1. wczytanie danych do programu Omega,

2. nadanie geometrii pomiarowej i jej kontrola,
3. edycja tras sejsmicznych,
4. znakowanie pierwszych wstąpień,
5. kompensacja dywergencji sferycznej i tłumienia ośrodka,
6. wstępne analizy prędkości AV0 co 2 km,
7. tłumienie zakłóceń koherentnych w domenie wspólnego punktu wzbudzania (fal powierzchniowych, bezpośrednich, refrakcyjnych itp.),
8. tłumienie niekoherentnych zakłóceń wysokoenergetycznych,
9. opracowanie modelu strefy przypowierzchniowej oraz modelu refraktorów,
10. obliczenie i wprowadzenie refrakcyjnych poprawek statycznych (poprawka statyczna pierwszego rzędu),
11. dekonwolucja powierzchniowo-zgodna Robust,
12. powierzchniowo-zgodne wyrównywanie amplitud (SCAC),
13. resztkowe tłumienie zakłóceń niekoherentnych,
14. analizy prędkości AV1 co 1 km,
15. korekta rezydualnych poprawek statycznych (pierwsza iteracja),
16. analizy prędkości AV2 co 0,5 km,
17. filtracja Radona,
18. korekta rezydualnych poprawek statycznych (druga iteracja),
19. analizy prędkości AV3 co 0,5 km,
20. korekta resztkowych poprawek statycznych (trzecia iteracja),
21. korekta resztkowych poprawek statycznych – Trim Statics,
22. interpolacja tras i regularyzacja offsetów,
23. sumowanie tras w WPG,
24. poprawa stosunku S/N po składaniu (Random Noise Attenuation),
25. poprawienie koherencji danych CREP (Structure-Guided Coherency and Resolution Enhance Processing).

Dla migracji czasowej po składaniu PostSTM wykonano następującą sekwencję procedur na zbiorze składowych po interpolacji:

1. kompensację upadu DMO z wyjściem kolekcji WPG do analiz prędkości,
2. analizy prędkości AV-DMO co 0,5 km,
3. wprowadzenie poprawek kinematycznych,
4. określenie i zaaplikowanie mutingu interpolowanego przestrzennie,
5. kompensację finalną upadu DMO,
6. składanie tras w WPG,
7. migrację czasową po składaniu PostSTM,
8. poprawę stosunku S/N (RNA),
9. poprawienie koherencji danych CREP,
10. badanie formy sygnału sejsmicznego i jego przybliżenie do sygnału zerofazowego.

Dla migracji czasowej przed składaniem PreSTM wykonano następujący processing na składowych po interpolacji:

1. eliminacja skalowania tras związanego z kompensacją dywergencji sferycznej,

2. przygotowanie migracyjnego pola prędkości,
3. pierwsza iteracja PreSTM,
4. analizy prędkości AV-pstm1 co 0,5 km
5. finalna iteracja PreSTM,
6. analizy prędkości AV-pstm2 co 0,5 km,
7. składanie tras WPG,
8. poprawa stosunku S/N (RNA),
9. poprawienie koherencji danych CREP,
10. badanie formy sygnału sejsmicznego i jego przybliżenie do sygnału zerofazowego.

Omówienie zastosowanych procedur processingowych

Budowa i aplikacja geometrii

Dane wejściowe nie obejmowały standardowych danych nawigacyjnych SPS. Dostępne były tabulogramy opisujące sposób dowiązania aktywnego rozstawu sejsmicznego do poszczególnych pozycji PW. Na ich podstawie przygotowano pliki nawigacyjne typu XPS. Pliki zawierające pozycje wszystkich punktów odbioru i wzbudzenia (SPS i RPS) zostały utworzone na podstawie danych zawierzających współrzędne początków, końców i ewentualnych załamań profili. Do Plików SPS i RPS zostały wprowadzone korekty pozycji ze względu na odsunięcia boczne na podstawie informacji zawartych w tabulogramach.

Wstępnie została policzone elewacyjna poprawka statyczna w czasie przygotowywania geometrii z poziomem odniesienia 100 m n.p.m. i prędkością replacement 1800 m/s.

Oryginalne współrzędne zostały przeliczone do układu PUWG 1992.

Kompensacja dywergencji sferycznej

Celem kompensacji dywergencji sferycznej zastosowano funkcję bazującą na średniej krzywej ze wstępnych analiz prędkości AV0.

Usuwanie zakłóceń

Tłumienie zakłóceń koherentnych

Fala powierzchniowa, zarówno dla danych wykonanych z zastosowaniem dynamitowego jak i wibratorowego źródła wzbudzania, jest widoczna w niewielkim stopniu.

W celu jej usunięcia zastosowano procedurę NUCNS (Non Uniform Coherent Noise Supression) z następującymi parametrami: zakres prędkości dla szumu 100/150-1800/2000 m/s, zakres częstotliwości 0.1/1-15/20 Hz.

Na żadnym z profili nie zaobserwowano zakłóceń monochromatycznych.

Tłumienie zakłóceń niekoherentnych

Do tłumienia zakłóceń niekoherentnych wykorzystano procedurę AAA (Anomalous Amplitude Attenuation). Obserwowane zakłócenia są związane głównie z działalnością człowieka, taką jak: ruch drogowy, czy prace rolnicze. Mniejszy udział w zakłóceniach niekoherentnych mają

sprzężenia/zakłócenia elektroniczne układu pomiarowego. Wykonano 5 iteracji procedury w domenie WPW, z różnym zakresem częstotliwości oraz parametrów tłumienia.

Procedurę AAA powtórzono po etapie dekonwolucji.

Aplikacja poprawek statycznych pierwszego rzędu

Pierwsze wstąpienia zostały wypunktowane automatycznie, a następnie poddane ręcznej korekcie.

W źródłowych zbiorach danych ASCII zostały zamieszczone informacje, dotyczące interpretacji SMP. Dane te zostały zweryfikowane i sformatowane oraz wykorzystane do budowy modelu dla obliczania refrakcyjnych poprawek statycznych.

Model strefy małych prędkości (weathering) zbudowano w oparciu o interpretację sond LVL.

Parametry zastosowanego rozwiązania poprawek statycznych pierwszego rzędu z wykorzystaniem oprogramowania REFRACTION MISER 3D:

- wspólne rozwiązanie trójwymiarowe dla wszystkich profili,
- model z dwoma powierzchniami refrakcyjnymi,
- zakres offsetów: 300-2250 m,
- prędkość SMP przybliżona,
- pośredni poziom odniesienia: -200 m n.p.m.,
- finalny poziom odniesienia: 100 m n.p.m.,
- replacement velocity: 1800 m/s.

Dekonwolucja

Dekonwolucja powierzchniowo-zgodna została wykonana przy użyciu algorytmu ROBUST_SC_DECON.

Zaaplikowano następujące parametry:

- krok predykcji:

2 ms (0-1500 ms)/8 ms (2000-4000 ms) dla profili T0520588 i T0540589,
4 ms (0-1500 ms)/8 ms (2000-4000 ms) dla profili T0110588 i T0150589,

- długość operatora: 120 ms,
- procent wybielania: 0.01%.

Zastosowano również dekonwolucję w domenie Tau-P z następującymi parametrami:

- krok predykcji:

42 ms dla profili T0110588 i T0150589,
36 ms dla profili T0520588 i T0540589,

- długość operatora:

210 ms dla profili T0110588 i T0150589,
180 ms dla profilu T0520588 i T0540589.

Analizy prędkości i końcowy muting

Na początkowym etapie przetwarzania posłużono się istniejącymi prędkościami archiwalnymi, na podstawie których wykonano wstępne analizy prędkości AV0 z krokiem 2 km. Prędkości te wykorzystano do przygotowania sum kontrolnych na etapie tłumienia zakłóceń, a także do precyzyjnego definiowania okien hiperbolicznych w trakcie tłumienia zakłóceń koherentnych i niekoherentnych oraz dekonwolucji.

Po aplikacji statyki pierwszego rzędu wykonano pierwsze analizy prędkości AV1 co 1 km. Kolejne analizy prędkości AV2 przeprowadzono na danych po pierwszej iteracji rezydualnych poprawek statycznych z krokiem 0,5 km.

Ostatnią analizę prędkości składania AV3 wykonano po drugiej iteracji rezydualnych poprawek statycznych, a przed trzecią iteracją poprawek rezydualnych i przed poprawkami Trim Statics z gęstością co 0,5 km.

W trakcie wykonywania procedury DMO wykonano kolejne analizy prędkości AV-DMO co 0,5 km.

Procedura migracji czasowej przed składaniem wiązała się z potrzebą wykonania kolejnych analiz prędkości AV-pstm1 co 0,5 km po pierwszej iteracji PreSTM, w celu przygotowania poprawnego pola migracyjnego. Końcowe analizy AV-pstm2 prowadzone co 0,5 km pozwoliły na uzyskanie optymalnych prędkości składania dla zmigrowanych kolekcji WPG.

Po ostatnich analizach prędkości na kolekcjach WPG został przygotowany zmienny przestrzennie muting.

Rezydualne poprawki statyczne

Do obliczenia resztkowych poprawek statycznych zastosowano moduł powierzchniowo-zgodnego wyznaczania rezydualnej statyki REFLECTION_ MISER).

W pierwszej iteracji zastosowano następujące parametry:

- shift= 24 ms,
- okno = 200-2000 ms,
- 75% maksymalnego offsetu.

W drugiej iteracji zaaplikowano poniższe wartości parametrów:

- shift=16 ms,
- okno = 200-2600 ms,
- 100% maksymalnego offsetu.

W trzeciej iteracji zastosowano następujące parametry:

- shift=16 ms,
- okno = 200-2600 ms,
- 100% maksymalnego offsetu.

Końcowe poprawki statyczne zostały obliczone z użyciem procedury DIRECT_REFL_STATICS dla trzech profili T0110588, T0150589 i T0520588, która umożliwiła wyliczenie poprawek statycznych powierzchniowo-zgodnych, rozbitych na pojedyncze trasy sejsmiczne w formie korekty czasowej (TRIM_STATICS).

Zastosowano następujące parametry:

- algorytm Repeated 1-D Minimization,
- okno czasowe korelacji 200-2000 ms,
- maksymalny shift 28 ms.

Usuwanie fal krotnych długookresowych

Podczas analiz prędkości, zarówno na mapach energii (semblance) jak i na kolekcjach super-gathers zaobserwowano długookresowe fale krotne, do tłumienia których użyto procedury RADON_FWD_TRANSFORM. Dane, po zaaplikowaniu poprawki kinematycznej, zostały poddane parabolicznej transformacji Radona. Przyjęto maksymalny zakres moveout'ów +/- 600 ms dla maksymalnego offsetu. Następne część zakłóceń zawierających fale krotne została usunięta za pomocą poligonu (POLYGON_MUTE). Zakres czasowy działania poligonu został ograniczony do okna czasowego 1500-4000 ms. Następnie dane poddano transformacji do domeny TX i odwołano poprawkę kinematyczną.

Interpolacja i regularyzacja tras

W ramach przygotowania danych do migracji przed składaniem wykonano grupowanie offsetów w obrębie WPG z regularnym krokiem próbkowania przestrzennego. Element ten był także niezbędny do wykonania interpolacji tras w wybranych grupach offsetowych. Zastosowano w tym celu dedykowany program MPFI (Matching Pursuit Fourier Interpolation). Algorytm ten, celem rozdzielenia energii prawdziwej od jej części zaliasingowanej, oblicza wagi od tej części widma, która nie zawiera aliasingu. Wagi te uwzględniane są przy określaniu komponentu o największej amplitudzie, który dodawano do widma iteracyjnie. Dane wejściowe posortowano do grup offsetowych, wprowadzono resztkową poprawkę kinematyczną, a jako target podano zregularyzowaną środkową grupę offsetową.

Alternatywnie do algorytmu MPFI przetestowano algorytm COMFI. Z uwagi na to, że analizowane dane są regularne, interpolacja COMFI zadziałała poprawnie bez efektu nadinterpretacji w miejscach bardziej skomplikowanych strukturalnie.

Zastosowano następujące rozwiązanie interpolacji:

- COMFI dla profili T0110592 i T0150592,
- MPFI dla profili T0520588 i T0540588.

Dla algorytmu MPFI zaaplikowano następujące parametry:

- regularyzacja w obrębie pojedynczych 50 m grup offsetowych,
- interpolacja strukturalna 3D o promieniu 5 x 5 WPG,
- część Nyquista do utworzenia modelu sygnału: 40%,
- częstotliwość minimalna niezaliasingowana: 15 Hz,

- częstotliwość maksymalna niezaliasingowana: 30 Hz,
- otoczenie do budowy widma: 50 x 50 WPG.

Dane po interpolacji wykorzystano również do etapu migracji po składaniu. Wykonano sumy DMO oraz PostSTM.

DMO

Składowe WPG z zaaplikowanymi finalnymi statycznymi poprawkami rezydualnymi, zarówno z interpolacją jak i bez interpolacji, zostały poddane procesowi DMO (Dip Moveout Correction) w wersji 2D_COMMON_OFFSET.

Na superbinach DMO wykonano analizy prędkości AV-DMO, a następnie powtórzono procedurę DMO, wykorzystując nowe pole prędkości. Przygotowano sumę skorygowaną o wpływ upadu.

Zastosowano następujące parametry:

- wielkość grupy offsetowej - pojedyncza grupa offsetowa 50 m,
- apertura 51 tras/WPG,
- maksymalny upad 700,
- zakres częstotliwości 6/12-70/90 Hz.

Migracja czasowa po składaniu PostSTM

Danymi wejściowymi do migracji były sumy DMO w wersji RAP. Migrację po składaniu wykonano przy wykorzystaniu algorytmu Phase Shift.

Pole do migracji przygotowano na podstawie prędkości AV-pstm1, wygładzonego czasowo i przestrzennie (21 ms x 5000 m).

Migracja czasowa Kirchhoffa przed składaniem PreSTM

Do migracji czasowej na kolekcjach tras przed sumowaniem zastosowano algorytm migracyjny Kirchhoffa. Dane wejściowe stanowiły składowe WPG na poziomie wygładzonej wartości elewacji (floating datum), po trzeciej iteracji rezydualnych poprawek statycznych, na których wykonano regularyzację offsetów i interpolację tras.

Zrealizowano dwie iteracje migracji czasowej przed składaniem. Wejściowym polem prędkości do pierwszej iteracji PreSTM była wersja AV3. Po pierwszej iteracji wykonano analizy prędkości AV-pstm1, ukierunkowane na uzyskanie optymalnego pola prędkości migracyjnych (stabilny horyzontalny rozkład prędkości interwałowych). Po finalnej iteracji PreSTM kolejna analiza prędkości AV-pstm2 miała na celu otrzymanie optymalnego pola prędkości składania dla zmigrowanych kolekcji WPG.

Do finalnej iteracji migracji zastosowano następujące parametry:

- algorytm migracji Kirchhoffa,
- pole prędkości AV-pstm1, gładzone wzdłuż osi czasu (21 próbek) oraz przestrzennie z promieniem 5 km,
- apertura 1,5 km,

- zmienny kąt upadu: 650 w górnej i 400 w dolnej części sekcji,
- wielkość grup offsetowych: pojedyncza grupa offsetowa 50 m,
- respektowanie pełnych absolutnych offsetów,
- metoda trasowania promieni – Curved Ray Isotropic Finite Difference,
- czasowo zmienny zakres częstotliwości powiązany z kątem upadu aperturą.

Składowe po drugiej iteracji przesortowano z powrotem do domeny WPG, skorygowano finalny muting i po sumowaniu zrealizowano przetwarzanie po składaniu, analogiczne jak dla migracji PostSTM.

Processing po składaniu oraz poprawa koherencji i rozdzielczości danych

Profile sejsmiczne zostały przygotowane w trzech wersjach:

- RAP – odtworzenie rzeczywistych relacji amplitud, po składaniu użyto tylko procedury BP filter 6/12-70/90 Hz,

- AGC - dla sumy finalnej zastosowano wyrównanie amplitud przed i po składaniu (odpowiednio 128/512 ms i 128/1024 ms), a dla migracji tylko RMS 128/1024 ms.

Dla wszystkich profili zastosowano procedurę Random Noise Attenuation (RNA: operator 7 tras, okno czasowe 300 ms, okno przestrzenne 60 tras), BP filter 6/12-70/90 Hz, filtrację FK respektującą upady do +/- 6 ms/trasa,

- CREP (Structure-Guided Coherency and Resolution Enhance Processing) – zestaw procedur, mający na celu poprawę koherencji danych.

Zastosowany zestaw procedur CREP obejmował:

DIP_ESTIMATION_3D:

- algorytm Dip Estimation by Scanning Method,
- wielkość analizowanego binu: 50 m,
- szerokość operatora Dip Scannig: 5 (5 x 50 m),
- zakres analizowanych upadów: +/- 6 ms/trasę,

COHERENCY_FILTER_3D:

- szerokość operatora: 11 WPG,
- pole upadów wyskalowane w stopniach.

Po zaaplikowaniu zestawu procedur CREP zastosowano wyrównanie amplitud oraz filtrację BP filter 6/12-60/70 Hz.

Dopasowanie profili sejsmicznych do danych otworowych

Do wykonania sejsmogramu syntetycznego wykorzystano dane z otworu Bielsk 2, który znajduje się w bezpośrednim sąsiedztwie profilu T0110592. W celu dopasowania danych sejsmicznych dla profilu T01105932 została zastosowana korekta czasowa: -3 ms, a następnie korekta fazowa -340. Do profilu tego zostały dowiązane pozostałe profile.

Zastosowane parametry przedstawia Tabela 6-6.

Tabela 6-6 Dopasowanie profili sejsmicznych do danych otworowych w rejonie struktury Bielsk-Bodzanów

Nazwa profilu	Dopasowanie do sejsmogramu syntetycznego	Dopasowanie na krzyżówkach
T0110592	rotacja fazy: -34° time shift: -3 ms	referencyjny
T0150592		rotacja fazy: 36° time shift: -7 ms
T0520588		rotacja fazy: 8° time shift: 27ms
T0540589		rotacja fazy: -82° time shift: 24 ms

6.2.6 Wnioski

Cechą charakterystyczną jest niska krotność profilowania, wynikająca z ubogich parametrów sejsmicznych. Jakość danych sejsmicznych i energia fal refleksyjnych, reprezentujących się na rekordach, jest dobra. Poziom zakłóceń jest na dosyć niskim poziomie.

Ważnym elementem przetwarzania było tłumienie fal krotnych, zarówno krótko jak i długookresowych.

Zbudowanie bazy geometrii wymagało stworzenia standardowych plików nawigacyjnych.

Brak bliskich offsetów implikował wiele problemów, związanych między innymi z wyborem optymalnego okna czasowego dla potrzeb obliczeń rezydualnych poprawek statycznych. Właściwe odwzorowanie strefy płytkiej w sytuacji występowania luk offsetowych było utrudnione.

Uzyskany w wyniku reprocessingu obraz pokazuje wyraźną poprawę jakości profili w stosunku do danych archiwalnych, szczególnie w płytszych częściach sekcji. Porównanie jakości archiwalnego processingu i zreprocessowanej wersji profilu T0110592 oraz T0150592 zamieszczono odpowiednio na Fig. 6-12 i Fig. 6-13.

Opracowanie „Dokumentacja z wykonanych prac. Reprocessing danych sejsmicznych 2D. Etap II. Bielsk-Bodzanów" wraz z danymi cyfrowymi, stanowiącymi wyniki zrealizowanych prac jest zamieszczone na DVD w katalogu /Prace podwykonawców/Reprocessing danych sejsmicznych/ETAP_II/ DANE_FINALNE_ETAP_II.

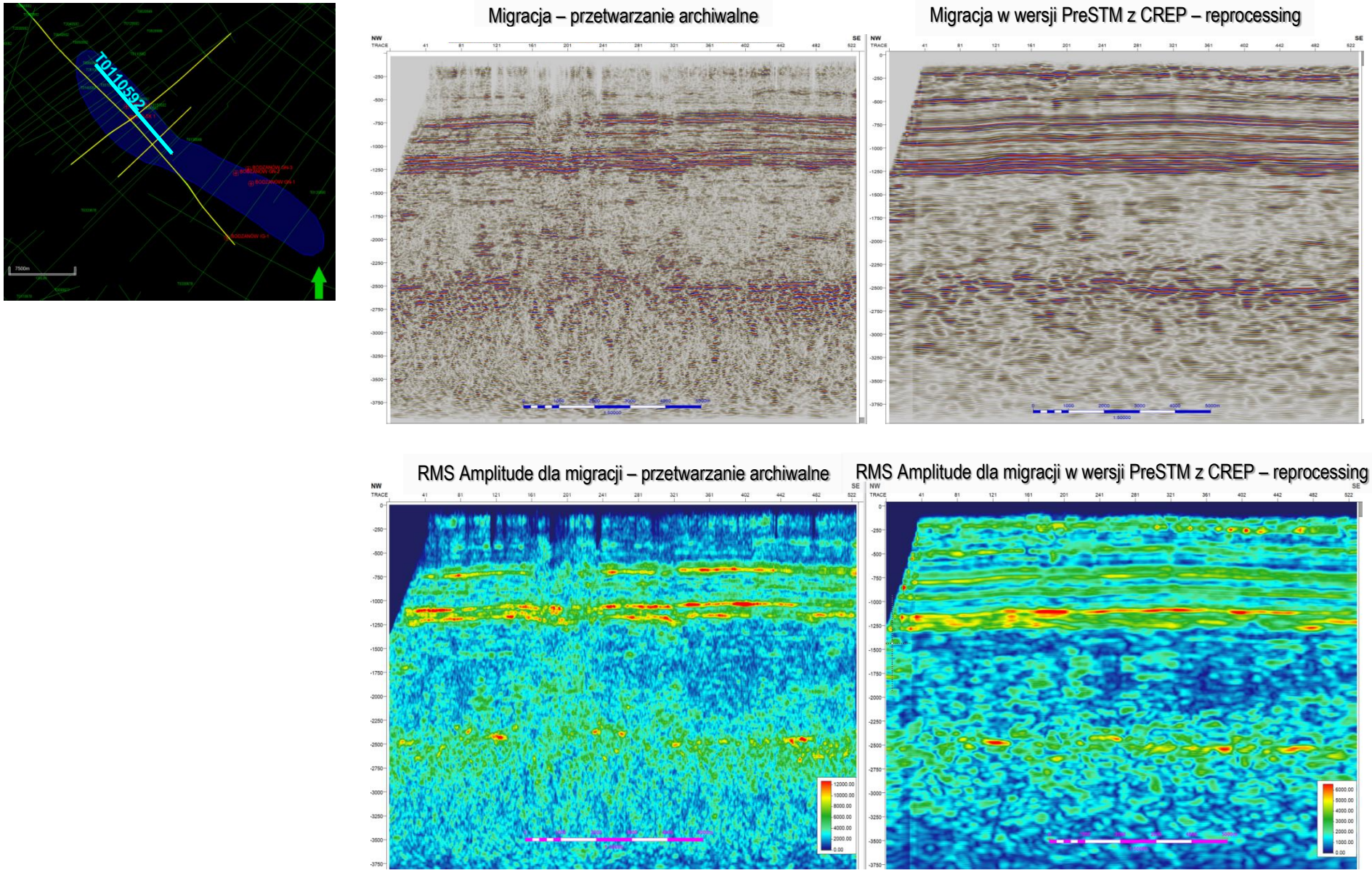


Fig. 6-12 Porównanie jakości archiwalnego processingu i zreprocessowanej wersji profilu T0110592

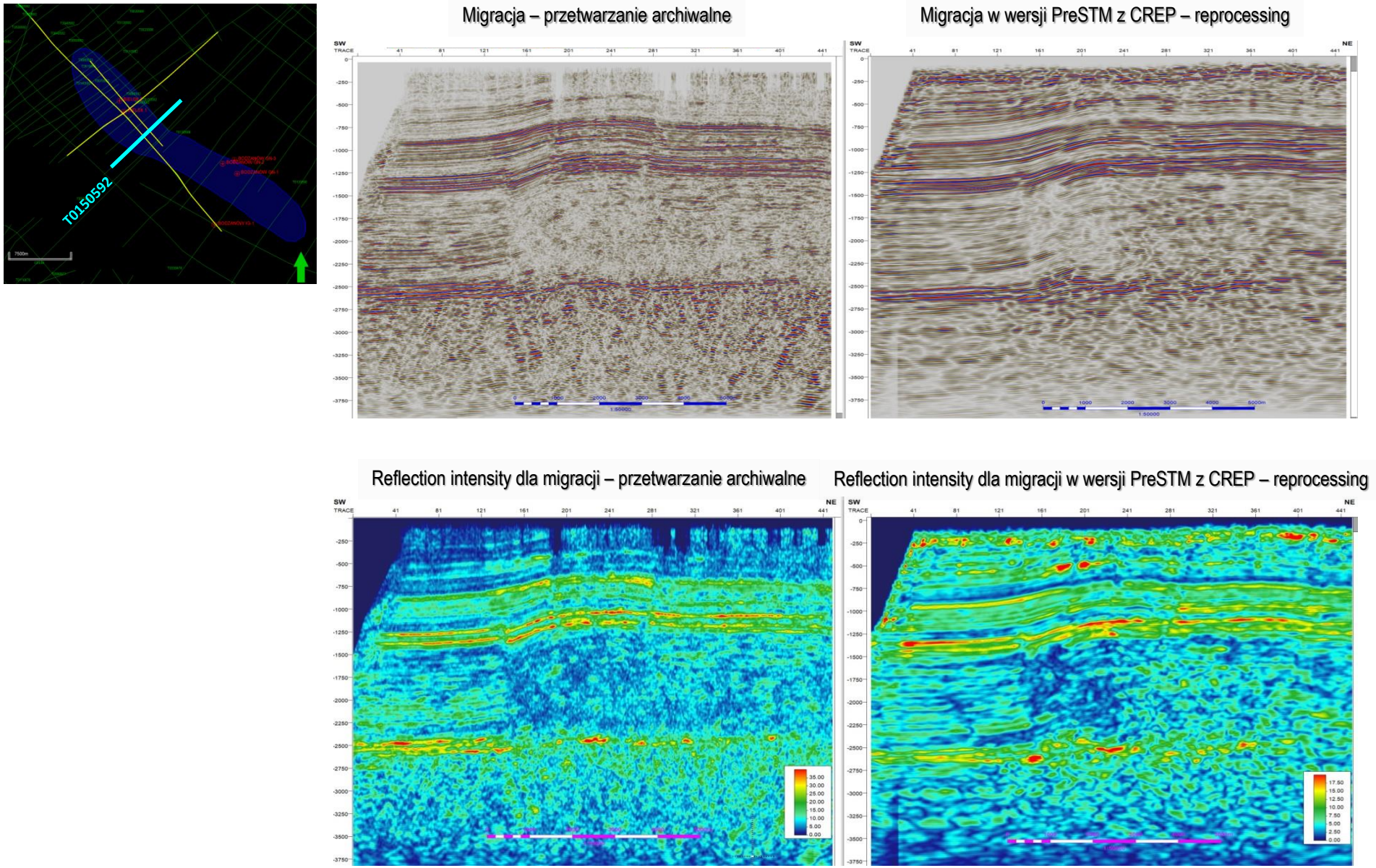
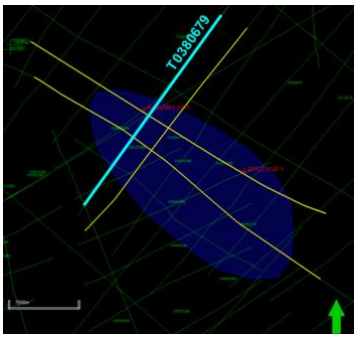


Fig. 6-13 Porównanie jakości archiwalnego processingu i zreprocessowanej wersji profilu T0150592

6.3 Struktura Konary

Niniejszy rozdział został opracowany na podstawie „Dokumentacji z wykonanych prac Zaawansowany reprocessing danych sejsmicznych 2D – 4 profile. Rejon: Inowrocław-Toruń. Struktura Konary", wykonanej w 2023 r. przez zespół firmy GK Processing Sp. z o.o. w składzie: Marek Górowski, Ewa Jaros, Olga Kurowska oraz Anna Laskownicka (Górowski i in., 2023c).



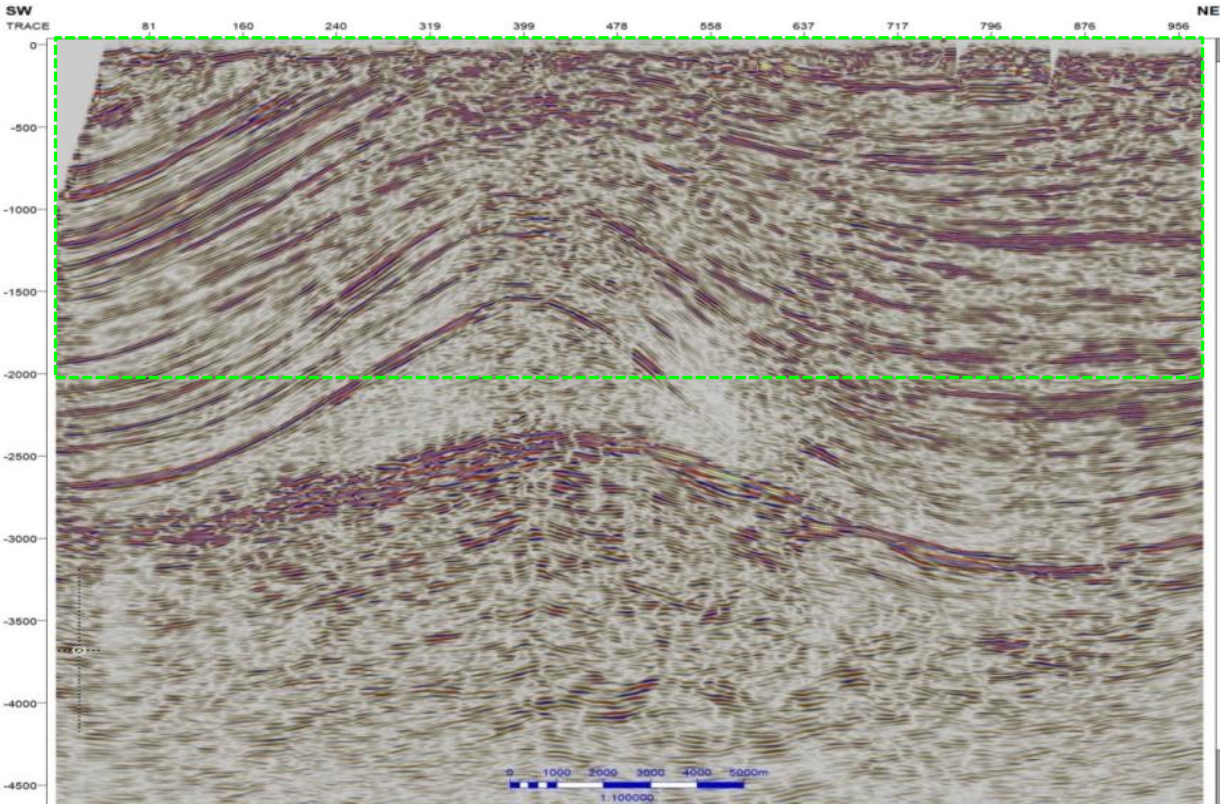


Fig. 6-14 Zreprocessowany profil T0380679 (wersja PreSTM z CREP), zlokalizowany w rejonie struktury Konary z zaznaczonym celem geologicznym prac

6.3.1 Cel prac

Głównym celem prac było uzyskanie możliwie najbardziej wiarygodnego odwzorowania sejsmogeologicznego w rejonie struktury Konary w utworach mezozoiku (przede wszystkim zadanie geologiczne obejmowało rozpoznanie poziomów wodonośnych solankowych jury), które umożliwi:

- wyznaczenie warstw o małej miąższości – rzędu kilkunastu metrów (w miarę możliwości, w zależności od kontrastu prędkości i gęstości skał oraz związanych z tym współczynników odbicia),

- wyznaczenie dyslokacji, a przede wszystkim drobnych uskoków o małej amplitudzie,

- identyfikację i śledzenie serii litologicznych wzdłuż profili sejsmicznych (po dowiązaniu profili do głębokich otworów), tzn. kompleksów zbiornikowych i uszczelniających.

Na Fig. 6-14 zamieszczono zreprocessowany profil T0380679 (wersja migracji czasowej przed składaniem z procedurami CREP), zlokalizowany w rejonie struktury Konary z zaznaczonym celem geologicznym prac.

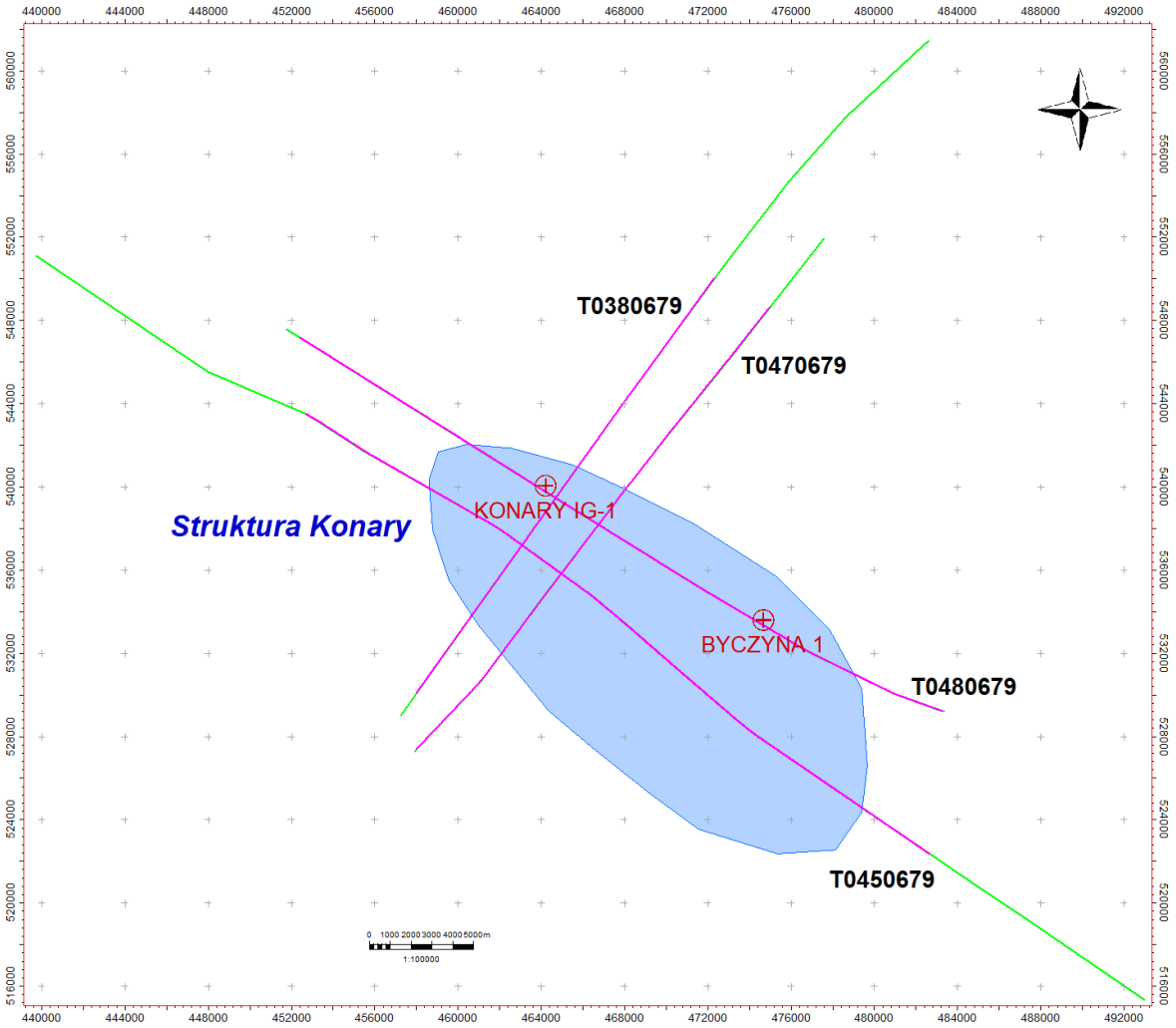


Fig. 6-15 Mapa lokalizacji reprocessowanych profili sejsmicznych 2D na obszarze struktury Konary (kolorem zielonym zaznaczono lokalizację pełnej długości profili wg PO, kolorem różowym oznaczono lokalizację reprocessowanych profili i fragmentów profili wg WPG, kolorem czerwonym zaznaczono otwory, które wykorzystano do dowiązania danych sejsmicznych do danych otworowych)

6.3.2 Zakres prac

Zakres prac obejmował wykonanie reprocessingu 4 archiwalnych profili sejsmicznych łącznej długości max. 120 km, liczonych według WPG. Profil T0480679 został przetworzony w całości. Profile T0380679, T0450679 i T0470679 zostały zreprocesowano częściowo (Fig. 6-15). Zestawienie długości reprocessowanego profilu i fragmentów profili sejsmicznych 2D przedstawia Tabela 6-7.

Tabela 6-7 Zestawienie długości reprocessowanego profilu i fragmentów profili sejsmicznych 2D w rejonie struktury Konary

Nazwa profilu	Temat	Pierwszy PW	Ostatni PW	Długość wg WPW [km]	Długość wg WPG [km]	Długość wg WPO [km]
T0380679	Włocławek – Płock, Inowrocław - Toruń	154	618	23,20	25,55	24,40
T0450679	Włocławek – Płock, Inowrocław - Toruń	430	1140	35,50	37,85	36,68
T0470679	Włocławek – Płock, Inowrocław - Toruń	107	657	27,50	27,50	27,50
T0480679	Włocławek – Płock, Inowrocław - Toruń	130	834	35,20	36,35	35,78
Razem				121,40	127,25	124,35

6.3.3 Lokalizacja rejonu prac

Reprocessowane profile sejsmiczne, wykonane w rejonie struktury antyklinalnej Konary, zlokalizowane są w centralnej części Niżu Polskiego (Fig. 6-1).

Administracyjnie profile położone są na obszarze województwa kujawsko-pomorskiego (Fig. 6-16), w granicach:

- powiatu inowrocławskiego:
  Gminy: Kruszwica, Inowrocław, Dąbrowa Biskupia,
- powiatu aleksandrowskiego:
  gminy: Zakrzewo, Koneck,
- powiatu radziejowski:
  gminy: Dobre, Osięciny, Radziejów, Bytoń, Topólka,
- powiatu włocławski:
  gmina Lubraniec.

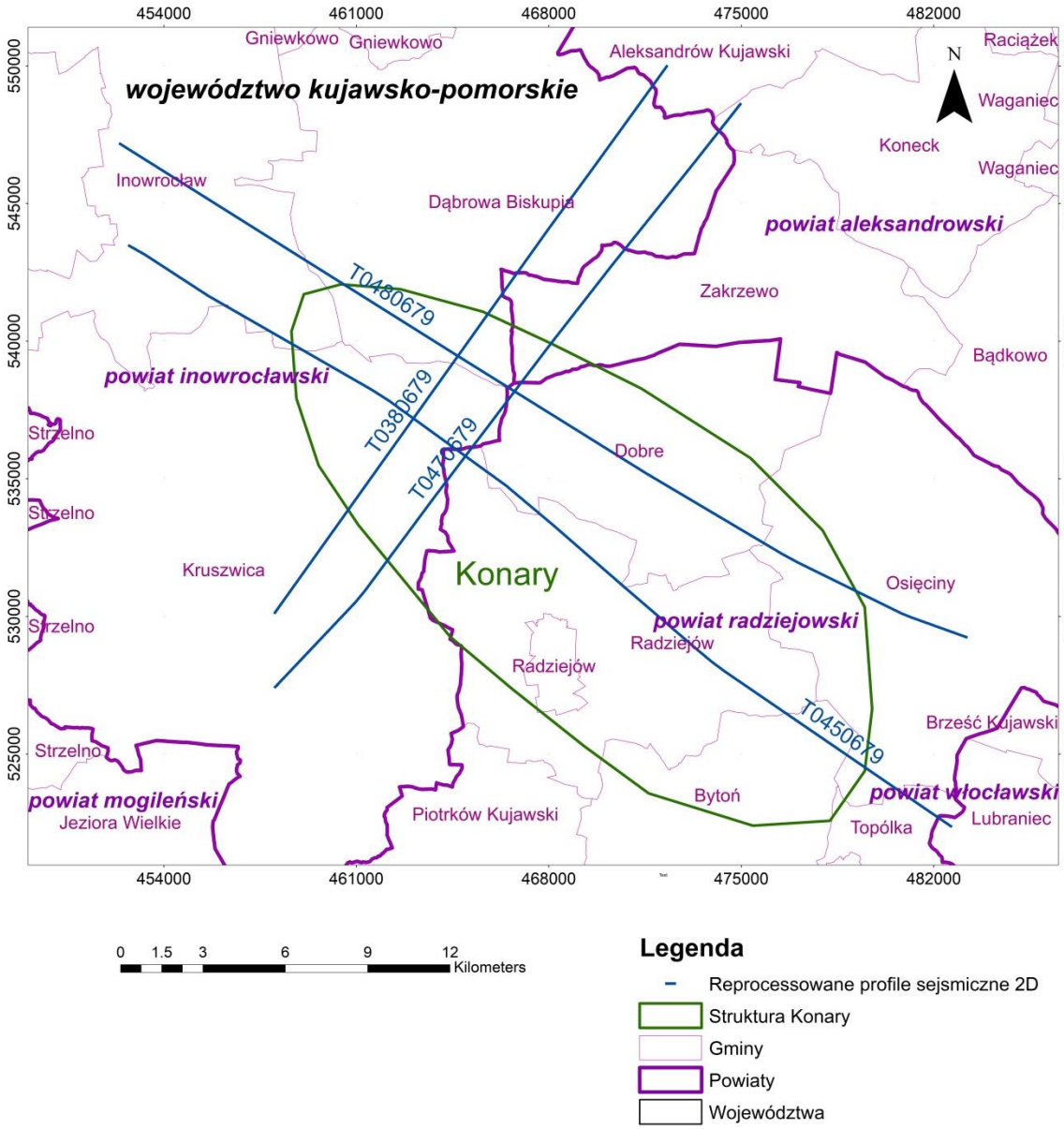


Fig. 6-16 Mapa lokalizacji reprocessowanego profilu i fragmentów profili sejsmicznych 2D (wg WPG) w rejonie struktury Konary na tle podziału administracyjnego kraju

6.3.4 Ocena jakości danych źródłowych

Reprocessowane profile sejsmiczne w rejonie struktury Konary zostały pozyskane pod koniec lat siedemdziesiątych przez firmę Geofizyka Toruń. Parametry akwizycji, takie jak liczba kanałów aktywnych czy krotność profilowania, są ubogie (Tabela 6-8).

Tabela 6-8 Podstawowe parametry akwizycji reprocessowanych profili sejsmicznych 2D, zlokalizowanych w rejonie struktury Konary

Nazwa profilu	Czas rejestracji [s]	Krok próbkowania [ms]	Ilość kanałów	Odległość PW [m]	Odległość PO [m]	Absolutny minimalny offset [m]	Absolutny maksymalny offset [m]	Krotność nominalna	Krotność rzeczywista	Typ rozstawu
T0380679	5	2	48	100	50	300	2650	12	skrajny	dynamitowe
T0450679	5	2	48	100	50	300	2650	12	skrajny	dynamitowe
T0470679	5	2	48	100	50	300	2650	12	skrajny	dynamitowe
T0480679	5	2	48	100	50	300	2650	12	skrajny	dynamitowe

Prace realizowano przy zastosowaniu metody dynamitowej. Na rekordach polowych widoczny jest bardzo wysoki poziom zakłóceń, szczególnie linowych, które „przykrywają" sygnał użyteczny. W znaczącym stopniu zaznaczają się również zakłócenia niekoherentne.

Sumaryczne widma amplitudowe dla poszczególnych reprocessowanych profili sejsmicznych przedstawiono na Fig. 6-17.

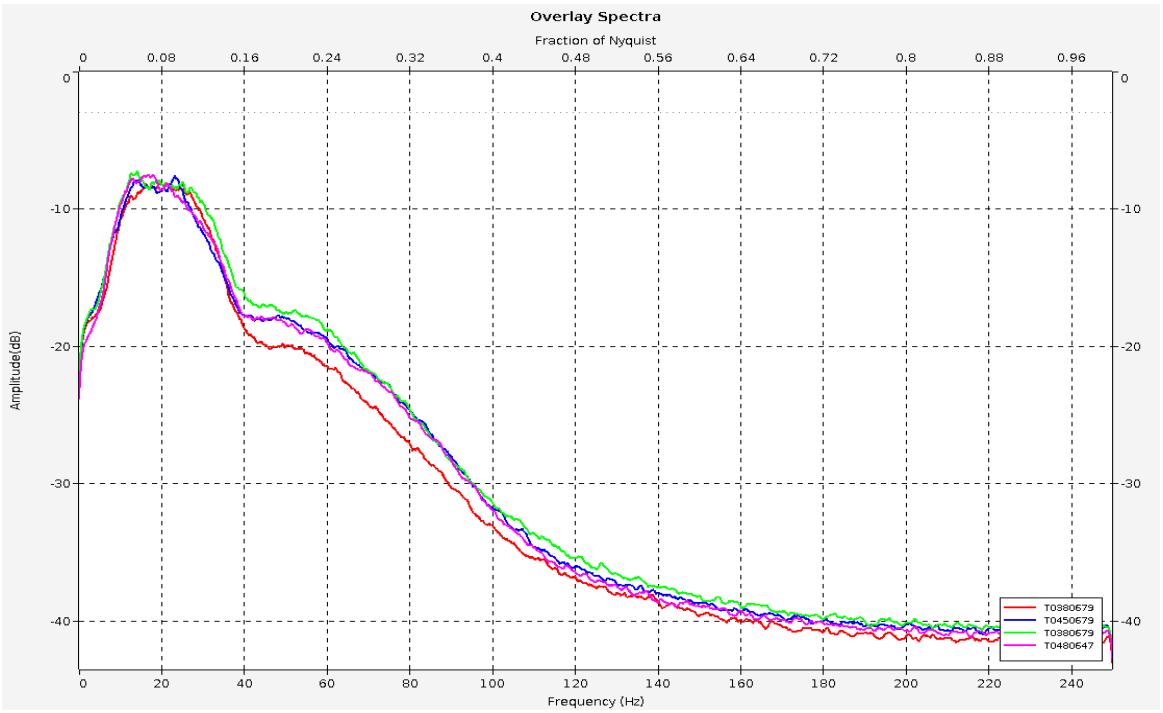


Fig. 6-17 Widma amplitudowe dla poszczególnych reprocessowanych profili w rejonie struktury Konary, wykonane dla sum wstępnych – wersja RAP

6.3.5 Sekwencja przetwarzania

Przetwarzanie zostało zrealizowane w wersji migracji czasowej po składaniu PostSTM i migracji czasowej przed składaniem PreSTM.

Realizacja prac reprocessingowych poprzedzona była testami parametrów i analizą ich wyników.

Przetwarzanie zostało wykonane zgodnie z następującą sekwencją do etapu sumy finalnej:

1. wczytanie danych do programu Omega,
2. nadanie geometrii pomiarowej i jej kontrola,
3. edycja tras sejsmicznych,
4. znakowanie pierwszych wstąpień,
5. kompensacja dywergencji sferycznej i tłumienia ośrodka,
6. wstępne analizy prędkości AV0 co 2 km,
7. tłumienie zakłóceń koherentnych w domenie wspólnego punktu wzbudzania (fal powierzchniowych, bezpośrednich, refrakcyjnych itp.),
8. tłumienie niekoherentnych zakłóceń wysokoenergetycznych,
9. opracowanie modelu strefy przypowierzchniowej oraz modelu refraktorów,
10. obliczenie i wprowadzenie refrakcyjnych poprawek statycznych (poprawka statyczna pierwszego rzędu),

11. dekonwolucja powierzchniowo-zgodna Robust,
12. powierzchniowo-zgodne wyrównywanie amplitud (SCAC),
13. dekonwolucja predykcyjna TBT,
14. resztkowe tłumienie zakłóceń niekoherentnych,
15. analizy prędkości AV1 co 1 km,
16. korekta rezydualnych poprawek statycznych (pierwsza iteracja),
17. analizy prędkości AV2 co 0,5 km,
18. korekta rezydualnych poprawek statycznych (druga iteracja),
19. analizy prędkości AV3 co 0,5 km,
20. korekta resztkowych poprawek statycznych – Trim Statics COHERENCY_STACK,
21. korekta resztkowych poprawek statycznych – Trim Statics DIRECT_STATICS,
22. tłumienie fal wielokrotnych,
23. muting punktowany przestrzennie indywidualnie dla każdego profilu,
24. sumowanie tras w WPG,
25. poprawa stosunku S/N po składaniu (Random Noise Attenuation),
26. poprawa koherencji danych CREP (Structure-Guided Coherency and Resolution Enhance Processing).

Dla migracji czasowej po składaniu PostSTM wykonano następujący processing

na zbiorze składowych po tłumieniu fal wielokrotnych:

1. kompensację upadu DMO z wyjściem kolekcji WPG do analiz prędkości,
2. analizy prędkości AV-DMO co 0,5 km,
3. wprowadzenie poprawek kinematycznych,
4. określenie i zaaplikowanie mutingu interpolowanego przestrzennie,
5. kompensację finalną upadu DMO,
6. składanie tras w WPG,
7. migrację czasową po składaniu PostSTM,
8. poprawę stosunku S/N (RNA),
9. poprawienie koherencji danych CREP,
10. badanie formy sygnału sejsmicznego i jego przybliżenie do sygnału zerofazowego.

Dla migracji czasowej przed składaniem PreSTM wykonano następujący processing na zbiorze składowych po tłumieniu fal wielokrotnych:

1. interpolacja i regularyzacja,
2. przygotowanie migracyjnego pola prędkości na bazie AV3,
3. pierwsza iteracja PreSTM,
4. analizy prędkości AV-pstm1 co 0,5 km,
5. przygotowanie migracyjnego pola prędkości na bazie AV-pstm1,
6. finalna iteracja PreSTM,
7. analizy prędkości AV-pstm2 co 0,5 km,
8. składanie tras WPG,
9. poprawa stosunku S/N (RNA),
10. poprawa koherencji danych CREP,
11. badanie formy sygnału sejsmicznego i jego przybliżenie do sygnału zerofazowego.

Omówienie zastosowanych procedur processingowych

Budowa i aplikacja geometrii

Wyznaczenie i wprowadzenie geometrii do danych polowych wykonano z użyciem plików SPS.

Wstępnie została policzona elewacyjna poprawka statyczna z poziomem odniesienia 0 m n.p.m. i prędkości replacement 1800 m/s.

Dane zostały przetworzone w obowiązującym układzie współrzędnych PUWG 1992.

Kompensacja dywergencji sferycznej

Do kompensacji dywergencji sferycznej zastosowano funkcję bazującą na średniej krzywej ze wstępnych analiz prędkości AV0.

Usuwanie zakłóceń

Tłumienie zakłóceń koherentnych

Zakłócenia koherentne reprezentują się wyraźnie na rekordach sejsmicznych w różnych zakresach prędkości liniowych. W celu ich wytłumienia wykonano procedurę NUCNS (Non Uniform Coherent Noise Supression) na etapie przetwarzania przed dekonwolucją oraz procedurę RADIAL_Filter w fazie processingu po dekonwolucji.

Procedurę NUCNS zaaplikowano z następującymi parametrami: zakres prędkości dla szumu 100/150-2200/2500 m/s, zakres częstotliwości 6-10-20-28 Hz. Dodatkowo zakres estymacji modelu zakłóceń został ograniczony na rekordach polowych za pomocą modułu VARI_TAPER_MUTE.

Procedura RADIAL_Filter wykonano stosując następujące parametry: zakres prędkości od -1800 m/s do +1800 m/s, liczba tras stworzonych w trakcie transformaty 200. Dla ochrony sygnału użytecznego także odgraniczono działanie procedury za pomocą VARI_TAPER_MUTE. Efekt tłumienia był najsilniej widoczny w zakresie niskich częstotliwości.

Z uwagi na to, że dla wszystkich profili obserwowany był niski poziom zakłóceń monochromatycznych o częstotliwości 50 Hz, nie realizowano procedury MONO_NOISE_SUPPRESION, celem uniknięcia wystąpienia zniekształceń widma amplitudowego.

Tłumienie zakłóceń niekoherentnych

Do tłumienia zakłóceń niekoherentnych wykorzystano procedurę AAA (Anomalous Amplitude Attenuation). Obserwowane zakłócenia niekoherentne i anomalie amplitudowe są spowodowane głównie działalnością człowieka, taką jak: ruch drogowy, czy prace rolnicze. Mniejszy udział w zakłóceniach niekoherentnych mają sprzężenie/zakłócenia elektroniczne układu pomiarowego. Efekt tłumienia widoczny jest najsilniej w zakresie wysokich częstotliwości.

Wykonano 5 iteracji procedury w domenie WPW, z różnym zakresem częstotliwości oraz parametrów tłumienia.

Procedurę AAA powtórzono po etapie dekonwolucji.

Aplikacja poprawek statycznych pierwszego rzędu

Pierwsze wstąpienia zostały wypunktowane automatycznie, a następnie poddane ręcznej korekcie.

W źródłowych zbiorach danych ASCII zostały zamieszczone informacje, dotyczące interpretacji SMP. Dane te zostały zweryfikowane i sformatowane oraz wykorzystane do budowy modelu, celem obliczania refrakcyjnych poprawek statycznych.

Model strefy małych prędkości (weathering) zbudowano korzystając z interpretacji sond LVL.

Do obliczenia poprawek użyto oprogramowania Flatirons.

Poprawkę statyczną pierwszego rzędu zaaplikowano z następującymi parametrami:

profil T0380679:

- rozwiązanie: VNS Tomography,
- zakres offsetów: 0-1000 m,
- pośredni poziom odniesienia: -200 m n.p.m.,
- finalny poziom odniesienia: 0 m n.p.m.,
- replacement velocity: 1800 m/s,

profil T0450679:

- rozwiązanie: Delay Time,
- zakres offsetów 1 refraktor: 350-1300 m,
- zakres prędkości 1 refraktor: 1800-2620 m/s,
- promień gładzenia prędkości refraktora: 1000 m,
- pośredni poziom odniesienia: -20 m n.p.m.,
- finalny poziom odniesienia: 0 m n.p.m.,
- replacement velocity: 1800 m/s,

profil T0470679:

- rozwiązanie: VNS Tomography,
- zakres offsetów: 200-2600 m,
- pośredni poziom odniesienia: -600 m n.p.m.,
- finalny poziom odniesienia: 0 m n.p.m.
- replacement velocity: 1800 m/s,

profil T0480679:

- rozwiązanie: Delay Time,
- zakres offsetów 1 refraktor: 340-900 m,
- zakres prędkości 1 refraktor: 1750-2400 m/s,
- zakres offsetów 2 refraktor: 1200-2500 m,
- zakres prędkości 2 refraktor: 2770-4400 m/s,
- promień gładzenia prędkości refraktora: 1000 m,
- pośredni poziom odniesienia: -600 m n.p.m.,
- finalny poziom odniesienia: 0 m n.p.m.,

- replacement velocity: 1800 m/s.

Dekonwolucja

Dekonwolucja powierzchniowo-zgodna została wykonana przy użyciu algorytmu ROBUST_SC_DECON z następującymi parametrami:

- krok predykcji: 2 ms (0-1500 ms) / 8 ms (2000-5000 ms),
- długość operatora: 120 ms,
- procent wybielania: 1%.

Zastosowano dekonwolucję TBT w domenie T-X z parametrami wyszczególnionymi poniżej:

- krok predykcji: 24 ms (0-2000 ms) i 48 ms (2000-5000 ms),
- długość operatora: 120 ms (0-2000 ms) i 240 ms (2000-5000 ms).

Analizy prędkości i końcowy muting

W początkowym etapie przetwarzania posłużono się krzywą prędkości uzyskaną na podstawie dopasowania paraboli do poszczególnych refleksów fali odbitej. Na ich podstawie wykonano wstępne analizy prędkości AV0 z krokiem 2 km. Prędkości uzyskane w trakcie tych analiz zostały użyte do przygotowania sum kontrolnych na etapie tłumienia zakłóceń, a także do precyzyjnego definiowania okien hiperbolicznych, użytych w trakcie tłumienia zakłóceń koherentnych i niekoherentnych oraz dekonwolucji.

Po aplikacji statyki pierwszego rzędu wykonano pierwsze analizy prędkości AV1 co 1 km. Kolejne analizy prędkości AV2 wykonano na danych po pierwszej iteracji rezydualnych poprawek statycznych z krokiem 0,5 km. Ostatnią analizy prędkości składania AV3 zrealizowano po drugiej iteracji rezydualnych poprawek statycznych, a przed trzecią iteracją poprawek rezydualnych (Trim Statics) co 0,5 km.

W trakcie wykonywania procedury DMO wypikowano kolejne analizy prędkości AV-DMO co 0,5 km.

Procedura migracji czasowej przed składaniem wiązała się z potrzebą wykonania analiz prędkości AV-pstm1 po pierwszej iteracji PreSTM, w celu przygotowania poprawnego pola migracyjnego. Końcowe analizy AV-pstm2 przeprowadzone co 0,5 km pozwoliły na uzyskanie optymalnych prędkości składania dla zmigrowanych kolekcji WPG.

Po ostatnich analizach prędkości na kolekcjach WPG został przygotowany zmienny przestrzennie muting.

Rezydualne poprawki statyczne

Do obliczenia resztkowych poprawek statycznych zastosowano moduł powierzchniowo-zgodnego wyznaczania rezydualnej statyki (REFLECTION_ MISER).

W pierwszej iteracji zastosowano następujące parametry:

- time shift: 24 ms,
- okno: 200-2500 ms,

- 75% maksymalnego offsetu.

W drugiej iteracji zaaplikowano poniższe parametry:

- time shift: 16 ms,
- okno: 200-3000 ms,
- 100% maksymalnego offsetu.

Końcowe poprawki statyczne (Trim statics) zostały obliczone z użyciem procedury DIRECT_REFL_STATICS oraz COHERENCY_STACK.

Procedurę DIRECT_REFL_STATICS zaaplikowano z następującymi parametrami:

- algorytm: Repeated 1-D Minimization,
- okno czasowe korelacji: 200-3000 ms,
- maksymalny shift: 28 ms,
- maksymalny offset: 75%,
- mute: 50%.

Przy stosowaniu procedury COHERENCY_STACK przyjęto parametry wyszczególnione poniżej:

- maksymalny shift zmienny o wartościach pomiędzy 8-12 ms,
- ilość okien czasowych: 5,
- ilość sąsiednich tras służących do stworzenia trasy modelowej przed korelacją - 3.

Usuwanie fal krotnych długookresowych

Podczas analiz prędkości, zarówno na mapach energii (semblance), jak i na kolekcjach super-gathers, zaobserwowano występowanie wstąpienia, związane z występowaniem długookresowych fal krotnych. Wykonano procedurę WEIGHTED_LS_RADON, której działanie było ograniczone poligonem - minimalny czas wynosił 900 ms.

DMO

Składowe WPG z zaaplikowanymi finalnymi statycznymi poprawkami rezydualnymi, zostały poddane procesowi DMO (Dip Moveout Correction) w wersji 2D_COMMON_OFFSET.

Na superbinach DMO wykonano analizy prędkości AV-DMO, a następnie powtórzono procedurę DMO, wykorzystując nowe pole prędkości. Przygotowano sumę skorygowaną o wpływ upadu.

Zastosowano następujące parametry:

- wielkość grupy offsetowej - poczwórna grupa offsetowa 200 m,
- apertura 11 tras/WPG,
- maksymalny upad 700,
- zakres częstotliwości 6-12-70-90 Hz.

Migracja czasowa po składaniu PostSTM

Danymi wejściowymi do migracji były sumy DMO przygotowane w wersji RAP. Migrację po składaniu wykonano przy wykorzystaniu algorytmu FX.

Pole do migracji przygotowano na podstawie rozkładu prędkości AV-pstm1, wygładzonego czasowo i przestrzennie (21 ms x 5000 m).

Interpolacja i regularyzacja tras

Bardzo istotnym etapem przygotowania danych do migracji przed składaniem jest grupowanie offsetów w obrębie WPG z regularnym krokiem próbkowania przestrzennego. Element ten jest także niezbędny do wykonania interpolacji tras w wybranych grupach offsetowych.

W ramach przygotowania danych do migracji przed składaniem wykonano grupowanie offsetów w obrębie WPG z regularnym krokiem próbkowania przestrzennego. Element ten był także niezbędny do wykonania interpolacji tras w wybranych grupach offsetowych. Zastosowano w tym celu interpolację COMFI ze względu na najlepszy wynik testów, biorąc pod uwagę lepsze odwzorowanie strefy płytkiej strefy oraz wierzchołka i skłonów antykliny, a także niższy poziom zakłóceń w porównaniu z innymi rozwiązaniami.

Migracja czasowa Kirchhoffa przed składaniem PreSTM

Do migracji czasowej na kolekcjach tras przed sumowaniem zastosowano algorytm migracyjny Kirchhoffa. Dane wejściowe stanowiły składowe WPG na poziomie wygładzonej wartości elewacji (floating datum), po trzeciej iteracji rezydualnych poprawek statycznych i tłumieniu fal wielokrotnych, na których wykonano regularyzację offsetów i interpolację tras.

Zrealizowano dwie iteracje migracji czasowej przed składaniem. Wejściowe pole prędkości do pierwszej iteracji PreSTM to pole po analizach AV3. Po pierwszej iteracji wykonano analizy prędkości AV-pstm1, ukierunkowane na uzyskanie optymalnego pola prędkości migracyjnych (stabilny horyzontalny rozkład prędkości interwałowych). Po drugiej, finalnej iteracji PreSTM kolejna analiza prędkości AV-pstm2 miała na celu otrzymanie optymalnego pola prędkości składania dla zmigrowanych kolekcji WPG.

Do finalnej iteracji migracji zastosowano następujące parametry:

- algorytm migracji Kirchhoffa,
- pole prędkości AV-pstm1, gładzone wzdłuż osi czasu (21 próbek) oraz przestrzennie z promieniem 5 km,
- apertura: 3 km,
- stały kąt upadu: 650,
- wielkość grup offsetowych: podwójna grupa offsetowa 100 m,
- respektowanie pełnych absolutnych offsetów,
- metoda trasowania promieni – Curved Ray Isotropic Finite Difference,
- czasowo zmienny zakres częstotliwości powiązany z kątem upadu i aperturą.

Składowe po drugiej iteracji przesortowano z powrotem do domeny WPG, skorygowano finalny muting i po sumowaniu zrealizowano przetwarzanie finalne, analogiczne jak dla migracji po składaniu.

Processing po składaniu oraz poprawa koherencji i rozdzielczości danych

Finalne sekcje sejsmiczne zostały przygotowane w trzech wersjach:

- RAP – odtworzenie w rzeczywistych relacjach amplitud, po składaniu użyto tylko BP filter 6-12-70-90 Hz,

- AGC – dla sumy finalnej zastosowano wyrównanie amplitud przed i po składaniu (odpowiednio 128/512 ms i 128/1024 ms), na dla migracji RMS 128/1024 ms.

Dla wszystkich profili zastosowano procedurę Random Noise Attenuation (RNA: operator 7 tras, okno czasowe 300 ms, okno przestrzenne 60 tras), BP filter 6-12-70-90 Hz, filtrację FK respektującą upady do +/- 9 ms/trasa,

- CREP (Structure-Guided Coherency and Resolution Enhance Processing) – zestaw procedur, mający na celu poprawę koherencji danych.

Zastosowany zestaw procedur CREP obejmował:

DIP_ESTIMATION_3D:

- algorytm: Dip Estimation by Scanning Method,
- wielkość analizowanego binu: 50 m,
- szerokość operatora Dip Scannig: 5 (5 x50 m),
- zakres analizowanych upadów: +/- 9 ms/trasę,

COHERENCY_FILTER_3D:

- szerokość operatora: 5 WPG,
- pole upadów wyskalowane w stopniach.

Po procedurze CREP zastosowano wyrównanie amplitud oraz filtrację BP 6-12-60-70 Hz.

Dopasowanie profili sejsmicznych do danych otworowych

Do wykonania sejsmogramu syntetycznego wykorzystano dane z dwóch otworów: Konary IG-1 i Byczyna-1. Otwór Konary IG-1 znajduje się w odległości ok. 271 m od profilu sejsmicznego T0480679. Dla tego otworu pomiar PAdt użyty do skonstruowania sejsmogramu syntetycznego obejmował interwał 621-1281 m. Otwór Byczyna-1 ma wykonane pomiary PAdt w zakresie 1410-4576 m. Otwór ten znajduje się w odległości ok. 255 m od profilu sejsmicznego T0480679. W celu zestawienia sejsmogramów syntetycznych z profilami sejsmicznymi, które są wykonane na poziom odniesienia 0 m n.p.m.,. zostały one przesunięte o czas -95 ms dla otworu Konary IG-1 i -75 ms dla otworu Byczyna-1. Następnie profil sejsmiczny T0480679 został poddany procedurze rotacji, tak aby dopasowanie do sejsmogramu syntetycznego (dla otworu Konary IG-1) było jak najdokładniejsze. Dla tego profilu kąt rotacji wyniósł -167°, natomiast przesunięcie czasowe (shift) -34 ms. Sejsmogram syntetyczny z otworu Byczyna-1 został zestawiony ze zrotowanym profilem T0480679.

Szczegóły zastosowanych parametrów przedstawia Tabela 6-9.

Tabela 6-9 Dopasowanie profili sejsmicznych do danych otworowych w rejonie struktury Konary

Nazwa profilu	Dopasowanie do sejsmogramu syntetycznego	Dopasowanie na krzyżówkach
T0380679	-	rotacja fazy: 5.6° time shift: -36 ms
T0450679	-	rotacja fazy: -34° time shift: -29 ms
T0470679	-	rotacja fazy: -20° time shift: -15 ms
T0480679	rotacja fazy: -167° time shift: -34 ms	referencyjny

6.3.6 Wnioski

Cechą charakterystyczną reprocessowanych danych sejsmicznych 2D w rejonie struktury Konary jest niska krotność profilowania. Jakość i energia fal refleksyjnych widocznych na rekordach jest zróżnicowana, od zadowalającej po bardzo niską. Poziom zakłóceń jest bardzo wysoki.

Bardzo ważnym elementem przetwarzania było tłumienie zakłóceń koherentnych, które wymagało dwukrotnego użycia dedykowanych procedur przed i po dekonwolucji. Dodatkowo, procedura interpolacji została tak zdefiniowana, aby eliminować te elementy danych, które były związane z falą powierzchniową.

Brak bliskich offsetów implikował wiele problemów, między innymi z wyborem optymalnego okna czasowego dla potrzeb obliczeń rezydualnych poprawek statycznych. Właściwe odwzorowanie strefy płytkiej w sytuacji występowania luk offsetowych było utrudnione.

Zakres dalekich offsetów jest ograniczony, co sprawia, że odwzorowanie warstw głębszych, szczególnie dla nachylonych horyzontów, jest dyskusyjne.

Uzyskany w wyniku reprocessingu obraz pokazuje wyraźną poprawę jakości profili w stosunku do danych archiwalnych, szczególnie w płytszych częściach sekcji. Porównanie jakości archiwalnego processingu i zreprocessowanej wersji profilu T0380679 oraz T0480679 zamieszczono odpowiednio na Fig. 6-18 i Fig. 6-19.

Opracowanie „Dokumentacja z wykonanych prac. Zaawansowany reprocessing danych sejsmicznych 2D – 4 profile. Rejon: Inowrocław-Toruń. Struktura Konary" wraz z danymi cyfrowymi, stanowiącymi wyniki zrealizowanych prac jest zamieszczone na DVD w katalogu /Prace podwykonawców/Reprocessing danych sejsmicznych/ETAP_III/ DANE_FINALNE_ETAP_III.

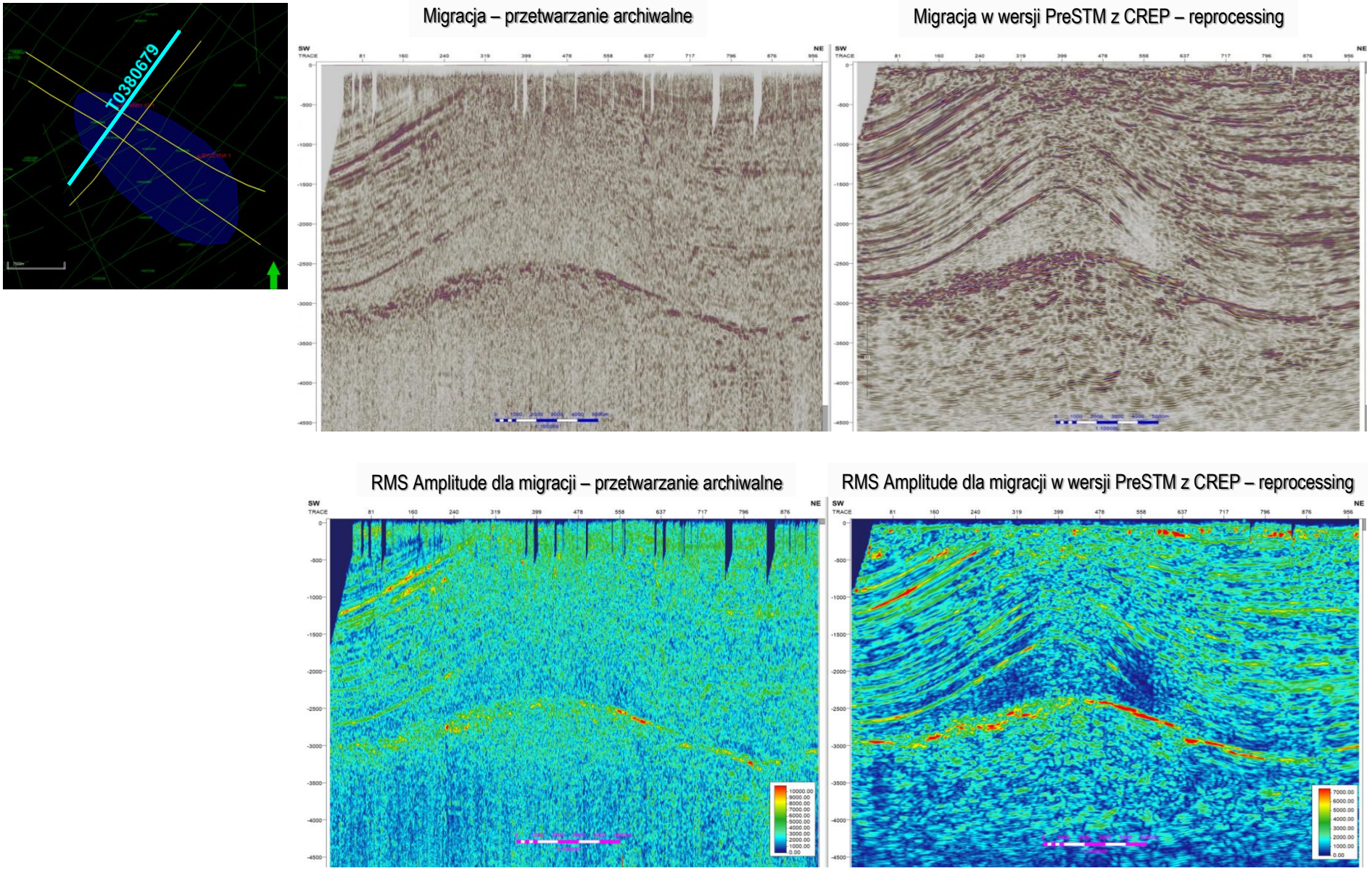
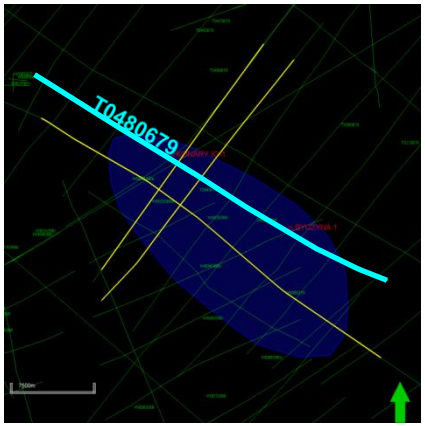


Fig. 6-18 Porównanie jakości archiwalnego processingu i zreprocessowanej wersji profilu T0380679



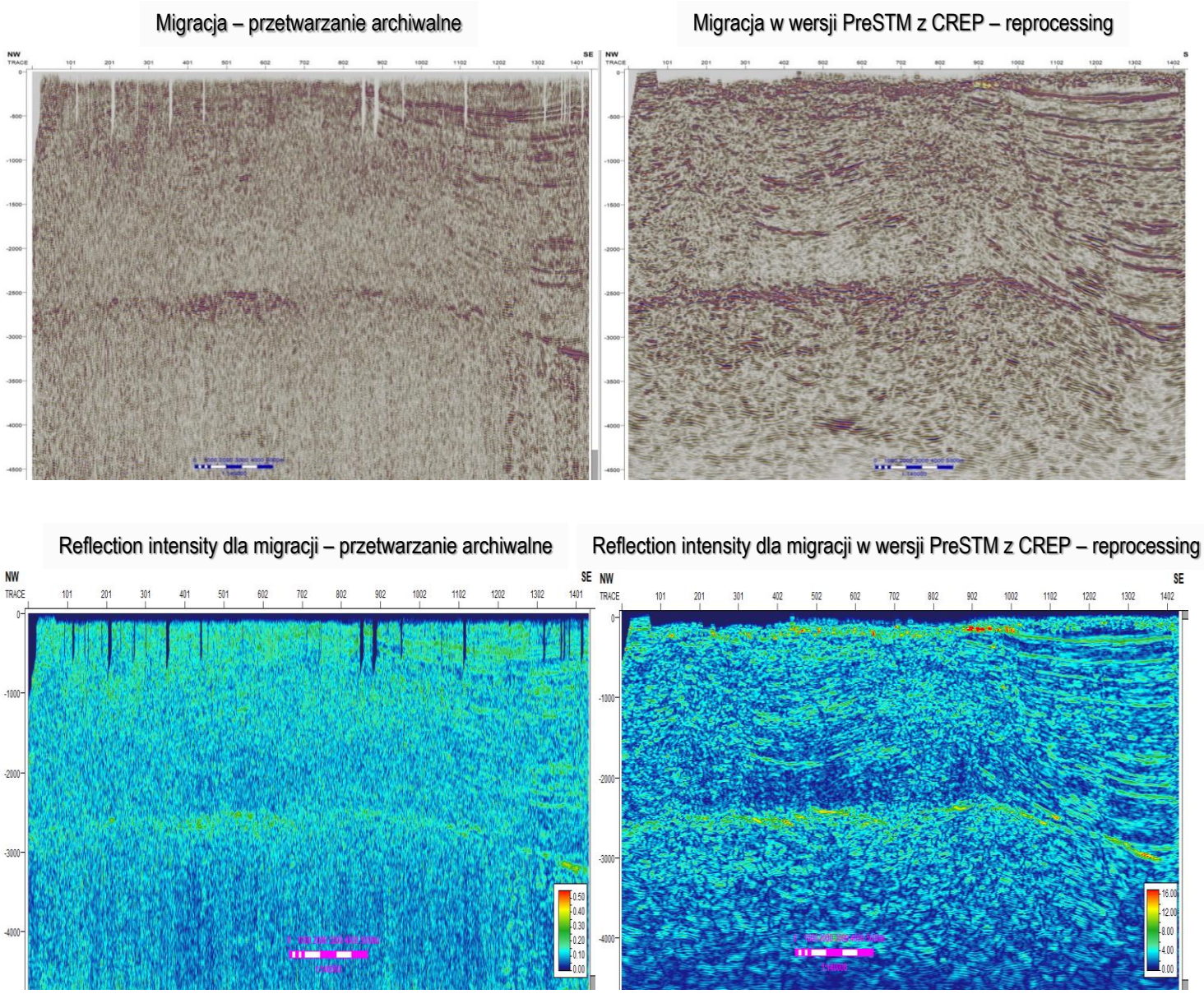


Fig. 6-19 Porównanie jakości archiwalnego processingu i zreprocessowanej wersji profilu T0480679

7. Interpretacja geologiczno-geofizyczna struktur solankowych

Niniejszy rozdział obejmuje wykorzystanie materiałów zebranych, przygotowanych oraz opracowanych w ramach poprzednich rozdziałów niniejszego sprawozdania końcowego i ma do pewnego stopnia charakter podsumowania wyżej omówionych zagadnień dotyczących wytypowanych struktur solankowych, stąd poniżej odwoływano się niejednokrotnie do wyników tychże prac w kontekście realizacji zakresu i celów podzadania 7 (z zakresu rzeczowego Karty Informacyjnej zadania), którego właśnie dotyczy niniejszy rozdział **7**.

Prace rozpoczęto od zebrania i przygotowania danych geologiczno-geofizycznych niezbędnych do interpretacji wybranych struktur (patrz rozdział **5.3**). Dla każdej z trzech wybranych struktur rozpoznanych archiwalnymi danymi sejsmicznymi z ubiegłego wieku, tzn. Budziszewic-Zaosia, Konar i Bielska-Bodzanowa (Fig. 5-5, Fig. 5-6, Fig. 5-7) zebrano dostępne w zasobach PIG-PIB/NAG profile sejsmiczne. Przy czym dla struktury Konary (Fig. 5-6) w utworach jury pozyskano dodatkowo (Geofizyka Toruń S.A.) 6 linii sejsmicznych 2D na potrzeby uszczegółowienia (re)interpretacji danych sejsmicznych w rejonie tej struktury. Przeanalizowano wyniki archiwalnych interpretacji danych sejsmicznych dla tych trzech struktur, dwóch w utworach jury i jednej w utworach kredy.

Dla tych trzech struktur (Budziszewice-Zaosie, Konary i Bielsk-Bodzanów) został wykonany reprocessing danych sejsmicznych (rozdział **6**) dla wybranych 4 profili o niedostatecznej jakości obrazu sejsmicznego dla każdej ze struktur (razem 12 profili sejsmicznych). Dokonano interpretacji zreprocesowanych (w sumie 12) profili dla tych trzech struktur oraz reinterpretacji danych sejsmicznych opracowanych wcześniej w ramach innych przedsięwzięć PIG-PIB/PSG (w tym przedsięwzięcia „Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO_2 wraz z ich programem monitorowania" – Kijewska i Wróbel [w:] Wójcicki i in., 2013) celem wykonania korelacji na profilach i map dla kluczowych horyzontów zbiornikowych i uszczelniających dla poszczególnych struktur (rozdział **7.1**).

W przypadku struktury Wojszyce, relatywnie dobrze rozpoznanej (względnie) nową wysokorozdzielczą oraz archiwalną sejsmiką i otworami (w tym 1 nowym, gdzie wykonano badania geomechaniczne) w ramach projektu demo CCS PGE Bełchatów, wykorzystano materiały z tego przedsięwzięcia (wytworzone w latach 2009-2011, a więc prawo do nich posiada Skarb Państwa) tzn. mapy, przekroje i modele. Zweryfikowano przy tym czy wykonana w ramach tego przedsięwzięcia (z udziałem PIG-PIB) interpretacja strukturalna na przekrojach sejsmicznych oraz opracowany na jej podstawie model strukturalno-parametryczny (Petrel) struktury Wojszyce uwzględniają wszelkie dostępne informacje potrzebne do oceny przydatności struktury do bezpiecznego magazynowania/składowania substancji – istotnie, uwzględniają, gdyż obejmują informacje dotyczące rozpatrywanych kompleksów magazynowania/składowania, a ponadto od 2011 roku nie doszły żadne nowe dane w przedmiotowym zakresie.

Równolegle z pozyskiwaniem i interpretacją danych sejsmicznych przeanalizowano regionalne mapy geologiczne pod kątem występowania stref nieciągłości tektonicznych w obrębie i sąsiedztwie poszczególnych struktur, w tym mapy z „Atlasu paleogeograficznego epikontynentalnego permu i mezozoiku w Polsce" (Dadlez i in., 1998) oraz z archiwalnych dokumentacji sejsmicznych (rozdział **7.2.1**). Przeanalizowano także zagospodarowanie terenu na obszarze i bezpośrednim sąsiedztwie

rozpatrywanych struktur (rozdział **7.2.2**), co może być istotne przy planowaniu przyszłych prac rozpoznawczych (tzn. przygotowywaniu założeń do odnośnych projektów robót geologicznych).

Dla wyżej wymienionych trzech struktur rozpoznanych archiwalnymi danymi sejsmicznymi z ubiegłego wieku (Budziszewice-Zaosie, Konary, Wojszyce i Bielsk-Bodzanów) przeanalizowano dostępne dane grawimetryczne (rozdział **7.3.1**) i na ich podstawie sporządzono gridy anomalii siły ciężkości w redukcji Bouguera, które następnie zostały poddane transformacjom. Wybrano transformacje anomalii siły ciężkości umożliwiające identyfikację stref nieciągłości tektonicznych w obrębie górotworu, hipotetycznie w przedziale głębokości odpowiadającym występowaniu rozpatrywanych dla struktur kompleksów składowania oraz ich bezpośredniego nadkładu (czy też dodatkowych uszczelnień), tzn. gradient poziomy z anomalii rezydualnych uzyskanych metodą pasmowej filtracji częstotliwościowej o parametrach odpowiadających (hipotetycznie) wspomnianemu przedziałowi głębokości (rozdział **7.3.2**) oraz dokonano próby interpretacji geologicznej wyników.

Obok otworu Kaszewy 1, w ramach projektu demo CCS PGE Bełchatów odwiercono i opracowano otwór Pabianice 1 – obydwa te otwory są ewenementem na skalę, Polski, jeśli chodzi o rozpoznanie struktur solankowych bogatym zestawem nowoczesnych badań geofizyki wiertniczej (konwencjonalnych i niekonwencjonalnych), w szczególności, jeśli chodzi o badania geomechaniczne. Na podstawie wyników tych badań i sejsmiki oraz profilowań strukturalnych rdzeni potencjalnego kompleksu składowania dokonano w ramach niniejszego sprawozdania interpretacji strefy „węzła" tektonicznego, w obrębie której zlokalizowany jest ten otwór (rozdział **7.4**). Wcześniej dokonano wglądu i profilowania strukturalnego rdzeni z otworów Kaszewy 1 i Pabianice 1 w zakresie utworów jury (delegacje 4 osób do tymczasowego archiwum rdzeni w Sosnowcu w październiku 2023 roku), zaś dokumentację profilowań przedstawiono w pliku *Profilowania rdzeni Pabianice i Kaszewy.xlsx* zamieszczonym na DVD w katalogu **/Baza danych/Profilowania rdzeni dla analizowanych otworów**).

Na podstawie profilowania rdzenia wiertniczego z otworu Kaszewy 1 wskazano charakter struktur tektonicznych rejestrowanych geofizycznie; sporządzono ewolucyjny model strukturalny dla weryfikacji koncepcji budowy tej struktury; scharakteryzowano struktury tektoniczne stanowiące istotną przestrzeń szczelinową w obrębie kolektora oraz rozważono czy struktury tektoniczne nie stanowią zagrożenia dla rozerwania ciągłości uszczelnień. Wykonano również wstępny model geomechaniczny 1D pozwalający na szacowanie współczesnej mobilności struktur tektonicznych (rozdział **7.5**).

Przeanalizowano przekroje sejsmiczne na wybranych 4 profilach wykonanych w ramach wysokorozdzielczego zdjęcia sejsmicznego Wojszyce 2D pod względem jakości obrazu sejsmicznego, wyinterpretowanych horyzontów sejsmicznych oraz możliwości występowania uskoków w obrębie rozpatrywanych kompleksów składowania w utworach jury środkowej i dolnej. Przekroje zestawiono z rozkładami anomalii siły ciężkości w redukcji Bouguera i gradientu pionowego i prześledzono drobne anomalie związane z nadkładem tych kompleksów (rozdział **7.6**, opracowany zasadniczo na podstawie archiwalnych materiałów projektu demo CCS PGE Bełchatów).

W rozdziale **7.7** dokonano kompleksowej interpretacji danych sejsmicznych i grawimetrycznych dla trzech struktur rozpoznanych archiwalnymi danymi sejsmicznymi z ubiegłego wieku (Budziszewice-Zaosie, Konary i Bielsk), dla których podano też krótką charakterystykę geologiczno-złożową. Zestawiono interpretację zreprocesowanych przekrojów sejsmicznych dla tych trzech

struktur (po 4 profile dla każdej struktury, w tym dwa połączone w jeden w przypadku struktury Budziszewice-Zaosie) z krzywymi anomalii rezydualnych siły ciężkości i gradientu poziomego. Wykorzystano gridy rezydualnych anomalii grawimetrycznych opracowane w rozdziale **7.3** – anomalie rezydualne odnoszące się do szacunkowego przedziału głębokości występowania rozpatrywanych dla poszczególnych struktur kompleksów magazynowania/składowania oraz ich bezpośredniego nadkładu (czy też dodatkowych uszczelnień), czyli orientacyjnie 0,5-2 km oraz gridy obliczonego z tych anomalii gradientu poziomego. Ze wspomnianych gridów wycięto krzywe anomalii rezydualnych i gradientu poziomego na profilach. Na poszczególnych profilach zaznaczono maksima gradientu, które mogą być związane z występowaniem kontaktów gęstości, uskoków, wyklinowań warstw oraz zmian facji, z którymi wiążą się zmiany gęstości ośrodka geologicznego.

Ponadto, wykorzystano do interpretacji kompleksowej rozkłady prędkości składania opracowane przez podwykonawcę w ramach reprocessingu 12 profili sejsmicznych dla omawianych trzech struktur, skalibrowane prędkościami sejsmicznymi z otworów, które zestawiono z przekrojami sejsmicznymi i krzywymi anomalii grawimetrycznych. Prędkości składania przeliczono na prędkości interwałowe wzorem Dixa, a z tych z kolei wyliczono gęstości ośrodka geologicznego wzorem Gardnera. Modele gęstościowe ośrodka geologicznego zestawiono z przeliczonymi do domeny głębokościowej (w oparciu o ww. prędkości składania) horyzontami sejsmicznymi, otrzymując modele strukturalno-gęstościowe, czyli grawimetryczne.

Dla wytypowanych struktur w utworach jury i kredy zestawiono informacje na temat tych struktur do bazy danych, obejmujące parametry rozpatrywanych poziomów zbiornikowych i uszczelniających, a ponadto dostępne informacje z otworów pozwalające na dowiązanie wyników sejsmiki do profilu geologicznego (**zamieszczone na DVD w katalogu/Baza danych/Parametry wybranych struktur solankowych**).

Natomiast w rozdziale **5.4** przeprowadzono ocenę zagrożeń hydrogeologicznych dla użytkowych poziomów wodonośnych w obrębie i bezpośrednim sąsiedztwie wszystkich czterech struktur (punkty **5.4.1.4** i **5.4.2.4**). Generalny wniosek dla trzech struktur solankowych charakteryzujących się występowaniem naprzemianległych poziomów uszczelniających i zbiornikowych w jurze dolnej i środkowej (Budziszewice-Zaosie, Konary, Wojszyce) jest taki, że magazynowanie i składowanie substancji w kolektorach środkowojurajskich oraz kolektorze dolnego aalenu i górnego toarku (czyli na pograniczu jury środkowej i dolnej) może stanowić zagrożenie dla wód użytkowych, natomiast taka działalność prowadzona w głębiej występujących kolektorach dolnej jury, pod regionalnym uszczelnieniem formacji ciechocińskiej (dolny toark i najwyższy pliensbach) jest najprawdopodobniej bezpieczna, pod warunkiem szczegółowego rozpoznania danej struktury. W przypadku charakteryzującej się skomplikowaną budową strukturalno-tektoniczną struktury Bielsk-Bodzanów magazynowanie i składowanie substancji w kolektorze dolnokredowym może być najprawdopodobniej bezpieczne w rejonie kulminacji Bielska, pod warunkiem szczegółowego rozpoznania struktury, natomiast składowanie i magazynowania w głęboko występujących kolektorach jury środkowej i dolnej jest raczej bezpieczne.

7.1 Interpretacja danych sejsmicznych

(Sylwia Kijewska)

Interpretację strukturalną archiwalnych danych sejsmicznych przeprowadzono dla trzech wybranych mezozoicznych struktur antyklinalnych, których geneza opiera się na poduszkach solnych/halokinetyce:

1. Struktura Budziszewice-Zaosie,
2. Struktura Konary,
3. Struktura Bielsk (NW kulminacja struktury Bielsk-Bodzanów).

W planie pod pokrywą kenozoiczną pierwsze dwie struktury są zlokalizowane w obrębie antyklinorium śródpolskiego, natomiast trzecia znajduje się na SW skraju synklinorium kościerzyńsko-puławskiego (Fig. 7-1).

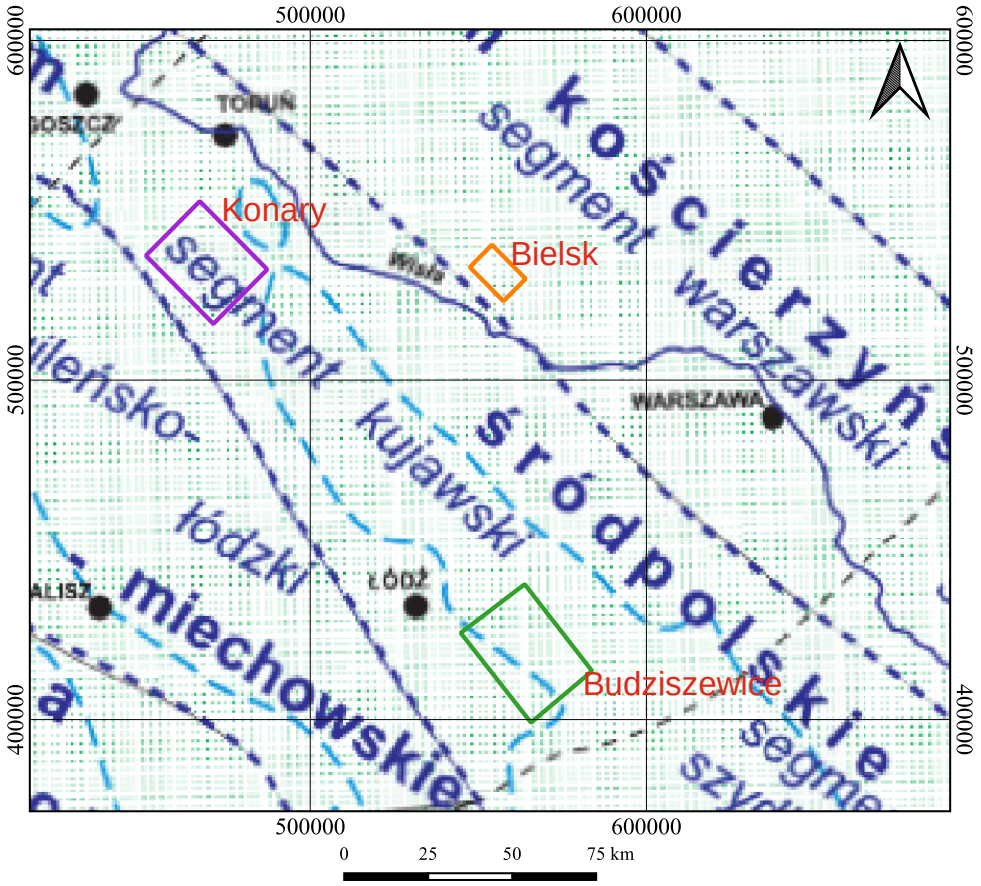
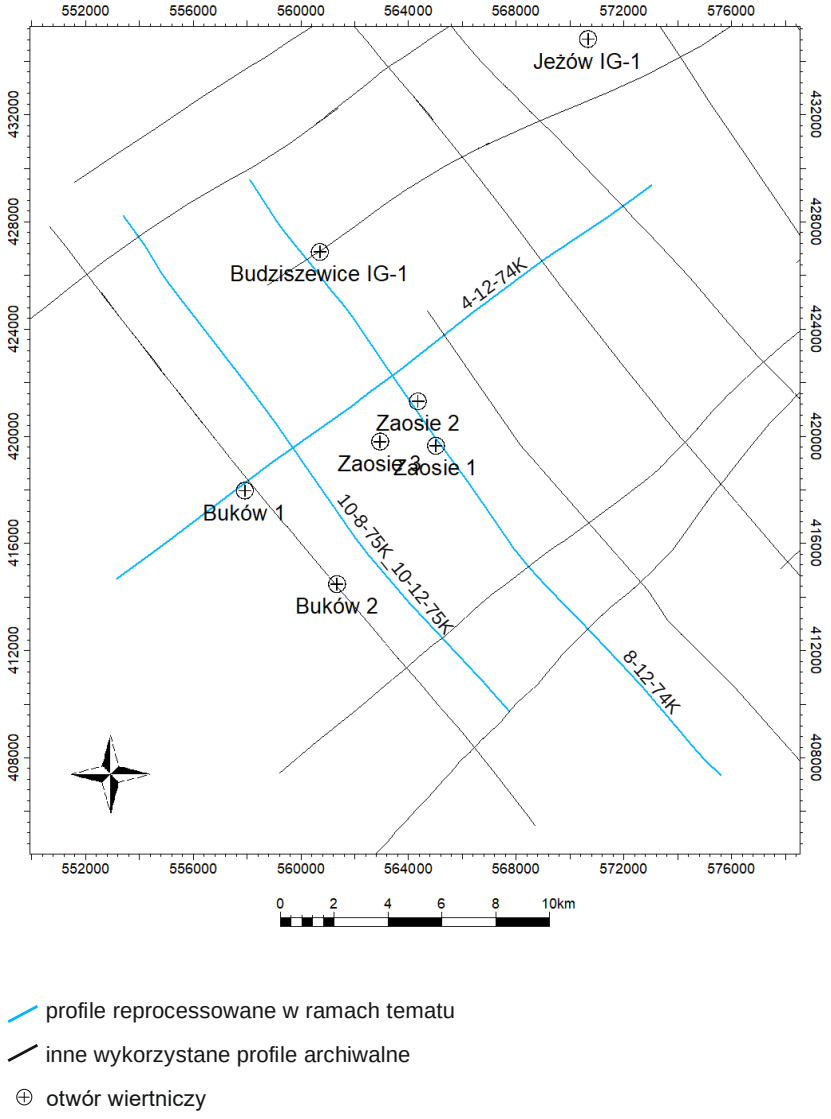


Fig. 7-1 Lokalizacja obszarów mapowania struktur na tle mapy jednostek tektonicznych Polski pod pokrywą kenozoiczną (Żelaźniewicz i in., 2011)

Interpretacja każdej ze struktur została poprzedzona reprocessingiem wybranych profili sejsmicznych (patrz rozdział 6). Pomimo znaczącej poprawy jakości obrazu nie w każdym przypadku wyniki były satysfakcjonujące. W zestawieniu z innymi dostępnymi archiwalnymi danymi z wybranych obszarów, umożliwiły jednak przeprowadzenie interpretacji strukturalnej.

Interpretowane horyzonty sejsmiczne wybrano na podstawie wydzieleń otrzymanych głównie z analizy litofacjalnej w otworach pod kątem możliwości magazynowania substancji/składowania CO_2 i obejmują przede wszystkim warstwy jurajskie. Należy podkreślić, że wystarczająco miąższy pakiet osadów kredowych występuje jedynie w obrębie struktury Bielsk, a w przypadku Budziszewic są one całkowicie zerodowane. Na wybór wpływ miała również głębokość zalegania warstw, gdyż duża głębokość występowania kolektora/uszczelnienia może generować wyższe koszty niż w przypadku horyzontów położonych płycej.

7.1.1 Struktura Budziszewice-Zaosie



profile reprocessowane w ramach tematu

inne wykorzystane profile archiwalne

otwór wiertniczy

Fig. 7-2 Mapa lokalizacji profili sejsmicznych i otworów wiertniczych na obszarze struktury Budziszewice-Zaosie

Obszar struktury Budziszewice-Zaosie jest pokryty siatką profili sejsmicznych pomierzonych głównie w latach 70-tych XX. Jedynie 3 profile wykonano w latach 1999-2000, a ich właścicielem jest firma RWE DEA. Jeden z tych profili w przybliżeniu pokrywa się z przebiegiem profili 10-8-75K i 10-12-75K, które aktualnie zostały połączone i zreprocessowane.

W ramach niniejszego zadania ponownie przetworzono łącznie 4 profile sejsmiczne (rozdział 6.1), które sprowadzono do poziomu odniesienia 150 m n.p.m. W projekcie wykorzystano również

interpretację dwóch profili firmy RWE DEA, którą wykonano w ramach tematu związanego z sekwestracją CO_2 (Kijewska i Wróbel [w:] Wójcicki i in., 2013; ze względu na brak odpowiedzi w sprawie zgody na wykorzystanie danych w niniejszym projekcie, nie zamieszczono ich lokalizacji) (Fig. 7-2).

Do interpretacji wykorzystano informacje z 6 otworów wiertniczych zlokalizowanych w obrębie struktury, dla których dostępne były również wyniki pomiarów prędkości średnich. Dowiązanie danych sejsmicznych z wykorzystaniem sejsmogramu syntetycznego, wykonano do otworu Buków 1, który posiada pomiar krzywej akustycznej w pełnym zakresie głębokości, w obrębie której znajdują się interesujące wydzielenia sejsmostratygraficzne. Korelację wykonano dla 5 horyzontów sejsmicznych wyznaczających strop: triasu, synemuru – kolektora, pliensbachu dolnego – kolektora, aalenu dolnego – kolektora, bajosu górnego – uszczelnienia. Pomiędzy warstwami kolektorów wyznaczono również warstwy uszczelniające, które ze względu na rozdzielczość i czytelność obrazu nie były pikowane.

Największą trudność napotkano przy interpretacji najpłytszego horyzontu, tj. bajosu górnego – uszczelnienia, ze względu na brak danych. Znaczna część profili posiada zapis obrazu falowego dopiero od czasu 300-400 ms, a pierwsze zarejestrowane odbicia dodatkowo są obarczone obniżoną krotnością pokrycia. Największy problem sprawia to w części NW struktury i uniemożliwia jednoznaczną ocenę zamknięcia struktury. Drugi problem napotkano w szczycie struktury, gdzie zapis sejsmiczny ma generalnie obniżoną jakość.

Dostępne profile i informacje z otworów wiertniczych pozwoliły jednak zobrazować strukturę Budziszewice-Zaosie, która jest antykliną powstałą nad poduszką solną utworów permu. W obrębie interpretowanych horyzontów nie stwierdzono widocznych uskoków. Układ refleksów w kierunku SW-NE wskazuje wyraźnie, że skrzydła antykliny zapadają w obu kierunkach tworząc zamknięcie potencjalnych kolektorów (Fig. 7-3). Na profilu 4-12-74K zaznacza się znaczne zmniejszenie miąższości warstw w kierunku SW od osi struktury, gdzie widoczne jest wyklinowywanie się niektórych horyzontów sejsmicznych. Szczyt struktury wydaje się jednak stosunkowo miąższy. Potwierdza to np. profil 8-12-74K o przebiegu NW-SE (Fig. 7-4), zlokalizowany w pobliżu osi antykliny. Rzutowane na profil trzy otwory z wyznaczoną stratygrafią: Budziszewice IG-1, Zaosie 1, Zaosie 2, w kierunku NW w różnym stopniu wykazują zmiany miąższości, przy czym miąższość bajosu górnego w otworze Budziszewice IG-1 wynosząca 292m jest wyraźnie większa niż w pozostałych otworach na profilu, tj. 134 m w Zaosiu 1 i 178 m w Zaosiu 2.

Nie każdy fragment profilu był możliwy do zinterpretowania ze względu na jakość danych, które miejscami nawet po reprocessingu wykazują bardzo duże zaszumienie i brak ciągłości horyzontów sejsmicznych (Fig. 7-5). Można jedynie zaobserwować trend jaki wykazują interpretowane warstwy.

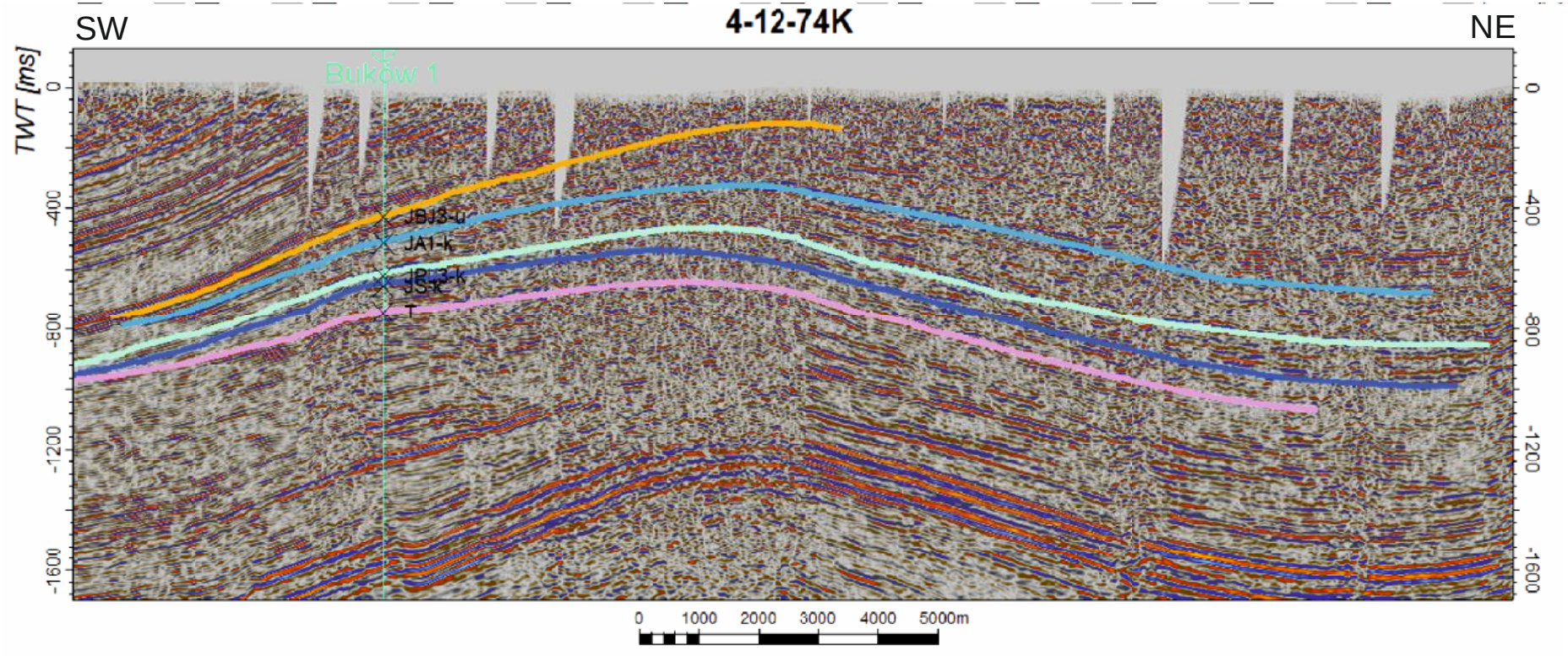


Fig. 7-3 Czasowy przekrój sejsmiczny 4-12-74K z interpretacją

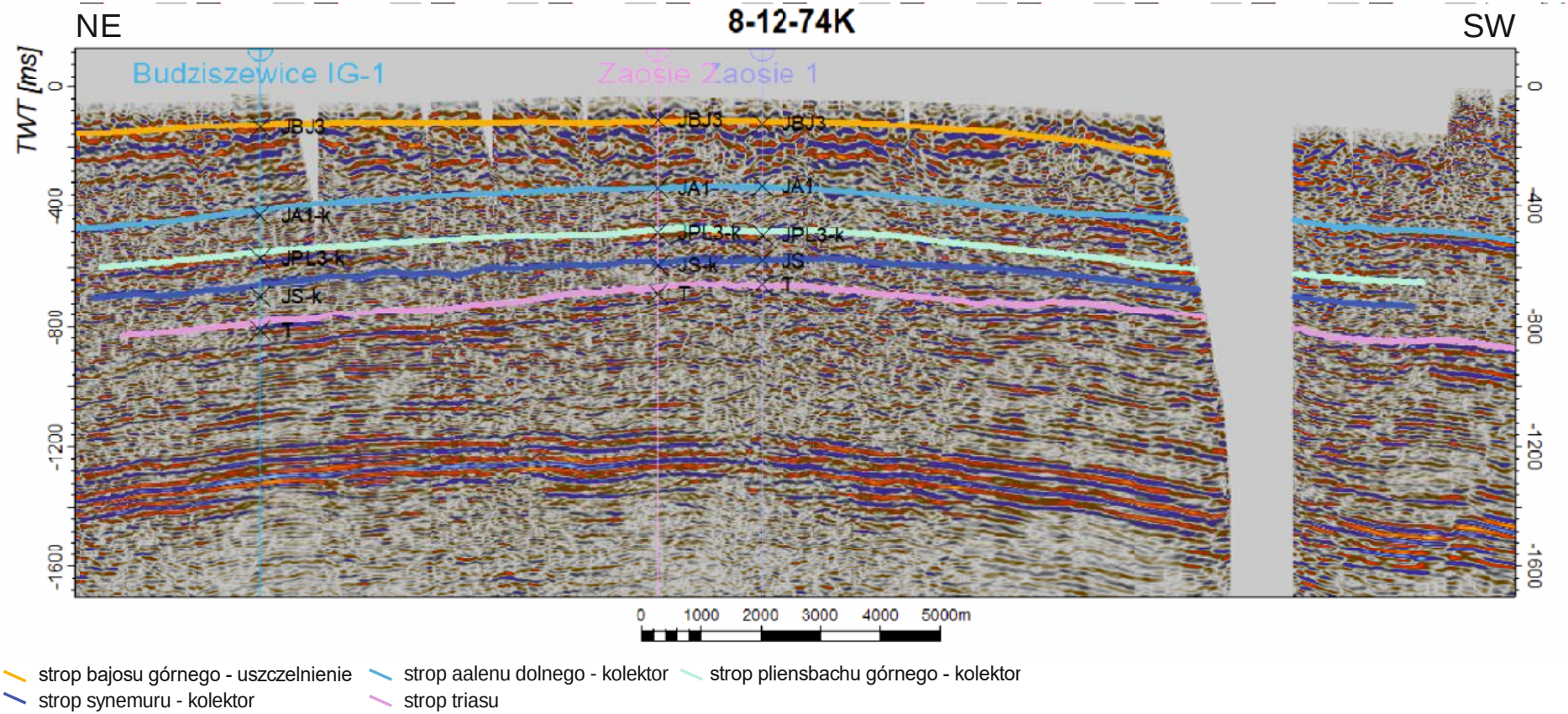


Fig. 7-4 Czasowy przekrój sejsmiczny 8-12-74K z interpretacją

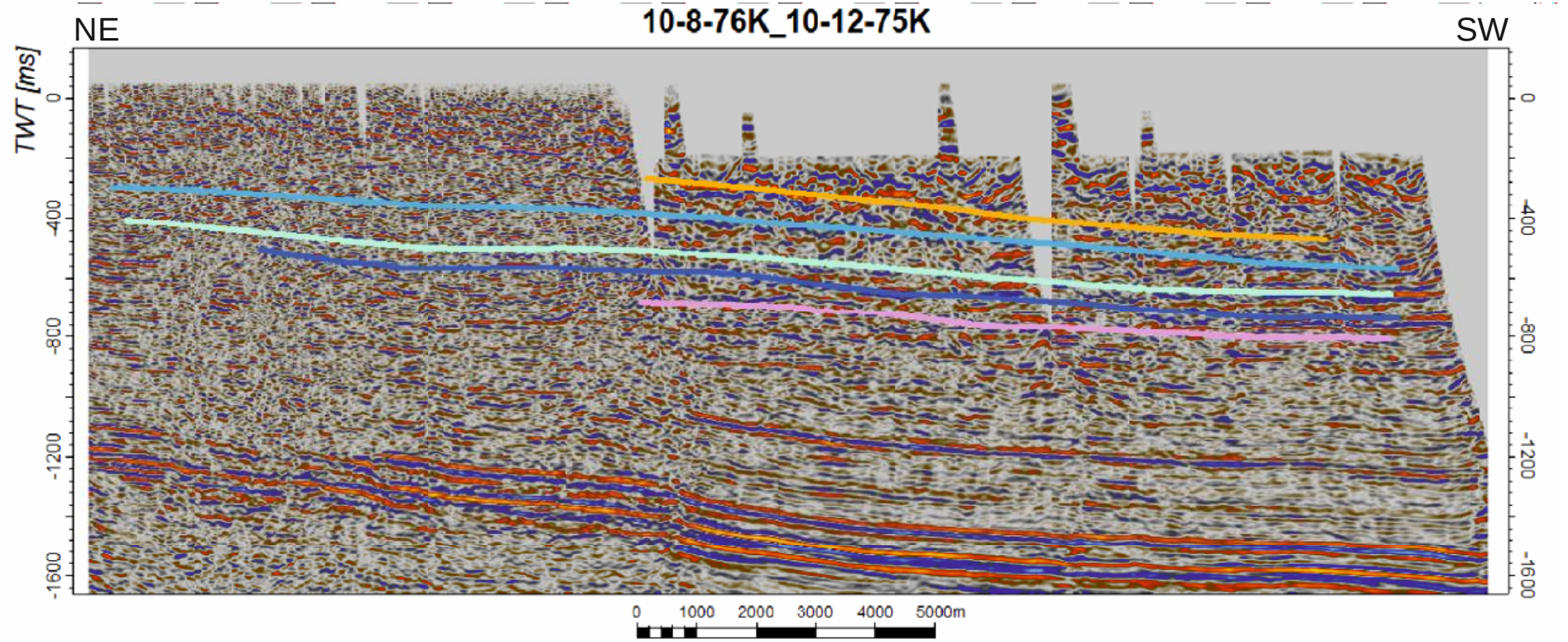


Fig. 7-5 Połączone czasowe przekroje sejsmiczne 10-8-76K i 10-12-75K z interpretacją

Na podstawie interpretacji horyzontów sejsmicznych wyliczono mapy czasowe powierzchni odpowiadających stropowi potencjalnego: kolektora aalenu dolnego, kolektora pliensbachu górnego, kolektora synemuru. Mapa powierzchni bajosu górnego nie została policzona ze względu na brak interpretacji na znacznym obszarze głównie w najpłytszych przedziałach głębokościowych, gdzie brakuje zapisu obrazu falowego lub jest on zbyt zaszumiony, aby przeprowadzić korelację. Ekstrapolacja byłaby obarczona zbyt dużą niepewnością i błędami.

Mapy obliczone dla wybranych interpretowanych horyzontów pokazują (Fig. 7-6, Fig. 7-7, Fig. 7-8), że struktura ma wyraźnie wydłużony kształt, o rozciągłości NW-SE. Zagęszczenie izolinii oraz wzrost czasu w kierunku od osi struktury wskazują, że kolektory powinny mieć zamknięcie od strony SE. Wyniki ekstrapolacji i trend horyzontów od strony NW, gdzie pełna interpretacja nie była możliwa, wykazują, że tu również powinno być zamknięcie, ale prawdopodobnie bardzo łagodne. Izolinie pokazują wartości wskazujące na spłycenie warstw, ale ze względu na zbyt słabą jakość danych i brak obrazu falowego na głębokości występowania interesujących warstw, należy to potraktować jako informację niepewną wymagającą lepszego rozpoznania.

Kulminacja struktury widoczna na wszystkich ww. mapach znajduje się w pobliżu otworów wiertniczych Zaosie.

F

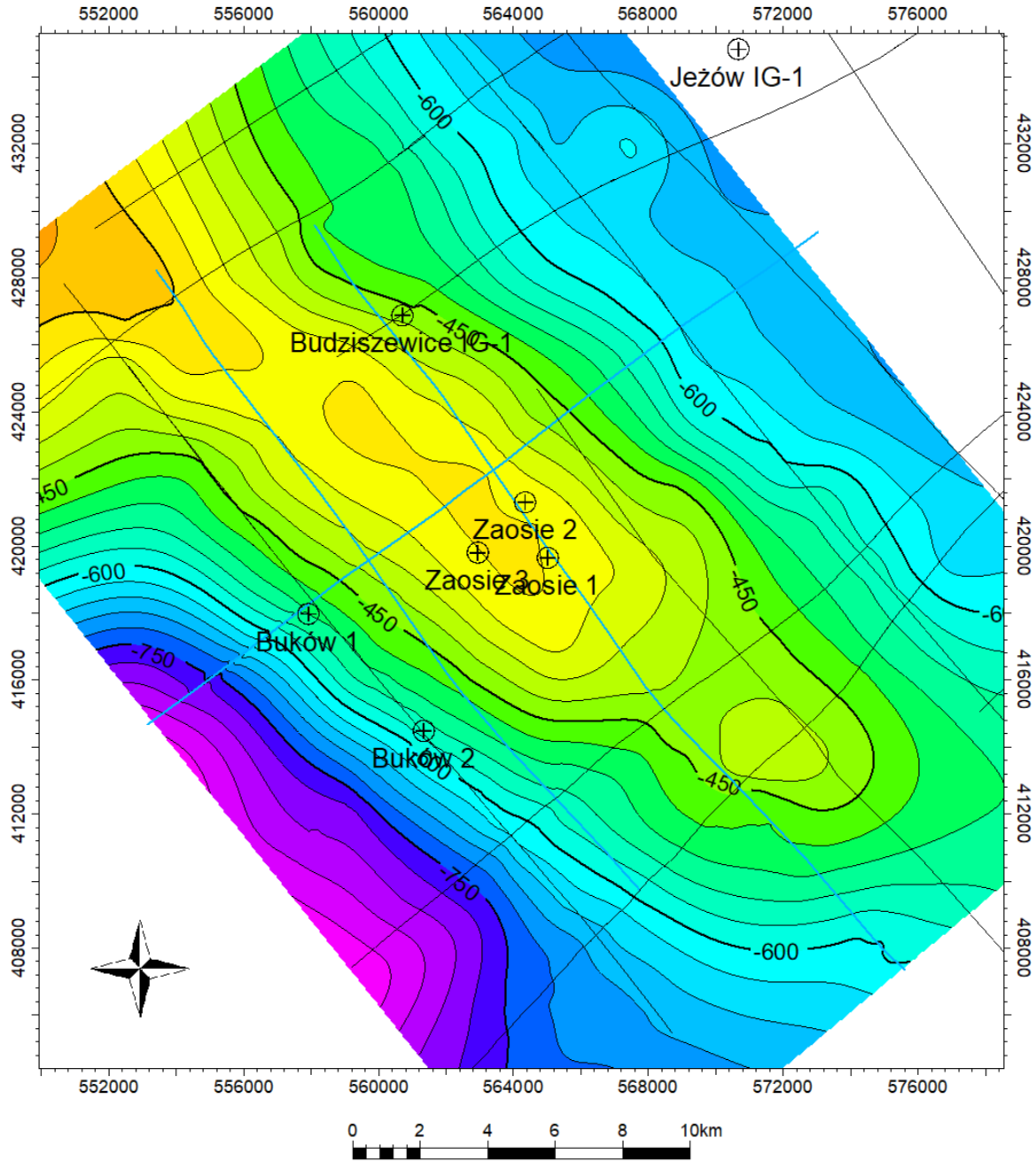


Fig. 7-6 Mapa czasowa powierzchni stropu aalenu dolnego

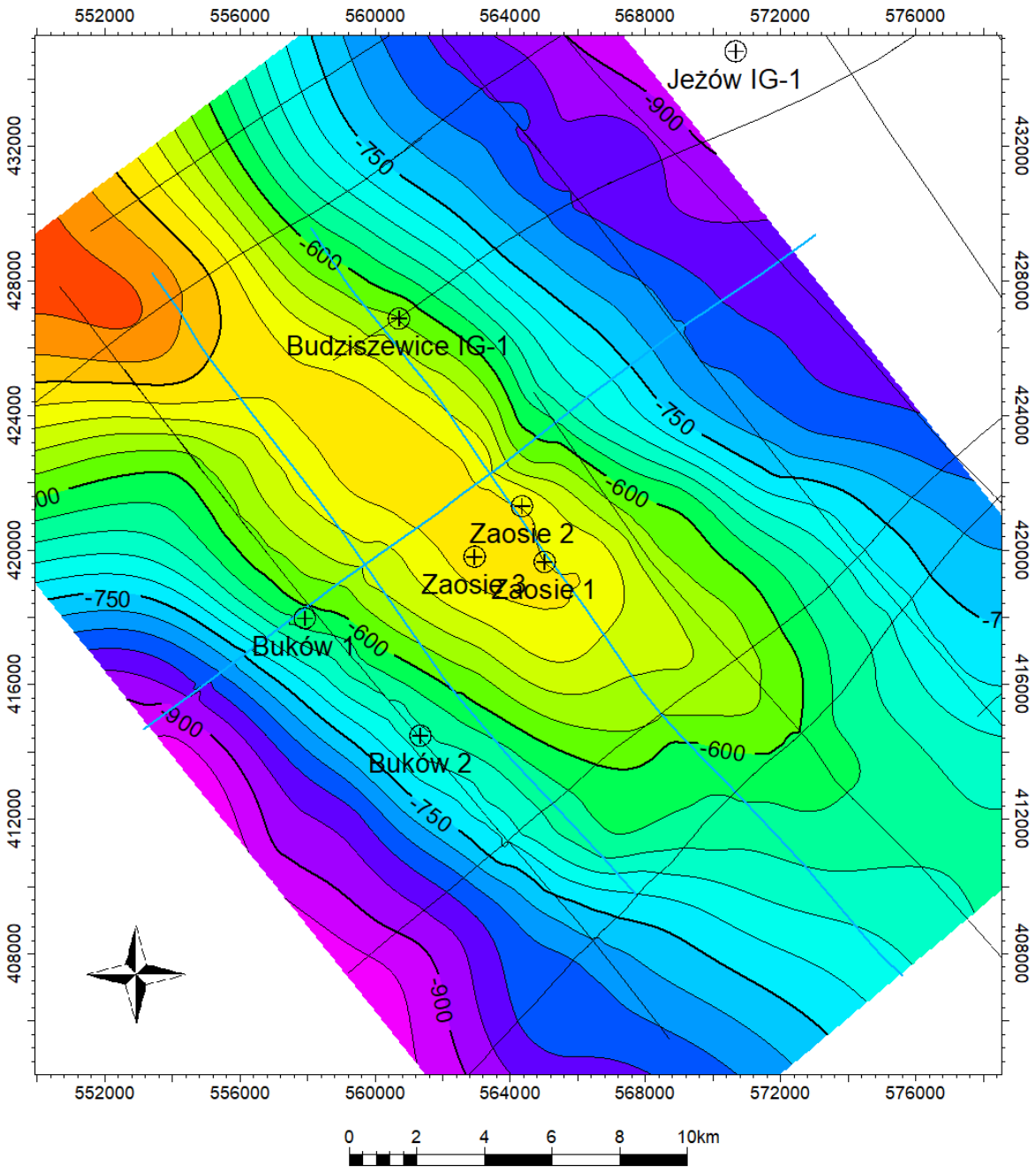


Fig. 7-7 Mapa czasowa powierzchni stropu pliensbachu górnego

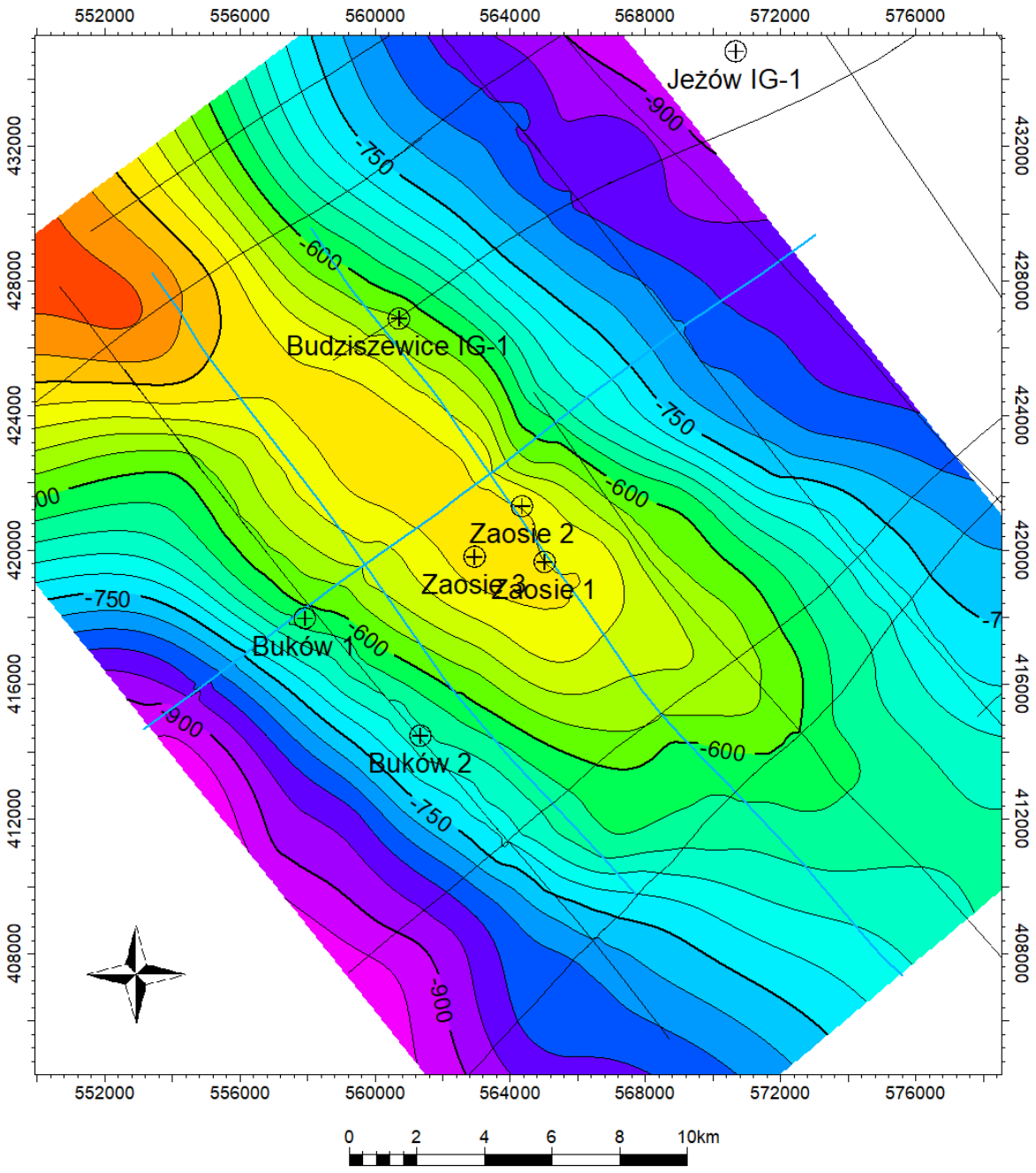


Fig. 7-8 Mapa czasowa powierzchni stropu synemuru

7.1.2 Struktura Konary

Struktura Konary jest pokryta stosunkowo gęstą siecią profili sejsmicznych (Fig. 7-9). Prace były wykonane pod koniec lat 70-tych ubiegłego wieku przez Geofizykę Toruń oraz na przełomie lat 80-tych i 90-tych przez Przedsiębiorstwo Badań Geofizycznych. Do reprocessingu wybrano 4 profile (rozdział 6.3), w tym 2 podłużne i 2 poprzeczne w stosunku do struktury i przetworzono je do poziomu 0 m n.pm. Jakość w porównaniu z wcześniejszymi wynikami poprawiła się. Jedynie jakość obrazu profilu T0450679 (Fig. 7-13) na przeważającym fragmencie pozostała bardzo słaba i nie jest możliwe wyróżnienie żadnych ciągłych refleksów. Obraz wydaje się dzielić na dwa fragmenty co daje podejrzenie, że jest to spowodowane błędami w akwizycji. Pewne trudności w akwizycji mogło stworzyć również występowanie pokładów węgla brunatnego, którego obecność stwierdzono m.in. nad NW skrzydłem antykliny i sięgającą okolic otworu Konary IG-1. Hipotezę tą wydaje się potwierdzać jakość i zróżnicowanie obrazu na małych głębokościach po NE i SW stronie struktury.

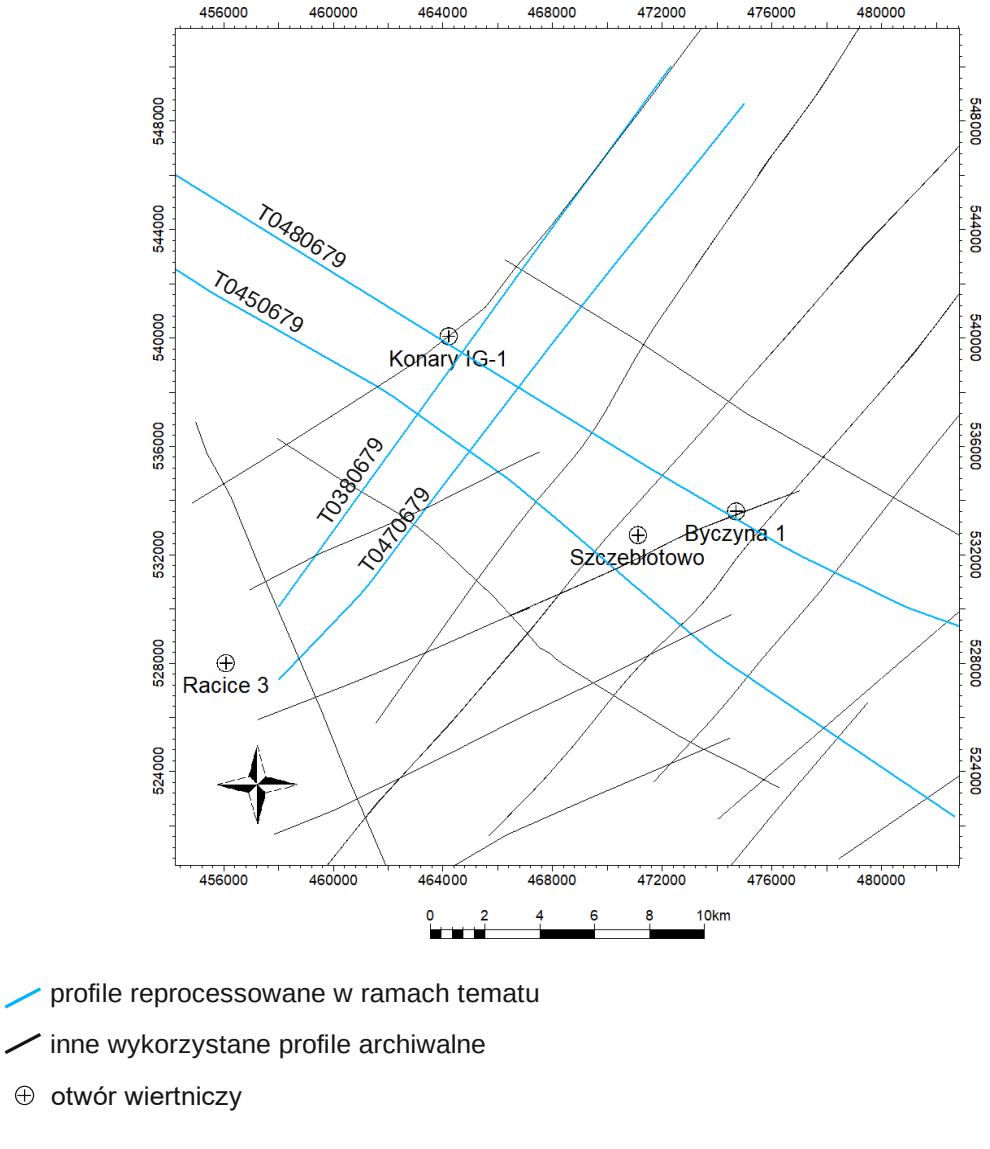


Fig. 7-9 Mapa lokalizacji profili sejsmicznych i otworów wiertniczych na obszarze struktury Konary

Na obszarze struktury zlokalizowano jedynie dwa głębokie otwory – Konary IG-1 i Byczyna 1, dla których wykonano pomiary geofizyczne. W celach pomocniczych wykorzystano również

informacje z odwierconego w 1930 roku otworu Szczebłotowo o głębokości 868m. Otwór nawiercił utwory jury, jednak stratygrafia nie została uaktualniona do obecnie stosowanej, co może prowadzić do błędnych wniosków. Aby uniknąć potencjalnych błędów i uwiarygodnić interpretację, wspomagano się opisem litologii w celu dostosowania wydzieleń do współczesnej klasyfikacji. Dodatkowo zrobiono również przegląd wielu płytkich otworów, w celu oceny stratygrafii pod kątem obecności i głębokości występowania osadów kredy i stropu warstw jury.

Interpretację strukturalną wykonano dla horyzontów sejsmicznych odpowiadających stropowi pliensbachu górnego – kolektora, toarku dolnego – uszczelnienia, aalenu górnego – uszczelnienia. Dodatkowo skorelowano strop utworów oxfordu, jury górnej oraz walnej powierzchni niezgodności laramijskiej powstałej po wyniesieniu bruzdy śródpolskiej. Ze względu na rozdzielczość metody sejsmicznej wynikającej również z czasu wykonania pomiarów, nie interpretowano wszystkich możliwych wydzieleń charakteryzujących uszczelnienie i kolektory. Przeprowadzona interpretacja strukturalna pokazała, że w przekroju poprzecznym kształt antykliny jest asymetryczny (Fig. 7-10 i Fig. 7-11). Horyzonty SW skrzydła struktury są bardziej strome, a miąższość warstw się zmniejsza. Największą zmianę miąższości wykazuje kolektor aalenu górnego, którego miąższość w otworze Cykowo IG-1, zlokalizowanym nieco na NW do otworu Racice 3, spada do zaledwie 8 m. Korelacja horyzontów w bardziej połogim skrzydle NE wskazuje na wyraźny wzrost miąższości lub w przypadku aalenu górnego jedynie niewielkie zmiany.

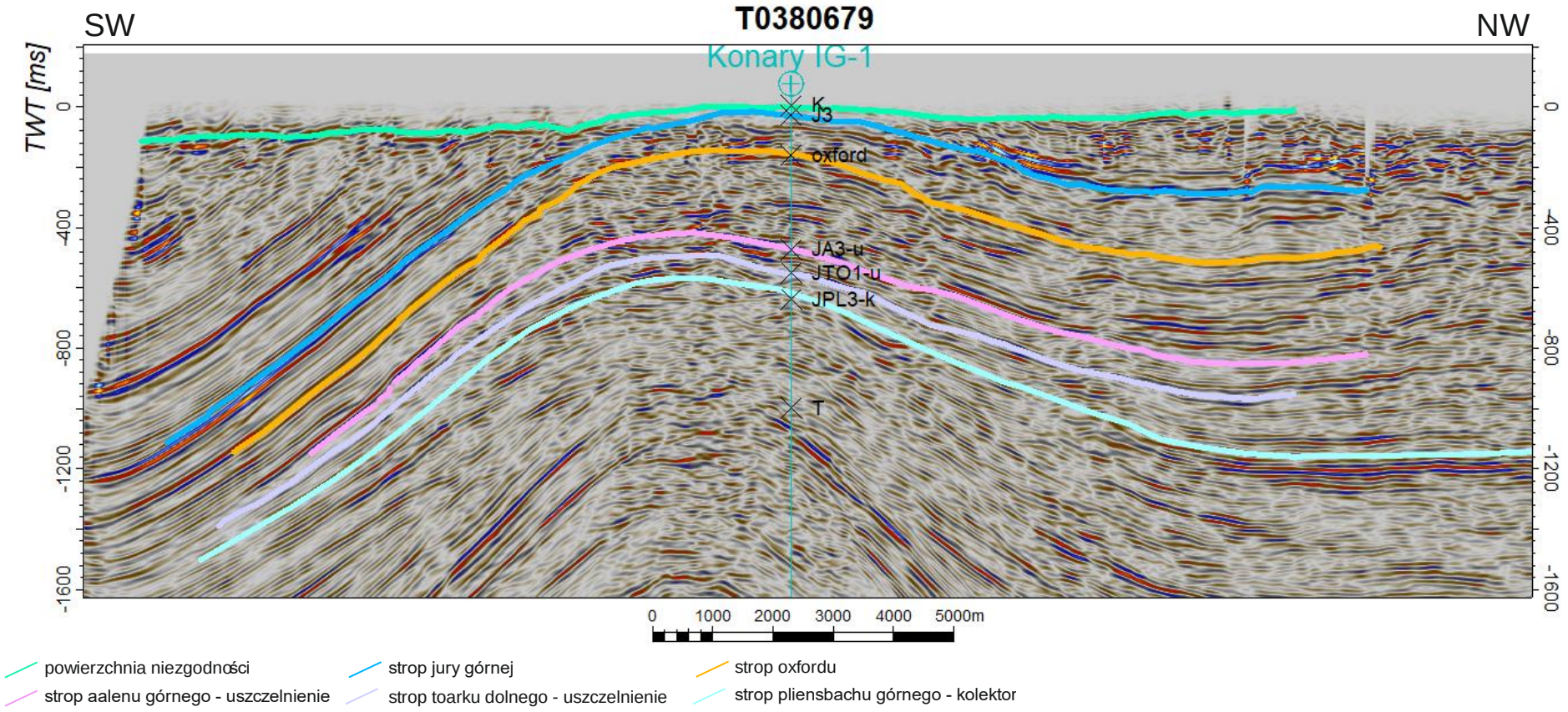


Fig. 7-10 Czasowy przekrój sejsmiczny T0380679 z interpretacją

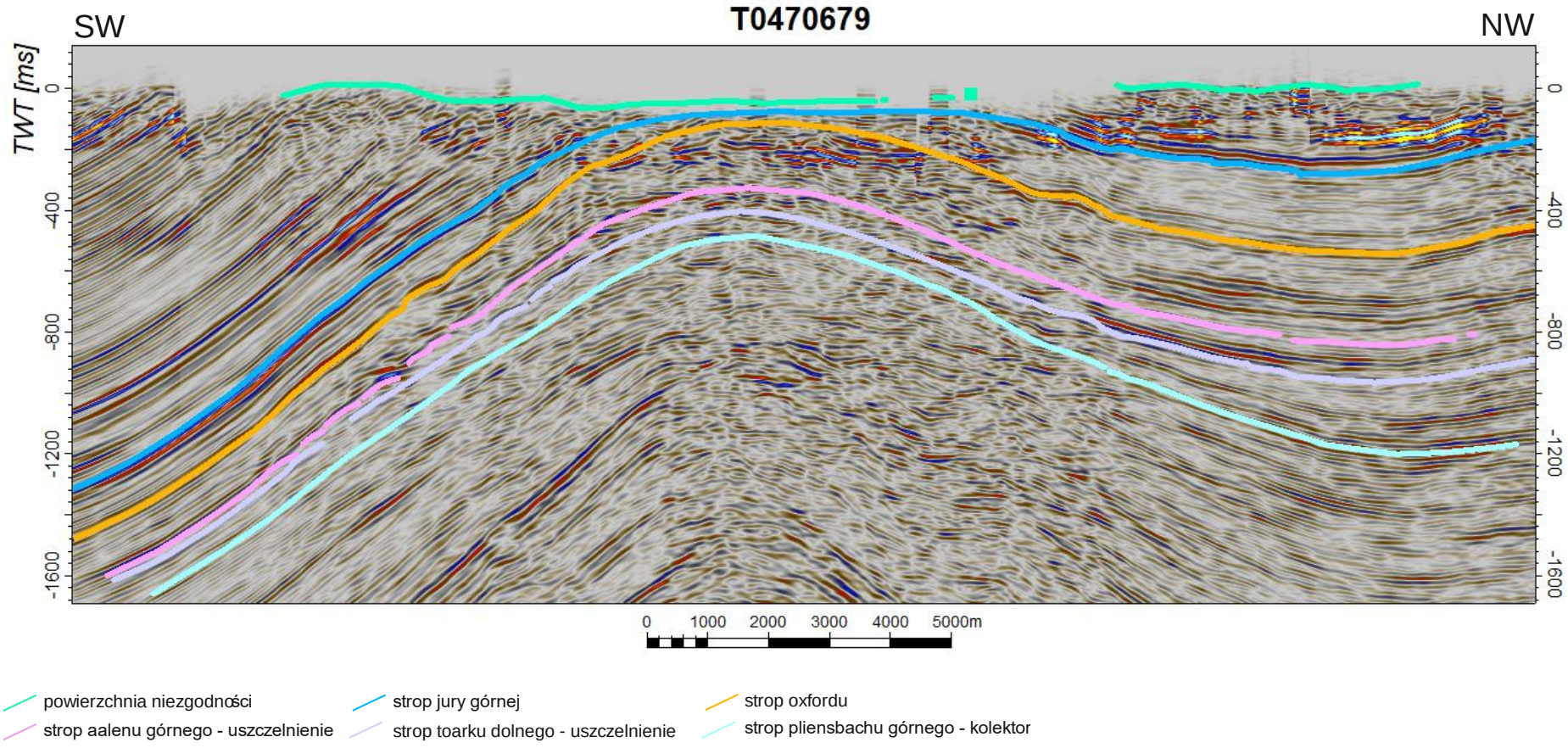


Fig. 7-11 Czasowy przekrój sejsmiczny T0470679 z interpretacją

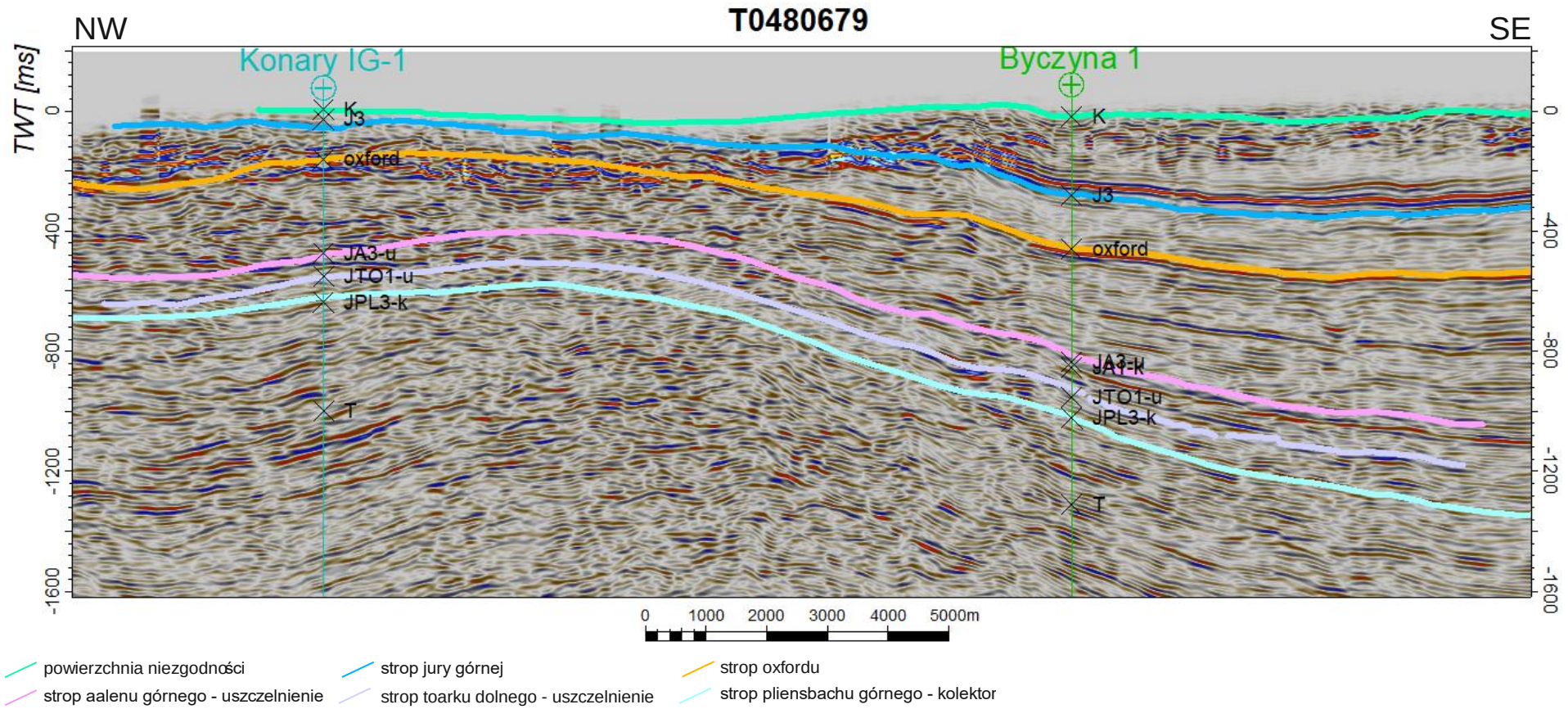


Fig. 7-12 Czasowy przekrój sejsmiczny T0480679 z interpretacją

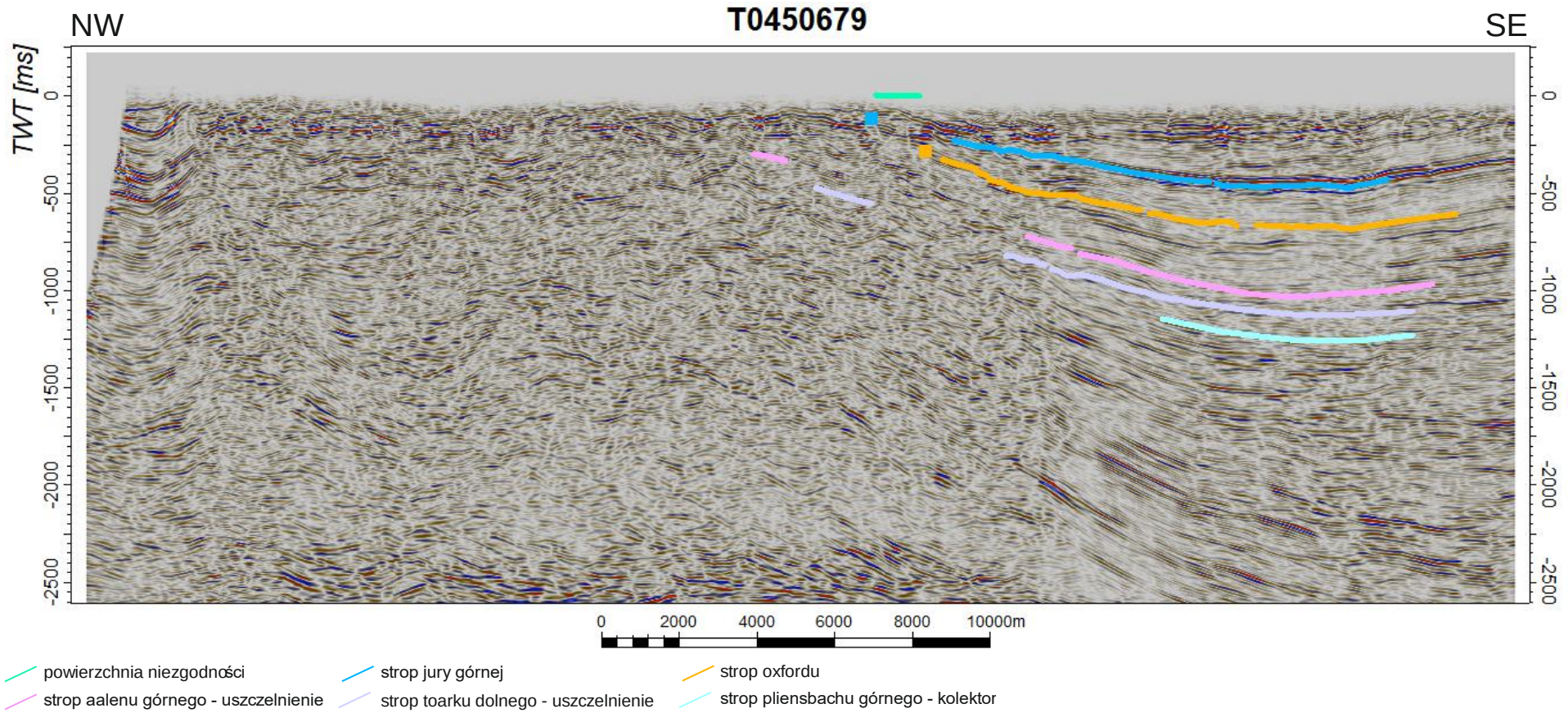


Fig. 7-13 Czasowy przekrój sejsmiczny T0450679 z interpretacją

Profil podłużny T0480679 (Fig. 7-12) łączący dwa kluczowe otwory wiertnicze również prezentuje wyraźnie asymetryczną budowę struktury. Horyzonty sejsmiczne wyznaczone w części SE wyraźnie zapadają w przeciwieństwie do części NW, gdzie zwiększenie głębokości ma bardzo łagodny charakter. Jakość obrazu sejsmicznego utrudnia jednoznaczną interpretację. Widoczny jest zarys trendu przebiegu refleksów, jednak nie jest on tak ciągły jak w SE części profilu.

Brak wyraźnej ciągłości refleksów w szczytowej części struktury na profilach podłużnych (Fig. 7-12, Fig. 7-13) i poprzecznych (Fig. 7-10, Fig. 7-11) dodatkowo utrudnia ocenę jak duże mogą być wyznaczone kolektory przy tak łagodnym zapadaniu horyzontów i czy posiadają odpowiednie zamknięcie. Zakładając, że warstwy w przybliżeniu układają się współkształtnie do poduszki solnej, nad którą powstała antyklina, takie zamknięcie powinno być. Niezbędne jest jednak przeprowadzenie nowych badań, które pozwoliłyby dokładniej ocenić budowę strukturalną.

Na podstawie zinterpretowanych horyzontów sejsmicznych wykonano mapy czasowe powierzchni sejsmicznych stropu: aalenu górnego – uszczelnienie, toarku dolnego – uszczelnienie, pliensbachu górnego – kolektor (Fig. 7-14, Fig. 7-15, Fig. 7-16).

Obecność jednoznacznego i pewnego zamknięcia poziomów kolektorskich zwłaszcza od strony NW wymaga dalszych badań i analizy. W pierwszym etapie konieczna jest interpretacja o większym zasięgu powierzchniowym, w celu oceny rozkładu horyzontów i wpływu na ich ułożenie pobliskiego wysadu solnego Góra. W tym momencie nie ma pewności czy warstwy od strony NW w większej odległości od szczytu struktury nadal łagodnie zapadają się czy jednak zmniejszają swoją głębokość z powodu wynoszenia wysadu solnego.

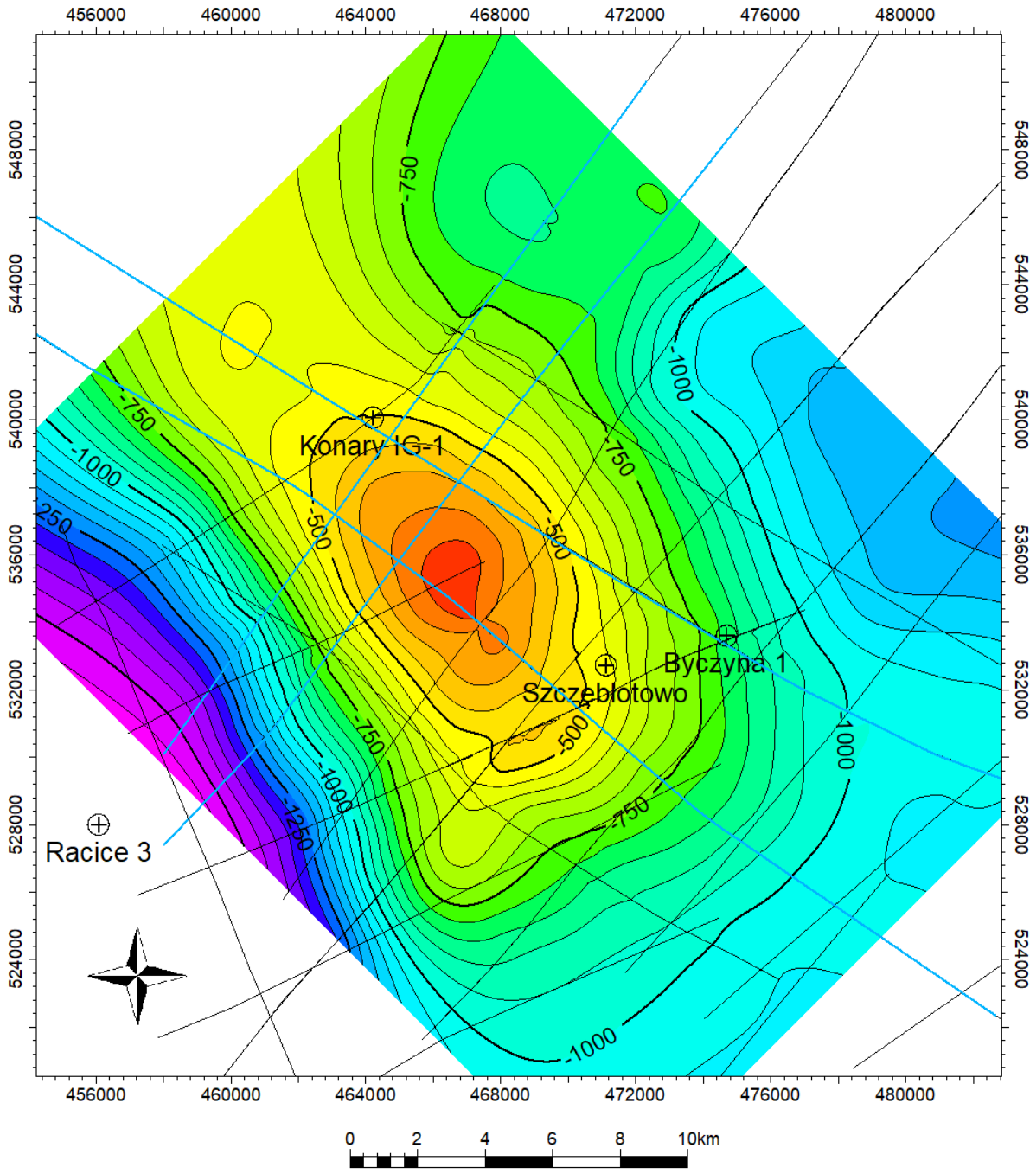


Fig. 7-14 Mapa czasowa powierzchni stropu aalenu górnego – uszczelnienia

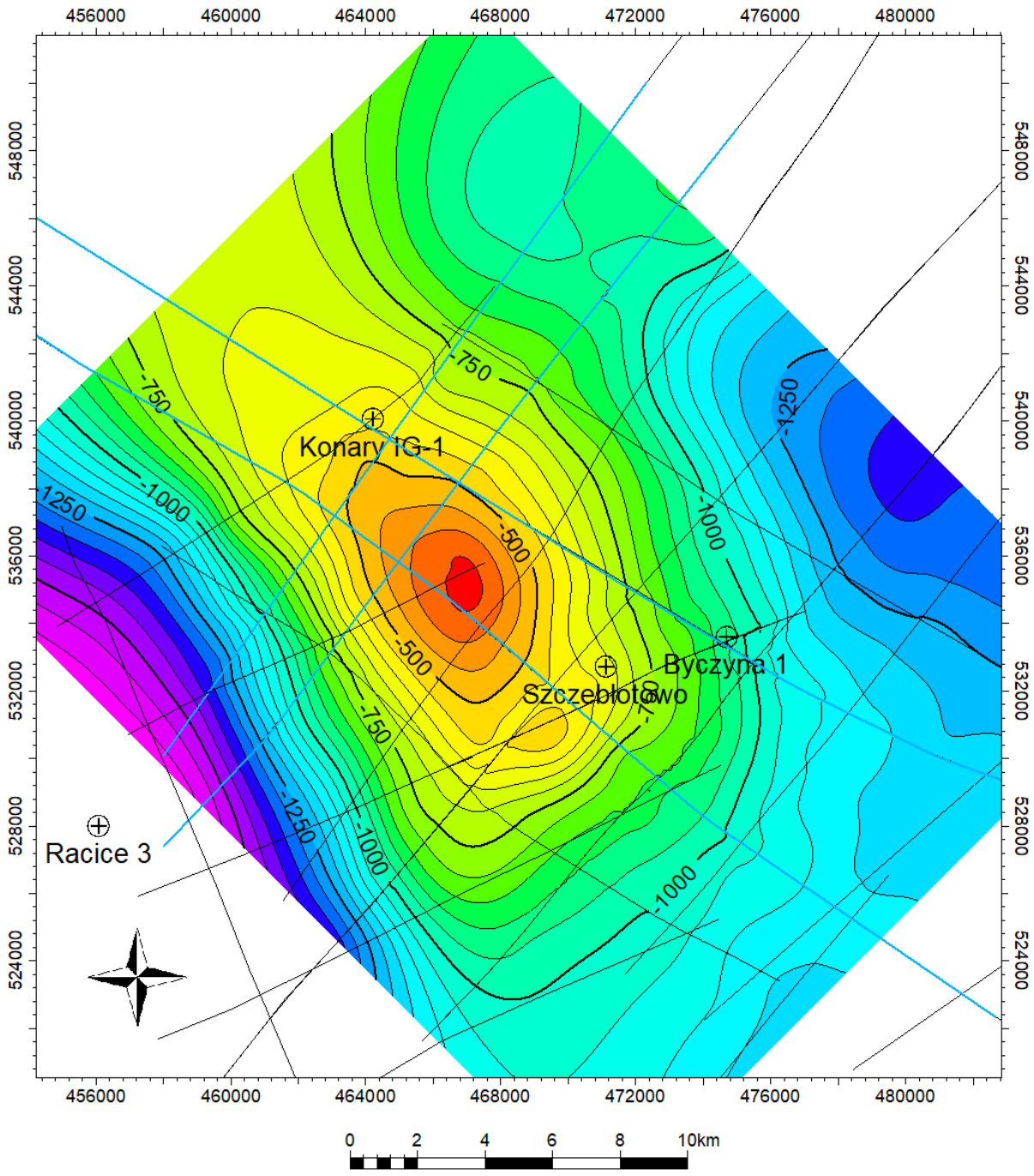


Fig. 7-15 Mapa czasowa powierzchni stropu toarku dolnego – uszczelnienia

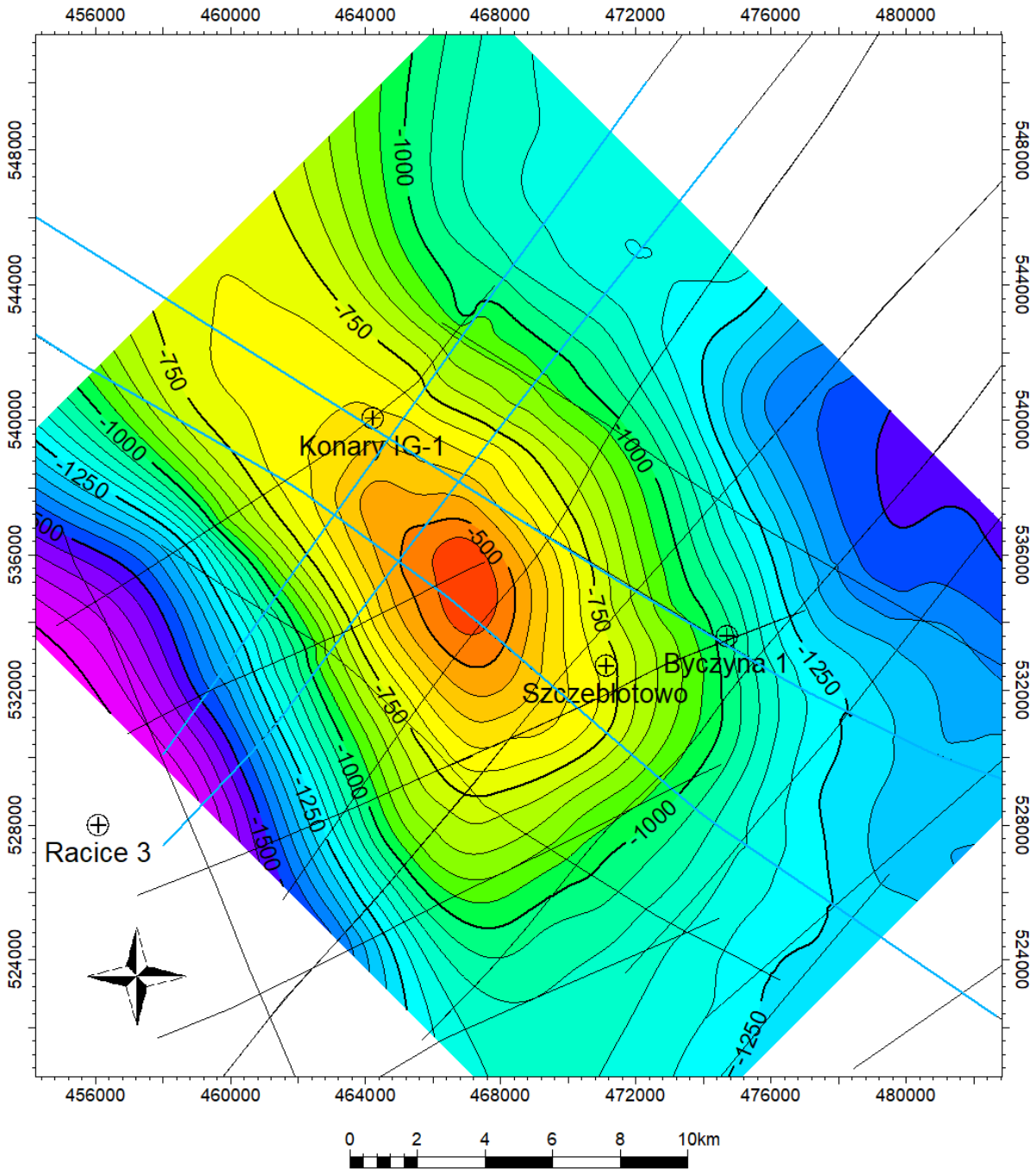


Fig. 7-16 Mapa czasowa powierzchni stropu pliensbachu górnego – kolektora

7.1.3 Struktura Bielsk

Struktura Bielsk jest pokryta stosunkowo gęstą siecią profili sejsmicznych (Fig. 7-17) wykonanych na przełomie lat 80-tych i 90-tych ubiegłego wieku. Większość z niż została wytyczona poprzecznie do struktury. Ogólnie dane są dobrej jakości. Część z nich wymaga jednak ponownego przetwarzania co pokazały wyniki wybranych do reprocessingu profili, których jakość poprawiła się.

Do reprocessingu wybrano 4 profile (rozdział 6.2), które przetworzono do poziomu 100 m n.p.m. Interpretację oparto przede wszystkim na dwóch otworach Bielsk 1 i Bielsk 2 odwierconych w rowie. Z powodu braku w pobliżu innych wierceń wspomagano się również informacjami z otworu Bodzanów IG-1, który jest zlokalizowany przy SE końcu zreprocessowanego profilu T0540589. Nawiercił on pakiet utworów poza rowem, co wpłynęło na identyfikację horyzontów sejsmicznych po SW stronie struktury. Jednak z powodu braku wykonanych profili równocześnie wzdłuż i poza strukturą, które łączyłyby linie poprzeczne, a także z powodu braku odwierconych otworów, interpretacja jest obarczona znaczną niejednoznacznością, zwłaszcza, że korelując horyzonty z większej odległości po drodze mogą występować uskoki (na podstawie interpretacji profilu sejsmicznego Kijewska i Głuszyński, 2019).

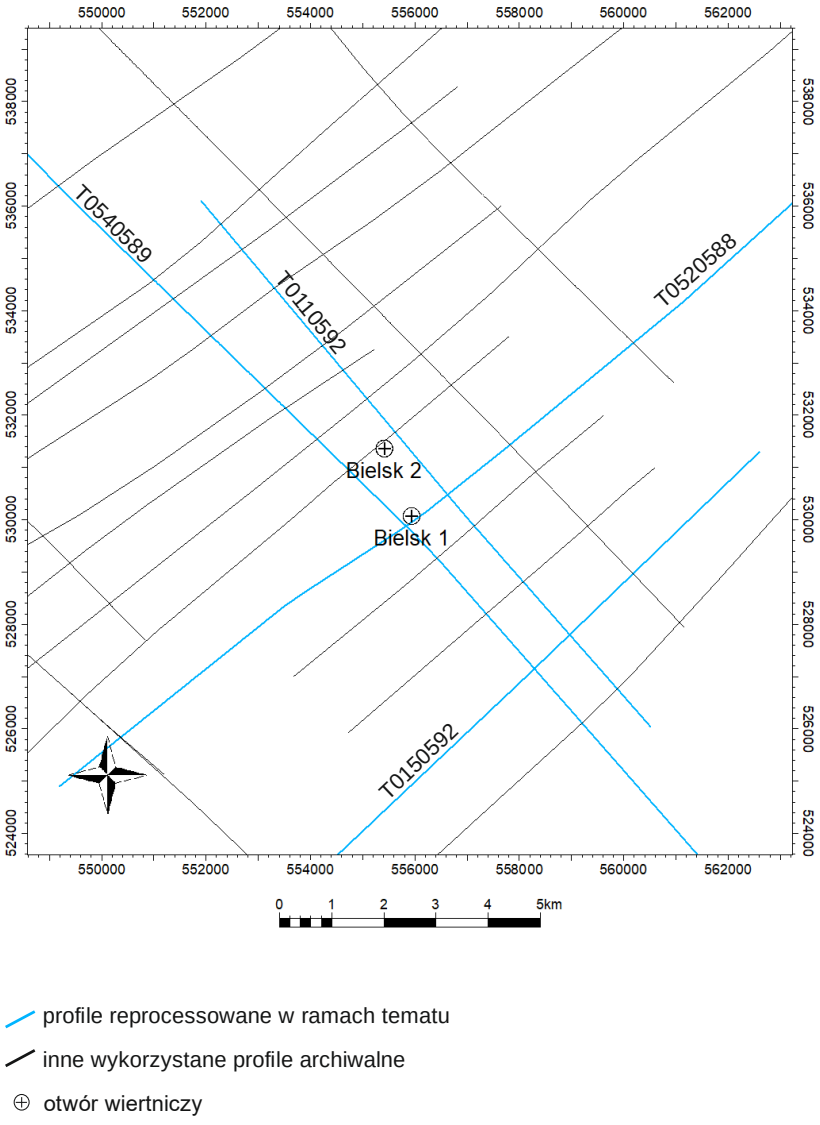


Fig. 7-17 Mapa lokalizacji profili sejsmicznych i otworów wiertniczych na obszarze struktury

Analizowana struktura jest oparta na uskokach zakotwiczonych w utworach permskich. Jak sugeruje układ interpretowanych warstw, m.in. większa miąższość warstw w obrębie rowu niż poza nim, główne uskoki były odmładzane i przynajmniej w ostatniej fazie powstawania, tj. na początku dolnej kredy, synsedymentacyjne (Fig. 7-18 i Fig. 7-19). Struktura była następnie wyniesiona w czasie inwersji bruzdy śródpolskiej, która ukształtowała jej antyklinalny charakter. W obrębie rowu można wyróżnić liczne mniejsze uskoki towarzyszące. Prawdopodobnie otwór Bielsk 1 przewierca jeden z nich co dodatkowo utrudnia dowiązanie sejsmiki do otworu i identyfikację horyzontów (Fig. 7-18). Część uskoków widocznych na profilach sejsmicznych nie ma kontynuacji pomiędzy profilami, co jednak nie wyklucza ich obecności.

Analizując interpretację profili poprzecznych do struktury, można stwierdzić, że interpretacja profili podłużnych (Fig. 7-20 i Fig. 7-21) jest obarczona bardzo dużą niejednoznacznością. Uskoki biegnące wzdłuż profili bardzo często przecinają obraz sejsmiczny (Fig. 7-22) sprawiając, że horyzonty sejsmiczne wydają się „sfałdowane" (Fig. 7-20) i tworzą nierzeczywiste struktury. Biorąc pod uwagę, że miąższość warstw i głębokość ich zalegania po obu stronach uskoku jest inna, powoduje to „przeskoki" poszczególnych horyzontów na obrazie. Przy tak skomplikowanej budowie i zuskokowaniu okazuje się, że korelacja horyzontów na podstawie dwóch rzutowanych na profil otworów oddalonych od siebie o ok. 1400 m, a od profilu ok. 350m (Bielsk 2) i ok. 780m (Bielsk 1), jest niemożliwa. Różnice w stratygrafii sugerują, że pomiędzy otworami może być dyslokacja.

Należy też zaznaczyć, że bardzo trudne było również wiązanie na krzyżówkach samych profili. Już na etapie przetwarzania napotkano trudności związane z dopasowaniem do siebie poszczególnych profili. W trakcie interpretacji zauważono, że ten sam pikowany horyzont sejsmiczny prowadzony po jednym refleksie nagle na krzyżującym się profilu zmienia fazę na przeciwną. Być może wpływają na to zmiany litofacjalne, ale nie można wykluczyć wpływu poprawki statycznej, której poprawną aplikację w sytuacji zmian litologicznych można stwierdzić dopiero na etapie przetwarzania.

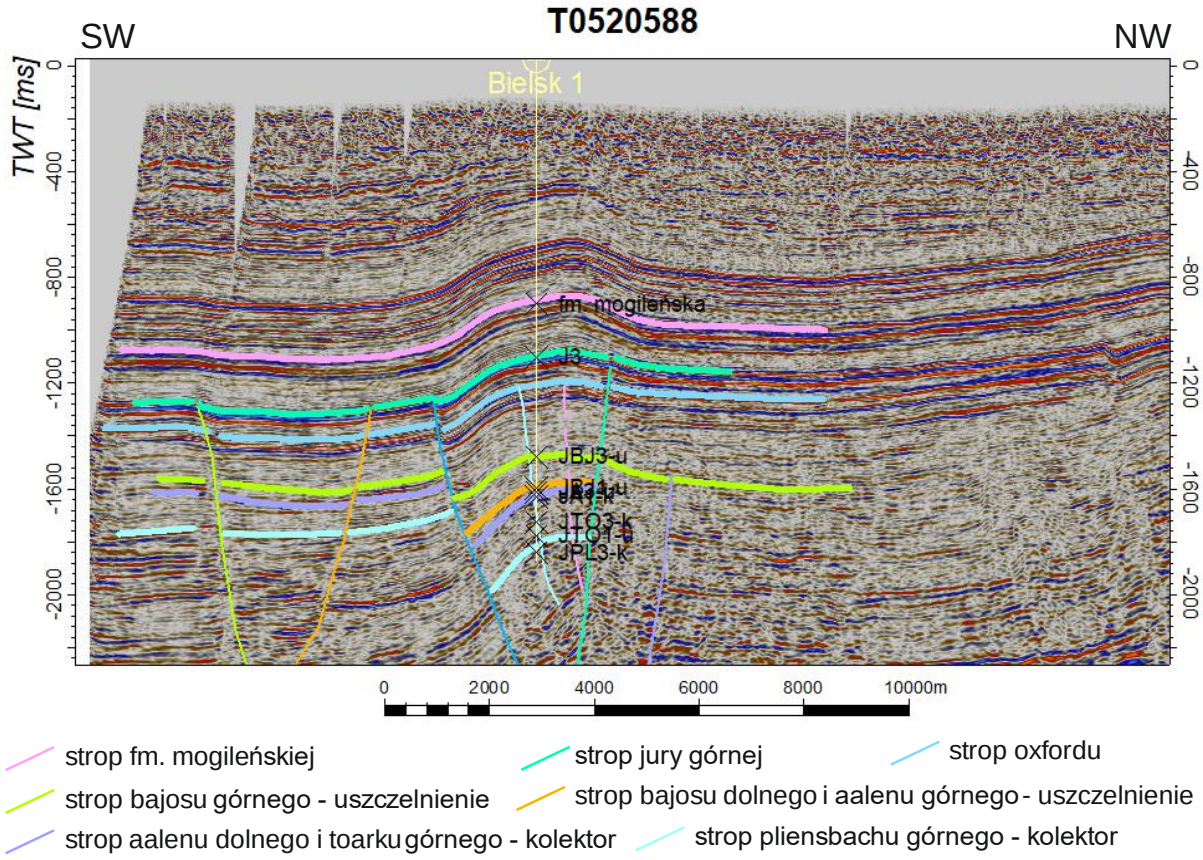


Fig. 7-18 Czasowy przekrój sejsmiczny T0520588 z interpretacją

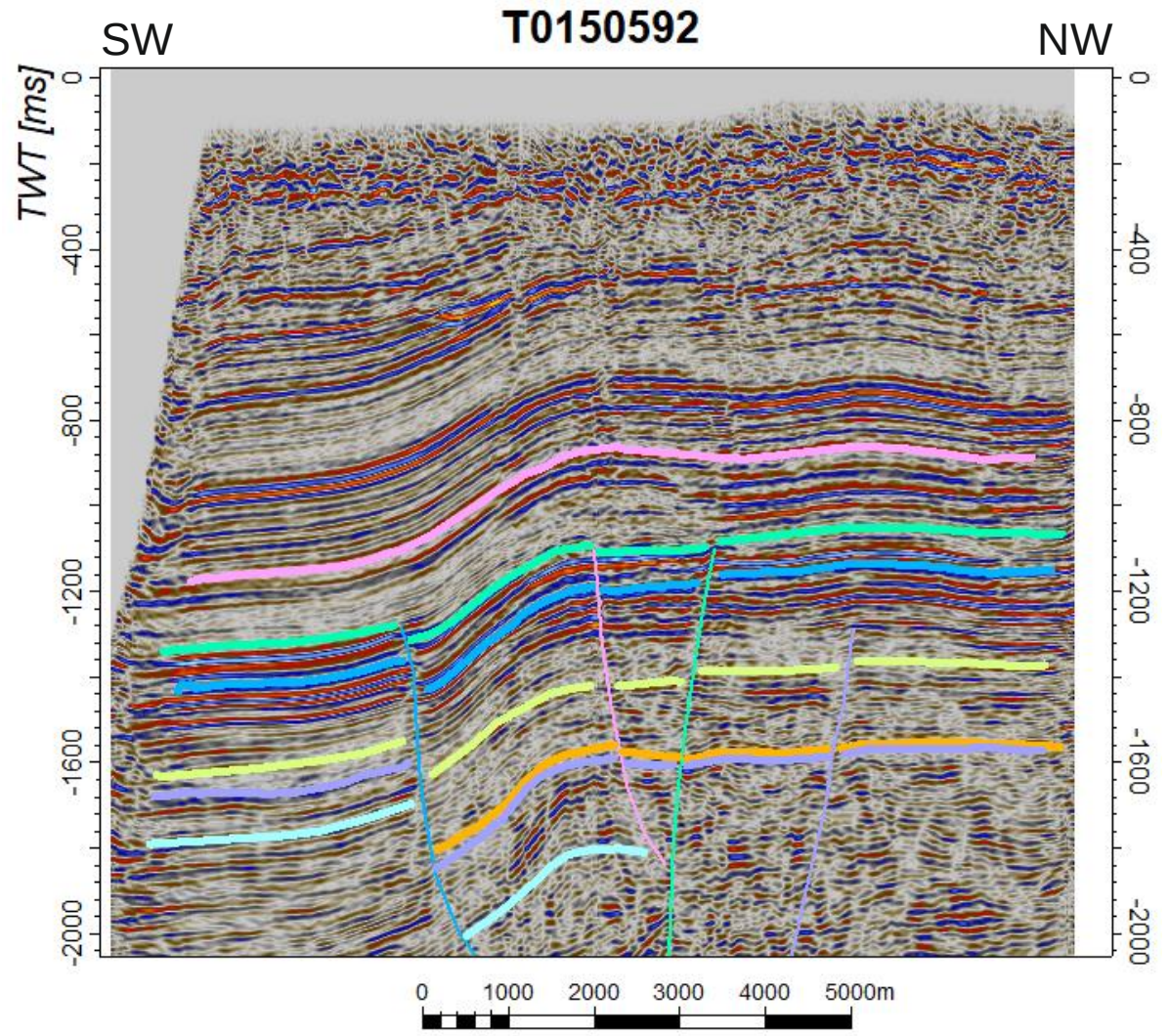


Fig. 7-19 Czasowy przekrój sejsmiczny T0150592 z interpretacją

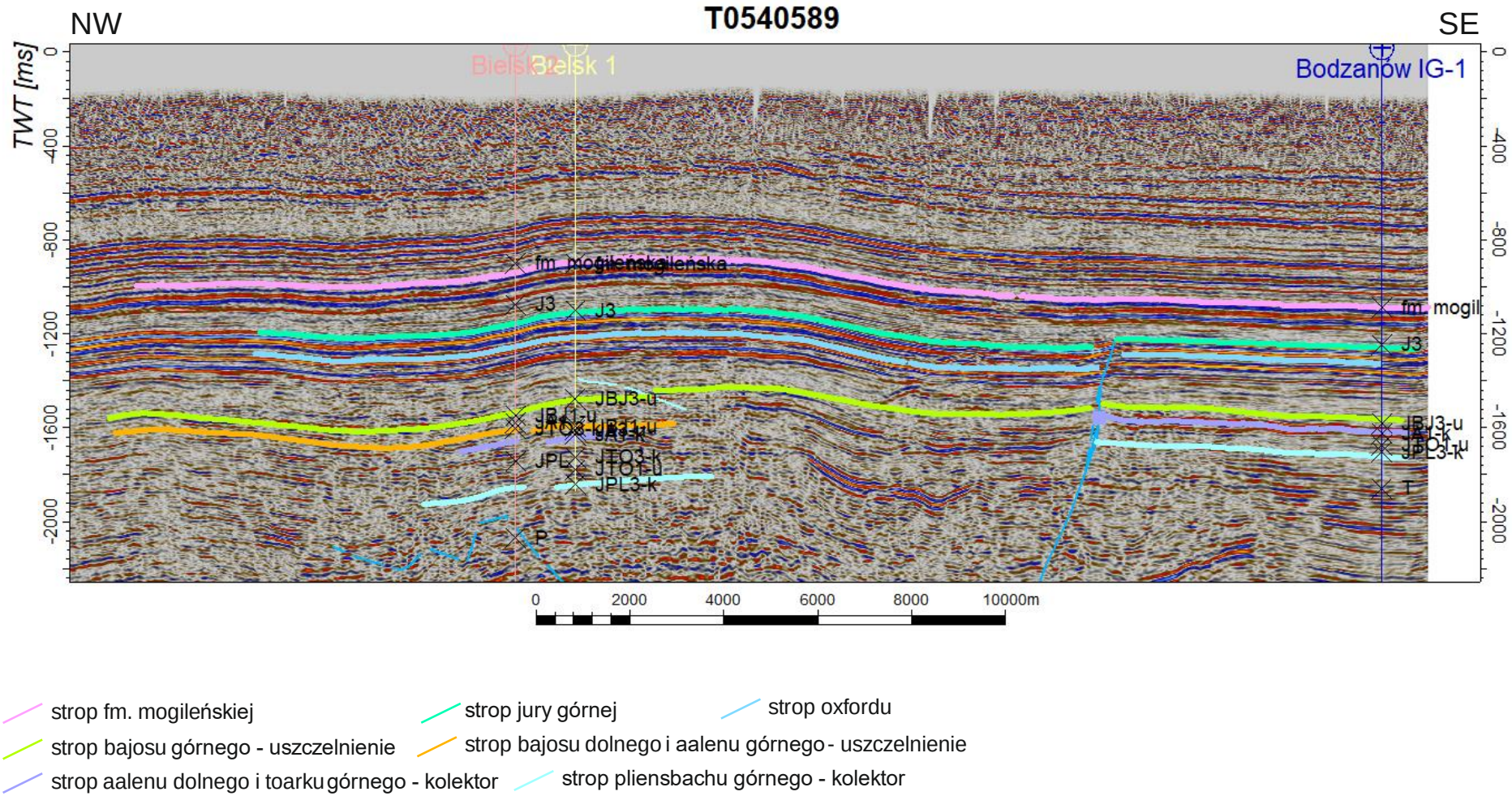


Fig. 7-20 Czasowy przekrój sejsmiczny T0540589 z interpretacją

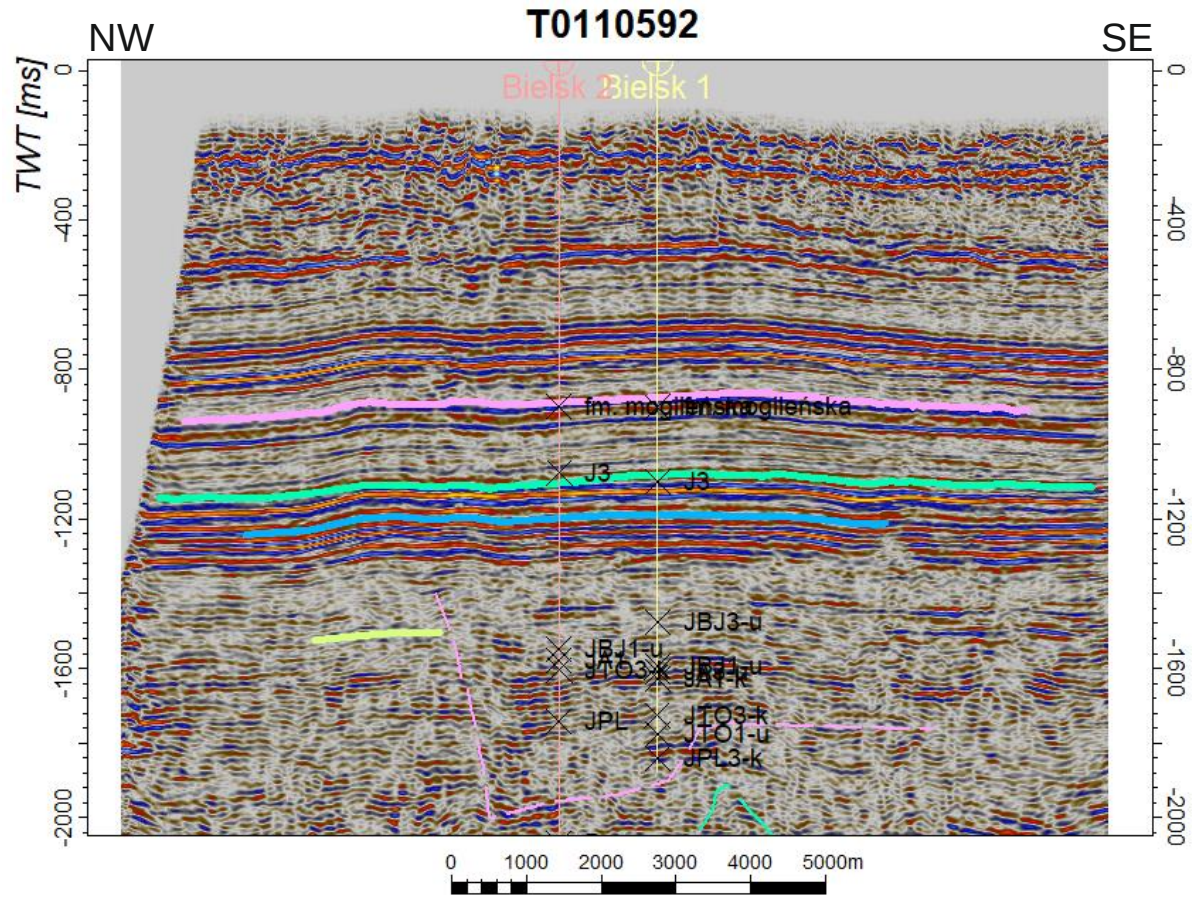


Fig. 7-21 Czasowy przekrój sejsmiczny T0110592 z interpretacją

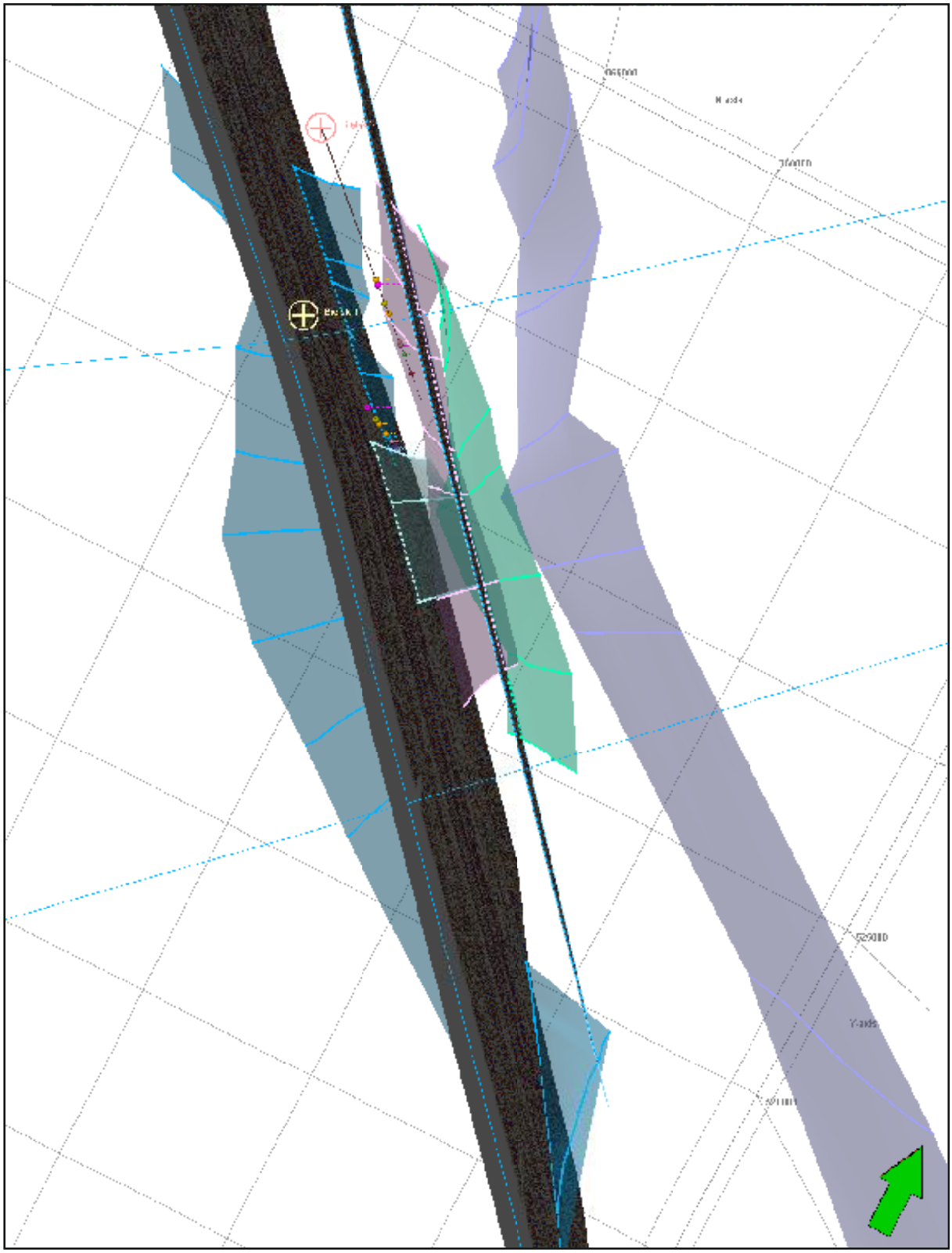


Fig. 7-22 Wizualizacja trójwymiarowa rozkładu skorelowanych uskoków w obrębie struktury Bielsk oraz podłużnych profili sejsmicznych zlokalizowanych wzdłuż uskoków

Jak wykazała interpretacja w obrębie utworów jury poza znaczną głębokością występowania, poziomy uszczelniające i kolektory są silnie zuskokowane i chociaż zrzuty nie muszą być duże mogło nastąpić przerwanie ciągłości warstw. Ma to istotny wpływ przede wszystkim na jakość uszczelnienia, które może nie spełniać swojego zadania. W przypadku kolektora, zatłaczane medium z powodu uskoków również może się rozprzestrzeniać inaczej niż w założeniach. Jedynie horyzont wyznaczający strop formacji mogileńskiej nie wykazuje przerwania przez deformacje nieciągłe.

Interpolacja powierzchni stropu formacji mogileńskiej przedstawia strukturę, której kulminacja układa się w kształt litery „L" (Fig. 7-23). Jej SE część oparta jest jednak na jednym reprocessowanym profilu, na którym widoczne jest delikatne podniesienie warstw. Na sąsiednim profilu horyzonty układają się jednak płasko. Identyfikacja kształtu struktury w obrębie kredy wymaga lepszego rozpoznania pod kątem zamknięcia zwłaszcza od NE strony wyniesienia co zasugerowały wyniki zreprocessowanego profilu T0150592 (Fig. 7-19).

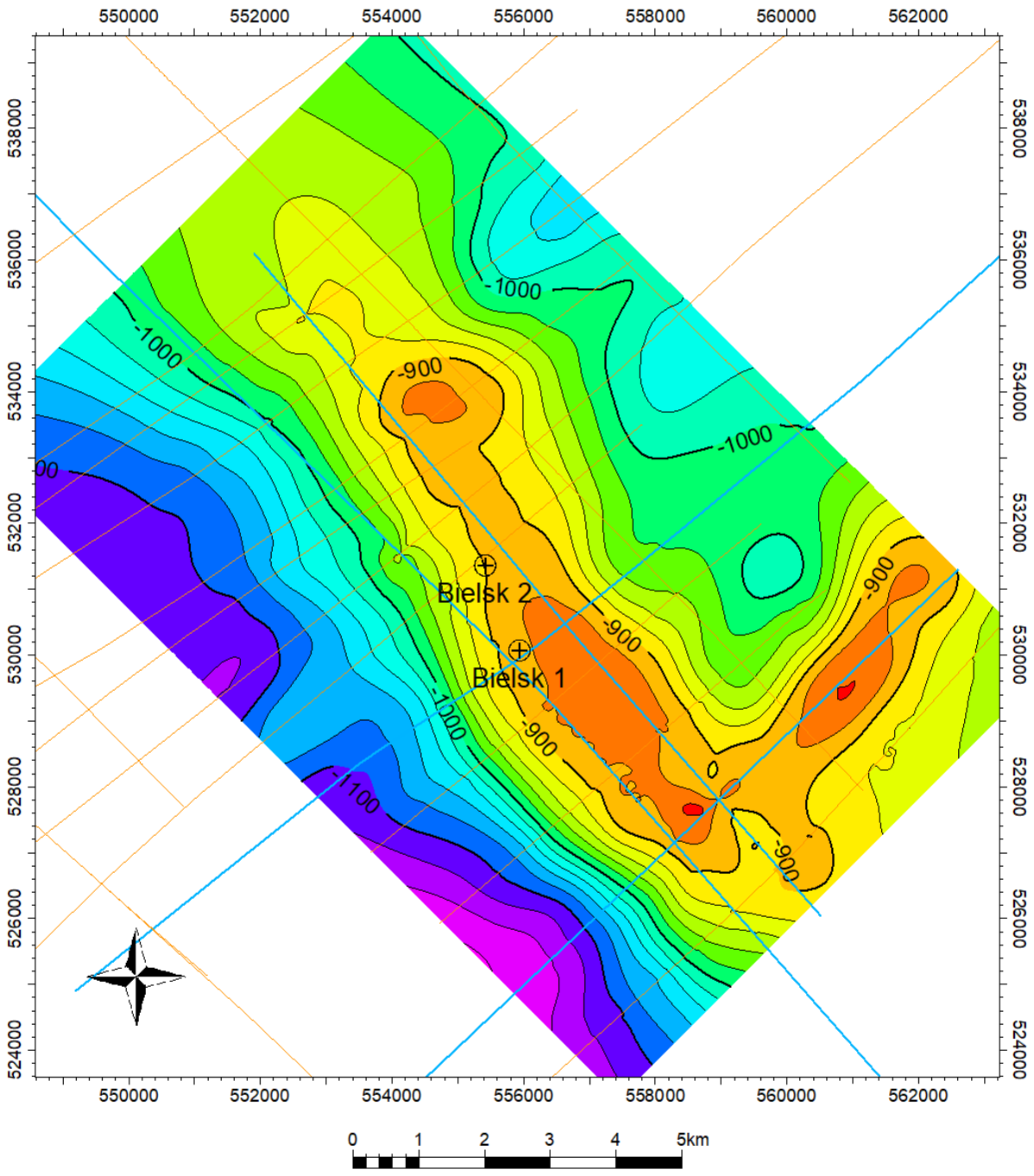


Fig. 7-23 Mapa czasowa powierzchni stropu formacji mogileńskiej

7.2 Archiwalne mapy strukturalne i zagospodarowanie terenu

(Adam Wójcicki, Dominika Sieradz, Leszek Skowroński)

7.2.1 Archiwalne mapy strukturalne

Równolegle z pozyskiwaniem i interpretacją danych sejsmicznych przeanalizowano regionalne mapy geologiczne pod kątem występowania stref nieciągłości tektonicznych. Analizy rozpoczęto od „Atlasu paleogeograficznego epikontynentalnego permu i mezozoiku w Polsce" (Dadlez i in., 1998), który jest dotychczas jedynym opracowaniem regionalnym przedstawiającym tę problematykę w skali całego kraju. Generalnie można stwierdzić, że struktury jurajskie Budziszewice-Zaosie, Konary i Wojszyce występują na poduszkach soli cechsztyńskich (Fig. 7-24), co nie ma miejsca w przypadku struktury kredowej (z niżej ległymi poziomami jurajskimi) Bielsk-Bodzanów, choć w głębokim podłożu tej struktury występują utwory cechsztynu.

W stropie utworów cechsztynu na obszarze polskiej części basenu permskiego obserwuje się (Fig. 7-25 i Fig. 7-26) generalnie dość skomplikowaną tektonikę, z tym, że ma to miejsce w mniejszym stopniu w rejonach czterech rozpatrywanych struktur, a z tego „najspokojniej" jest w rejonie struktury Wojszyce.

Z kolei w utworach mezozoiku (Fig. 5-27 i Fig. 5-28) zidentyfikowano uskoki w brzeżnych częściach struktur Konary, Wojszyce i Bielsk-Bodzanów. Natomiast interpretacja danych sejsmicznych dla struktury Konary (rozdział **7.1.2**) nie potwierdza jednoznacznie występowania walnego uskoku w utworach mezozoiku na ESE skrzydle struktury, zaś w przypadku struktury Bielsk-Bodzanów, konkretnie kulminacji Bielska (rozdział **7.1.3**), zidentyfikowano strefy uskokowe przecinające spąg kredy dolnej i utwory starsze, natomiast nie stwierdzono uskoków w obrębie uszczelnienia górnokredowego. W obrębie struktury Wojszyce, jak to omówiono w dalszej części niniejszego rozdziału **7**, najprawdopodobniej brak jest uskoków stwarzających zagrożenia w przypadku magazynowania/składowania substancji poniżej regionalnego uszczelnienia dolnojurajskiej formacji ciechocińskiej.

Jeśli chodzi o mapy o większym stopniu szczegółowości, tzn. wykonane w ramach dokumentacji sejsmicznych to można generalnie stwierdzić, że w przypadku struktur solankowych rzadko wykonywano mapy horyzontów w obrębie interesujących nas kompleksów geologicznych, tzn. utworów kredy i jury, zaś skupiano się na kartowaniu utworów starszych, istotnych z punktu widzenia poszukiwań węglowodorów i innych surowców. Poniżej najważniejsze omówiono dokumentacje, wykorzystane przy kompleksowej interpretacji geologiczno-geofizycznej struktur Budziszewice-Zaosie, Konary i Bielsk-Bodzanów w ramach niniejszego rozdziału **7** (interpretację struktury Wojszyce oparto zasadniczo na materiałach wytworzonych w ramach projektu demo CCS PGE Bełchatów).

W rejonie struktury Budziszewice-Zaosie wykonano w ramach tematu sejsmicznego AMOCO Polska Centralna Blok-A, rejon: Piotrków Trybunalski-Rawa Mazowiecka (Łobaziewicz, 1997) mapy czasowe dwóch horyzontów jurajskich (przystropowej części jury górnej i spągu jury). Materiały te zostały wykorzystane obecnie, podobnie jak wcześniej w przedsięwzięciu „Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO_2 wraz z ich programem monitorowania" (Kijewska i Wróbel [w:] Wójcicki i in., 2013) do interpretacji profili sejsmicznych przecinających strukturę. Na mapie spągu jury (Łobaziewicz, 1997) przebiega uskok w rejonie otworu Buków 1

i dalej poza strukturą na południe od otworu Buków 2. Według interpretacji danych sejsmicznych prowadzonej dla tej struktury w rozdziale **7.1.1**, uskok ten nie zaznacza się w utworach jury.

W rejonie struktury Konary wykonano w ramach tematu sejsmicznego Włocławek - Płock, rejon: Inowrocław – Toruń (Jurek i in., 1980) prześledzono jedynie na profilach sejsmicznych dwa horyzonty jurajskie – strop jury środkowej i strop jury górnej, jednakże korelacje te są widoczne jedynie fragmentarycznie na poszczególnych profilach, a obraz sejsmiczny jest mało czytelny. Natomiast mapy sporządzone w ramach dokumentacji obejmują horyzonty w utworach starszych, dolnego triasu i cechsztynu. Podsumowując, w interpretacji danych sejsmicznych prowadzonej dla tej struktury w rozdziale **7.1.2**, wykorzystano z tej dokumentacji, w miarę możliwości, wyniki korelacji horyzontów w utworach jury na profilach sejsmicznych.

W rejonie struktury Bielsk-Bodzanów (zasadniczo w rejonie kulminacji Bielska, czyli NW części struktury) ramach tematu sejsmicznego Rypin-Wyszogród w rejonie Kamionki-Bielsk (Marosz i Tomaszewska, 1993) wykonano, jeśli chodzi o interesujące nas formacje geologiczne (kreda-jura) jedynie mapę stropu kredy dolnej, czyli stropu kolektora – piaskowcowej formacji mogileńskiej, w wersji czasowej i głębokościowej. Na mapie nie stwierdzono żadnych uskoków w stropie kredy dolnej, co potwierdza w tym zakresie wyniki interpretacji danych sejsmicznych wykonanej dla tej struktury w rozdziale **7.1.3**.

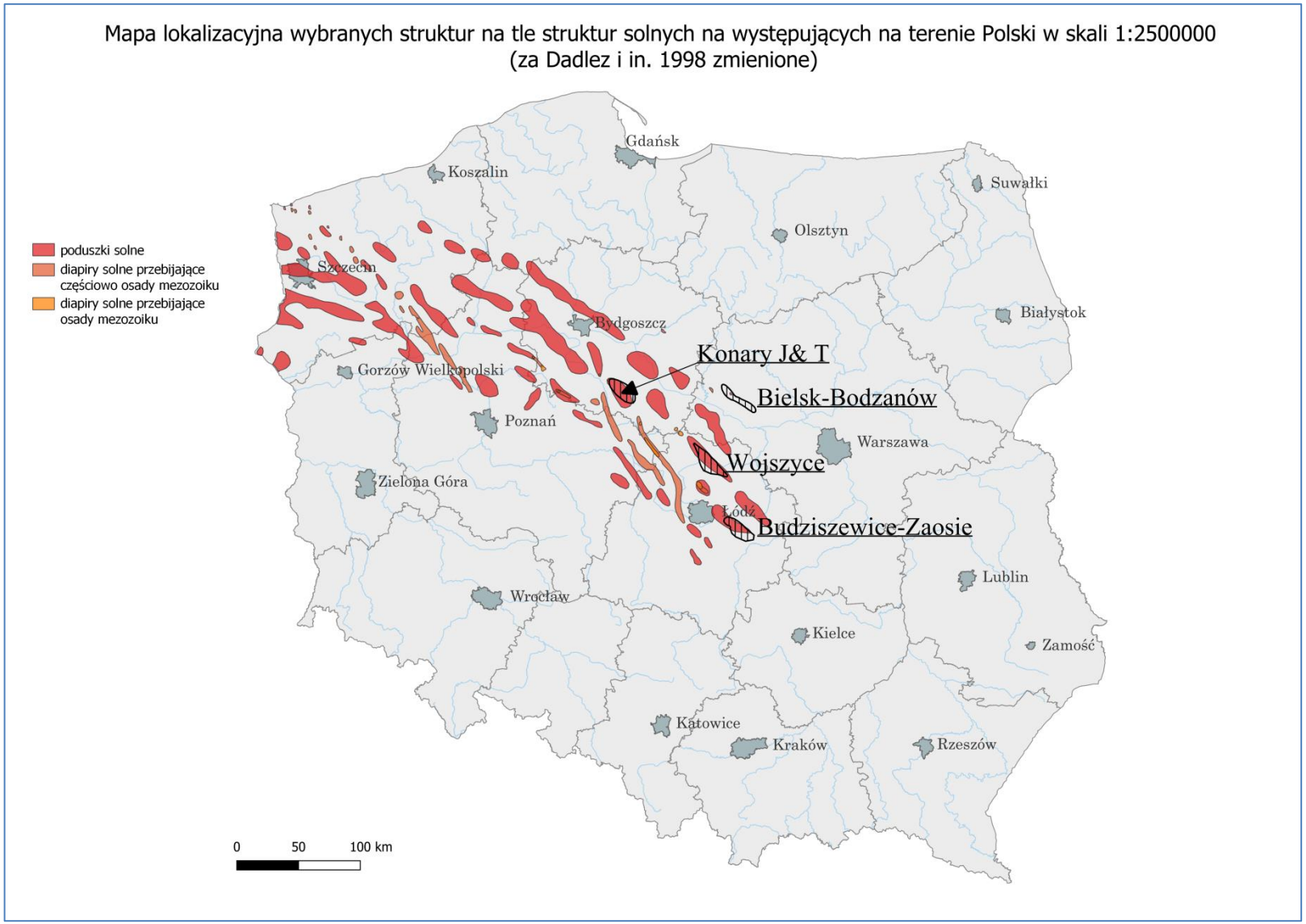


Fig. 7-24 Lokalizacja rozpatrywanych struktur solankowych na tle struktur solnych występujących na obszarze Polski (na podstawie Dadlez i in., 1998)

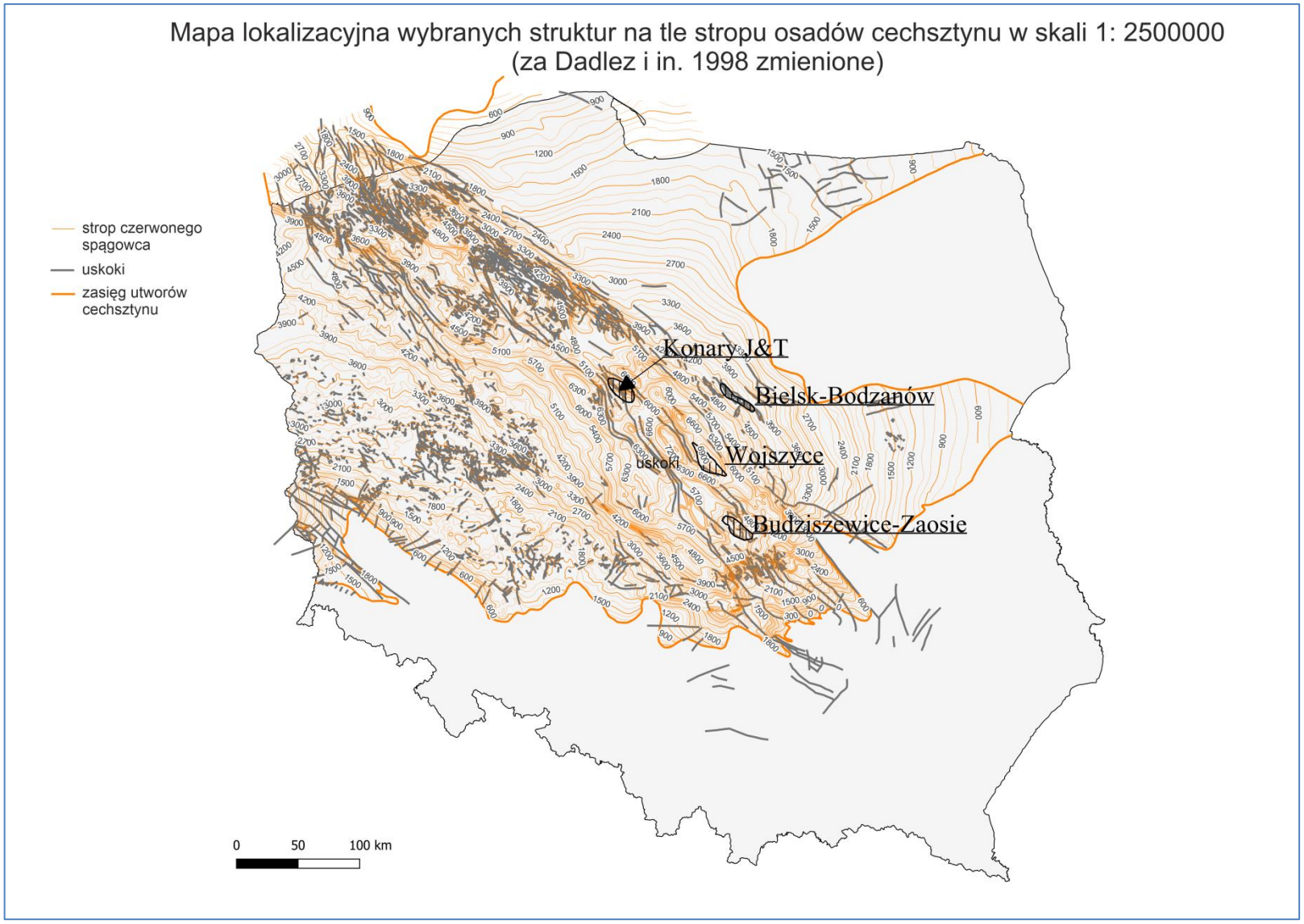


Fig. 7-25 Lokalizacja rozpatrywanych struktur solankowych na tle mapy stropu cechsztynu na obszarze Polski (na podstawie Dadlez i in., 1998)

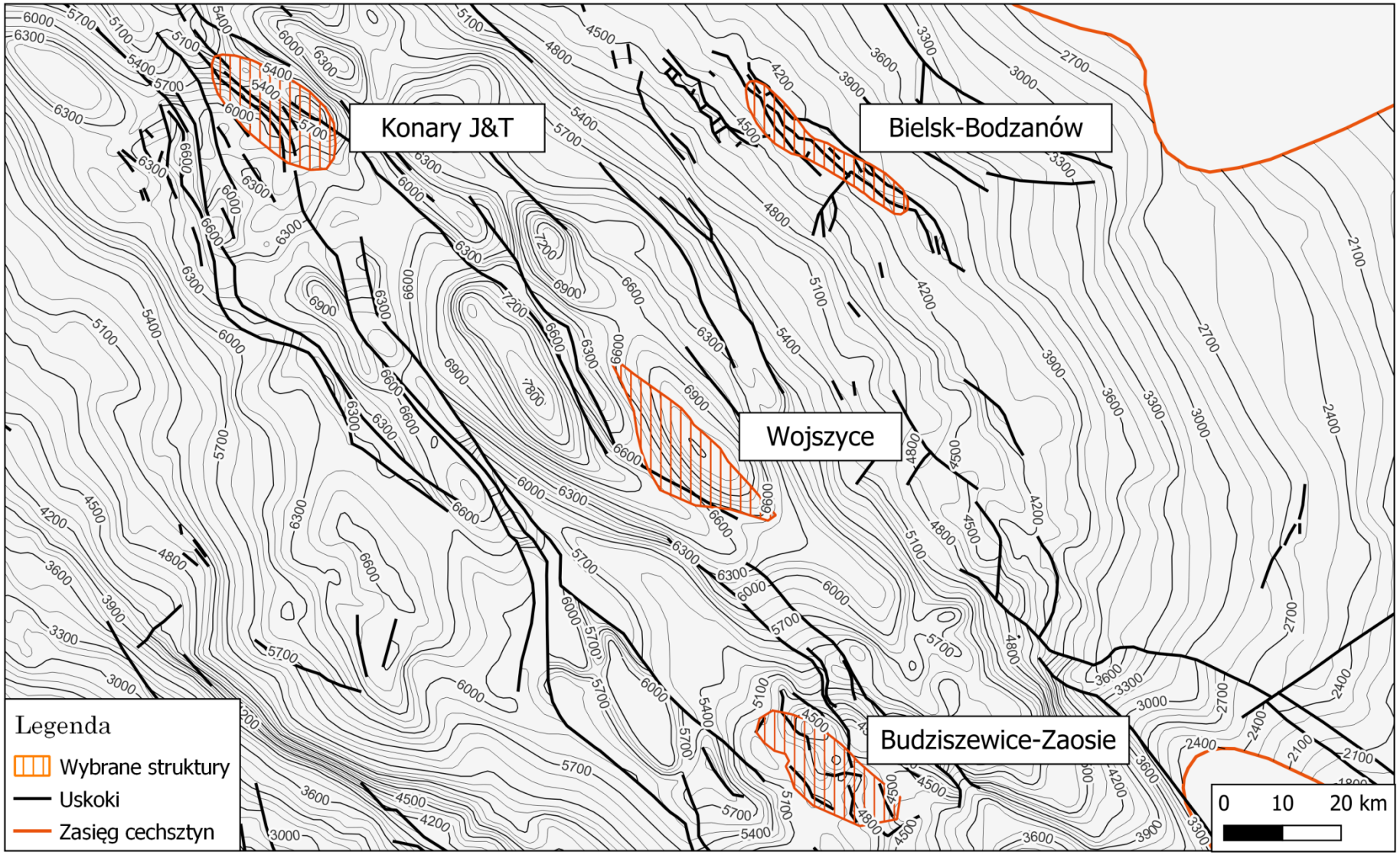


Fig. 7-26 Lokalizacja rozpatrywanych struktur solankowych na tle mapy stropu cechsztynu na obszarze Polski centralnej (na podstawie Dadlez i in., 1998)

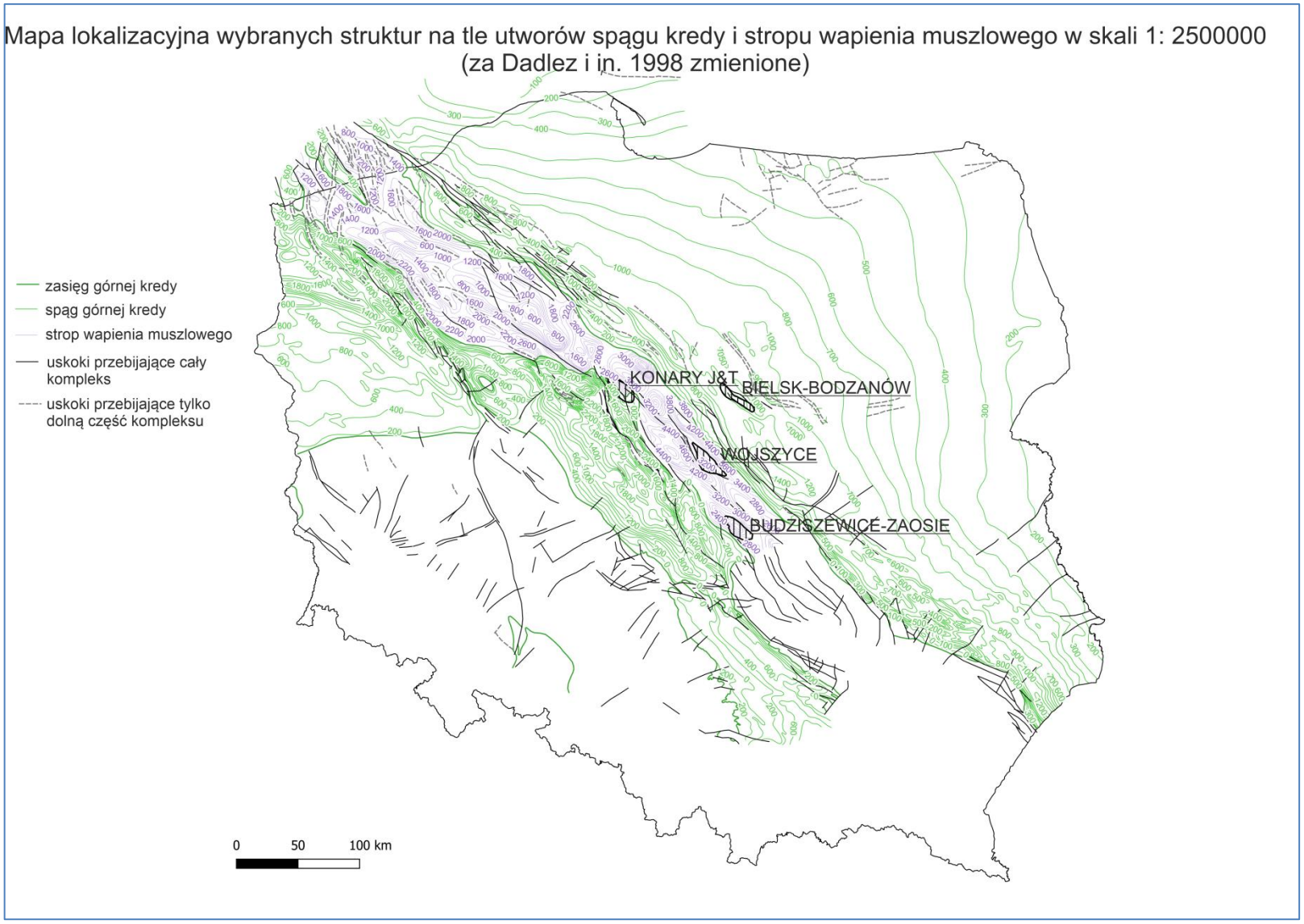


Fig. 7-27 Lokalizacja rozpatrywanych struktur solankowych na tle mapy spągu kredy górnej i stropu wapienia muszlowego na obszarze Polski (na podstawie Dadlez i in., 1998)

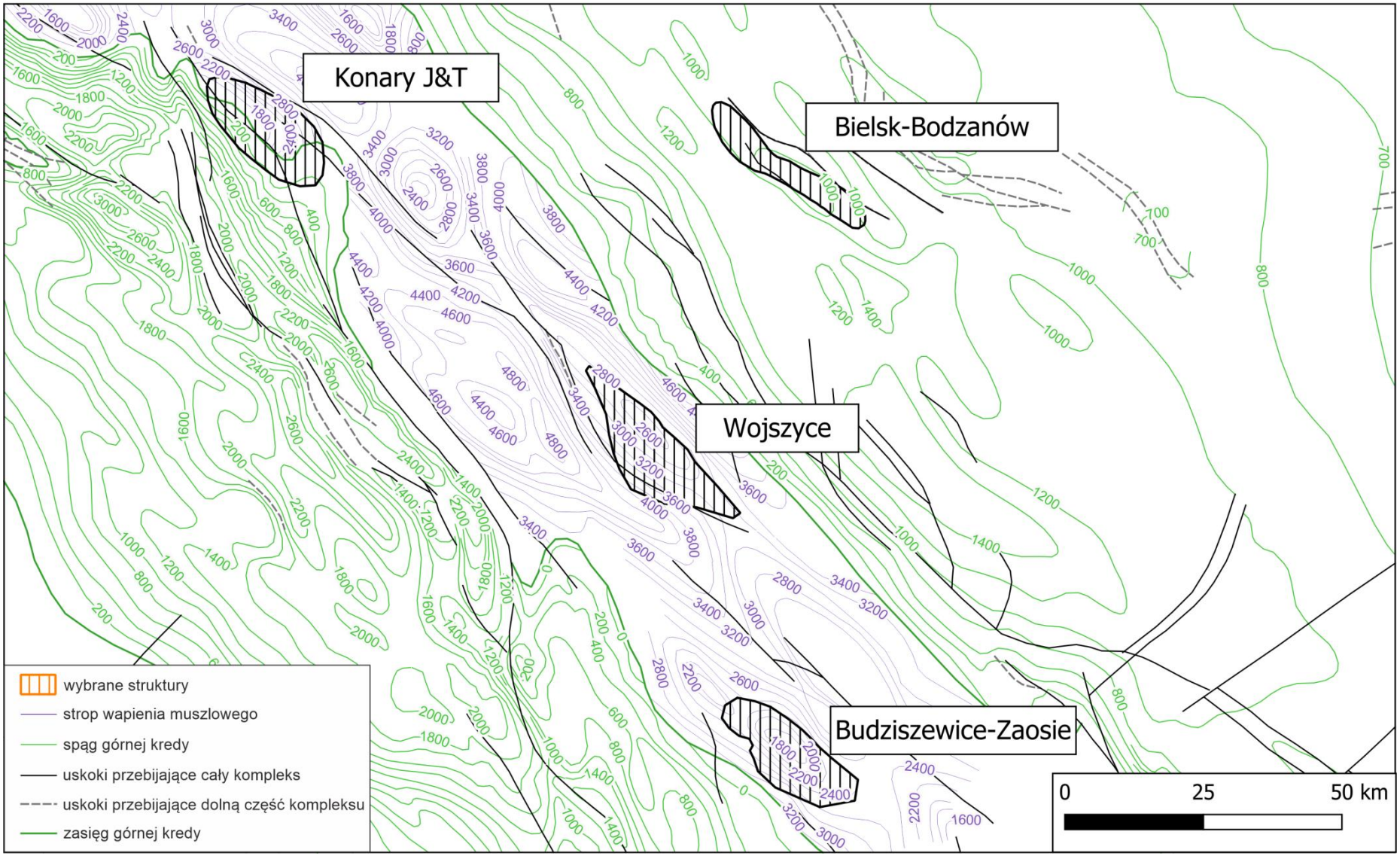


Fig. 7-28 Lokalizacja rozpatrywanych struktur solankowych na tle mapy spągu kredy górnej i stropu wapienia muszlowego na obszarze Polski centralnej (na podstawie Dadlez i in., 1998)

7.2.2 Zagospodarowanie terenu

Jeśli chodzi zagospodarowanie terenu, to w obrębie obszaru Polski centralnej obejmującego rozpatrywane struktury znajduje się szereg obszarów zurbanizowanych, lecz na obszarach poszczególnych struktur nie występują większe skupiska osadnicze (Fig. 7-29 i Fig. 7-30), za to występują rozmaite obszary ochrony przyrody, ale brak jest szczególnie chronionych obszarów parków narodowych, zaś obszary NATURA 2000 (tzn. Specjalne Obszary Ochrony i Obszary Specjalnej Ochrony) obejmują jedynie fragment struktury Wojszyce. Informacje te zostały przedstawione w sposób bardziej szczegółowy dla poszczególnych struktur na Fig. 7-31 – Fig. 7-38 i zostały one wykorzystane w rozdziale 8 do przedstawienia propozycji wytycznych dla projektów robót geologicznych na przykładzie omawianych 4 struktur.

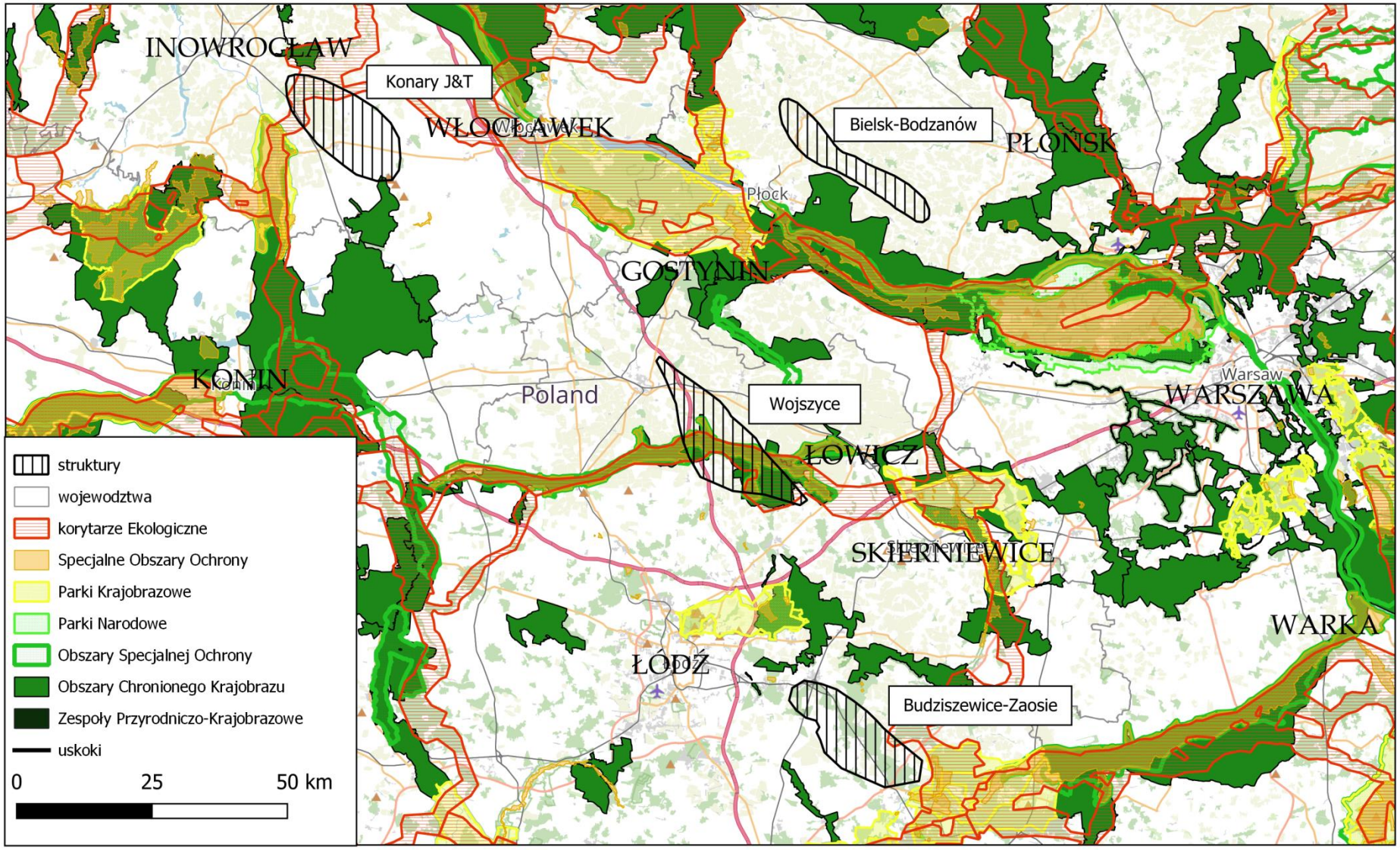


Fig. 7-29 Lokalizacja rozpatrywanych struktur solankowych na tle mapy OpenStreetMap i obszarów ochrony przyrody według GDOŚ

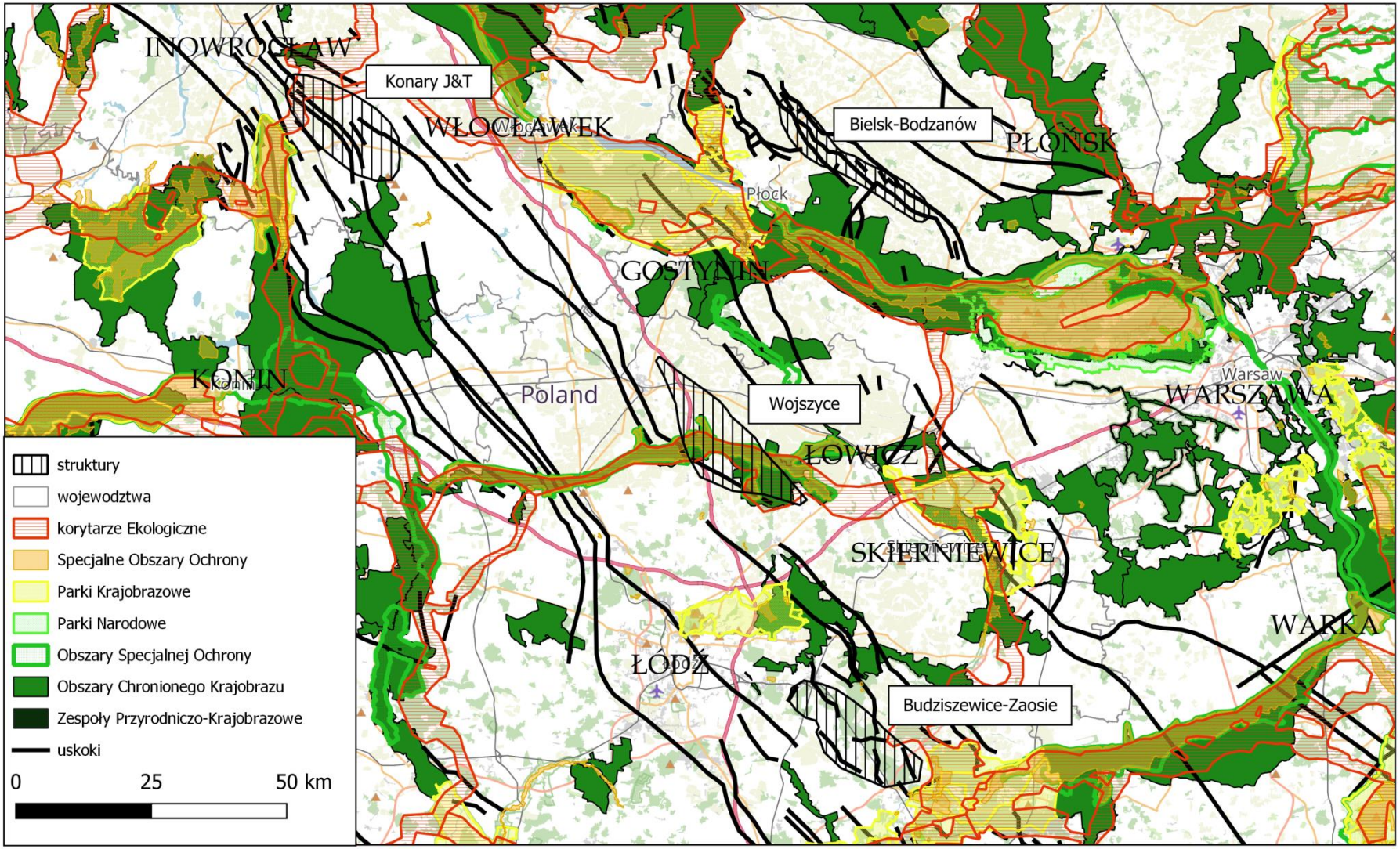


Fig. 7-30 Lokalizacja rozpatrywanych struktur solankowych na tle mapy OpenStreetMap i obszarów ochrony przyrody według GDOŚ, z wniesionymi uskokami w obrębie permomezozoiku (Fig. 26 i Fig. 28)

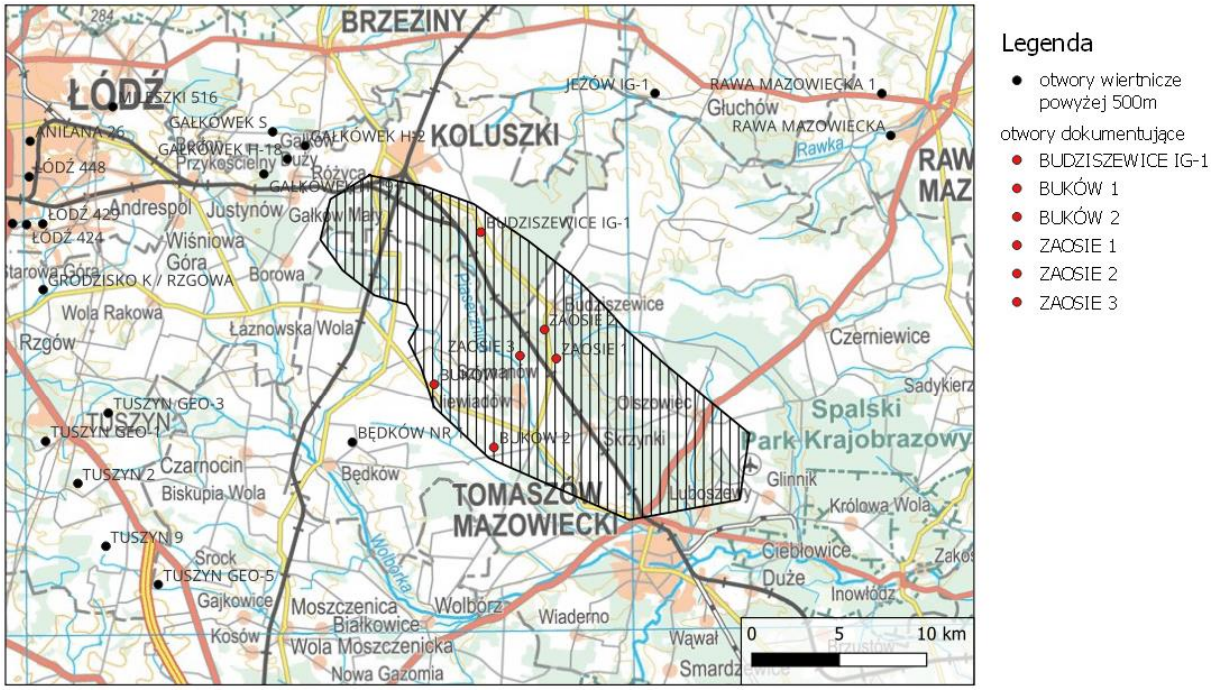


Fig. 7-31 Położenie struktury Budziszewice-Zaosie (na podkładzie geoportal.pl) z wniesionymi otworami nawiercającymi kompleks składowania

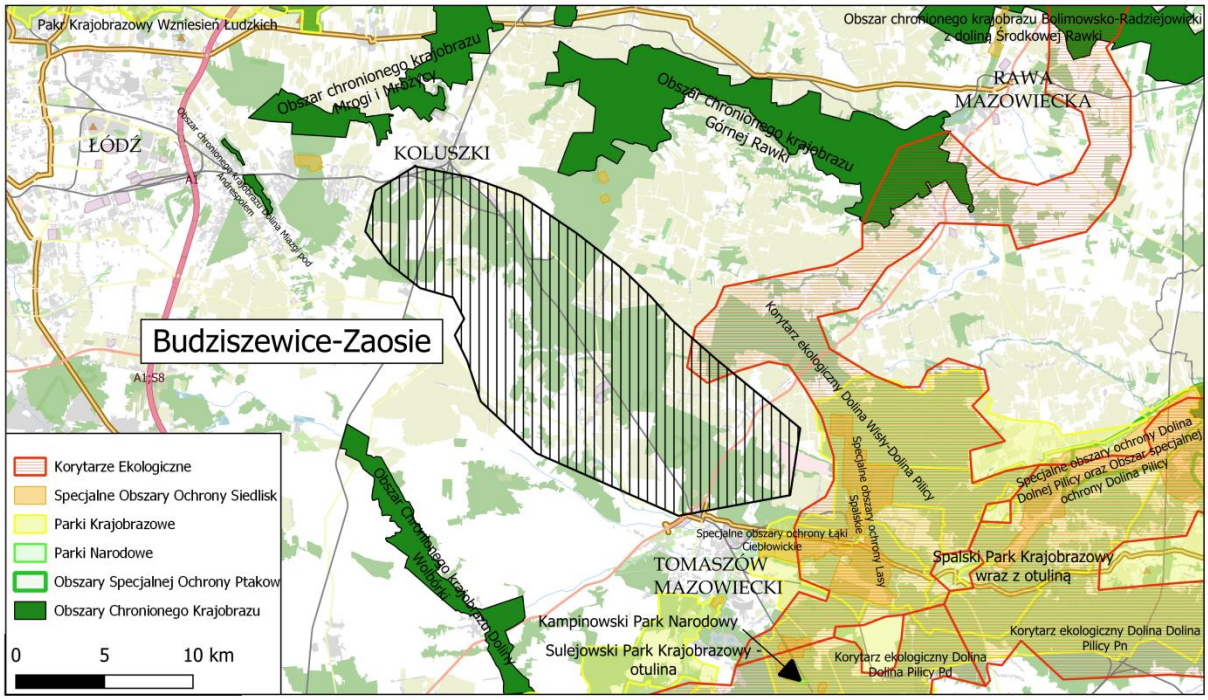


Fig. 7-32 Położenie struktury Budziszewice-Zaosie na podkładzie OpenStreetMap i na tle obszarów ochrony przyrody

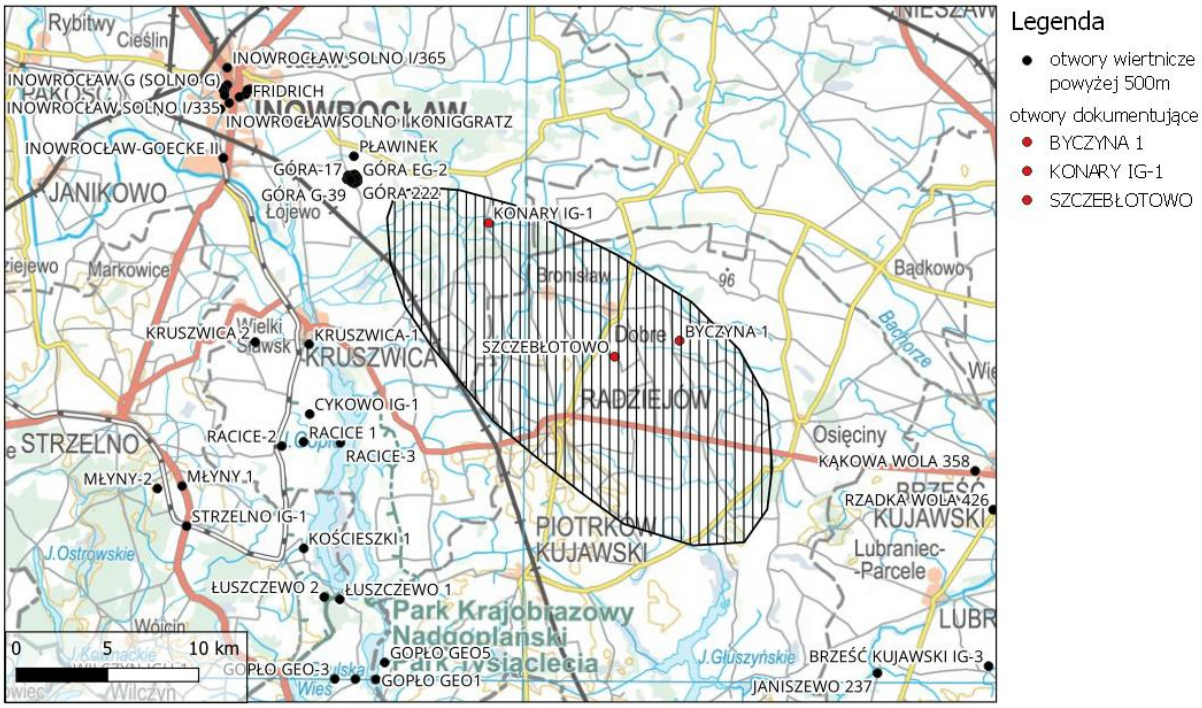


Fig. 7-33 Położenie struktury Konary (na podkładzie geoportal.pl) z wniesionymi otworami nawiercającymi kompleks składowania

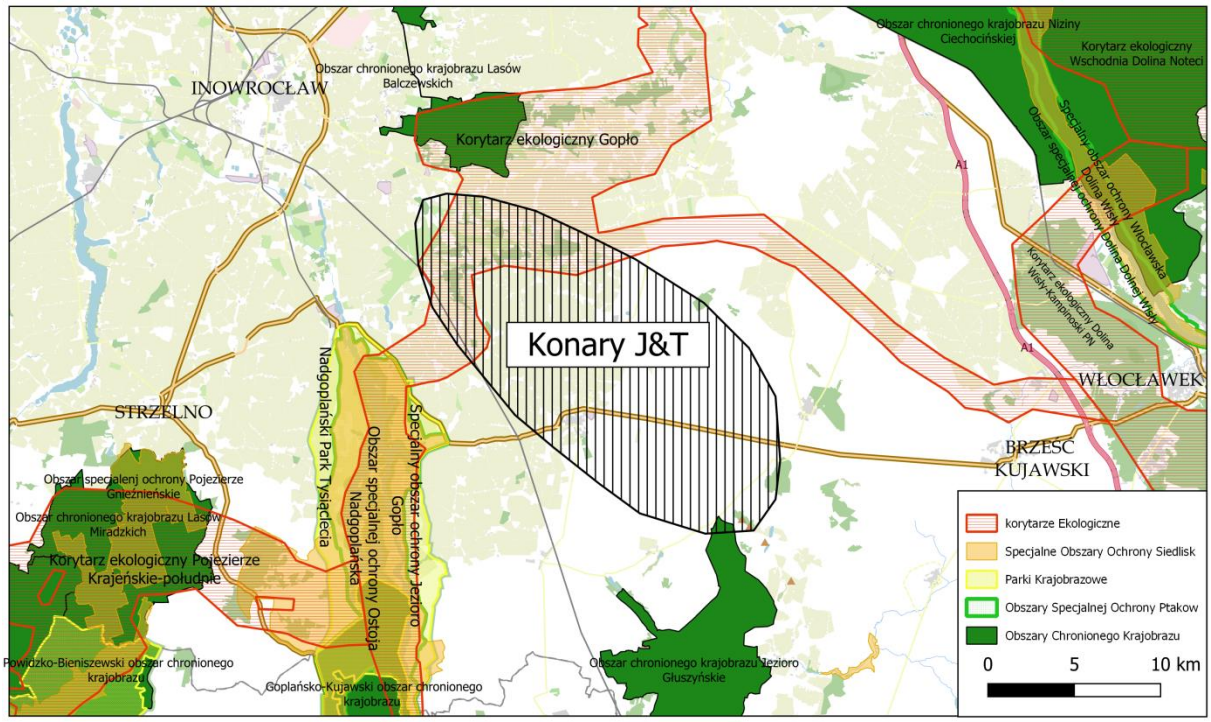


Fig. 7-34 Położenie struktury Konary na podkładzie OpenStreetMap i na tle obszarów ochrony przyrody

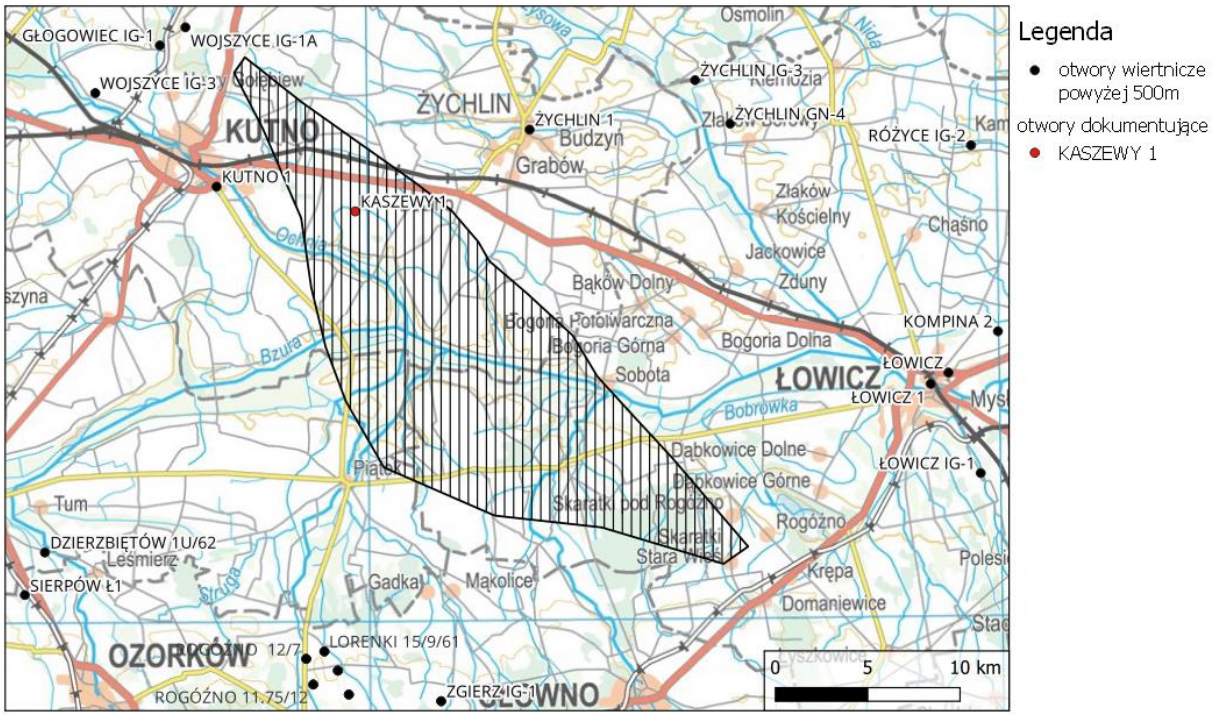


Fig. 7-35 Położenie struktury Wojszyce (na podkładzie geoportal.pl) z wniesionymi otworami nawiercającymi kompleks składowania

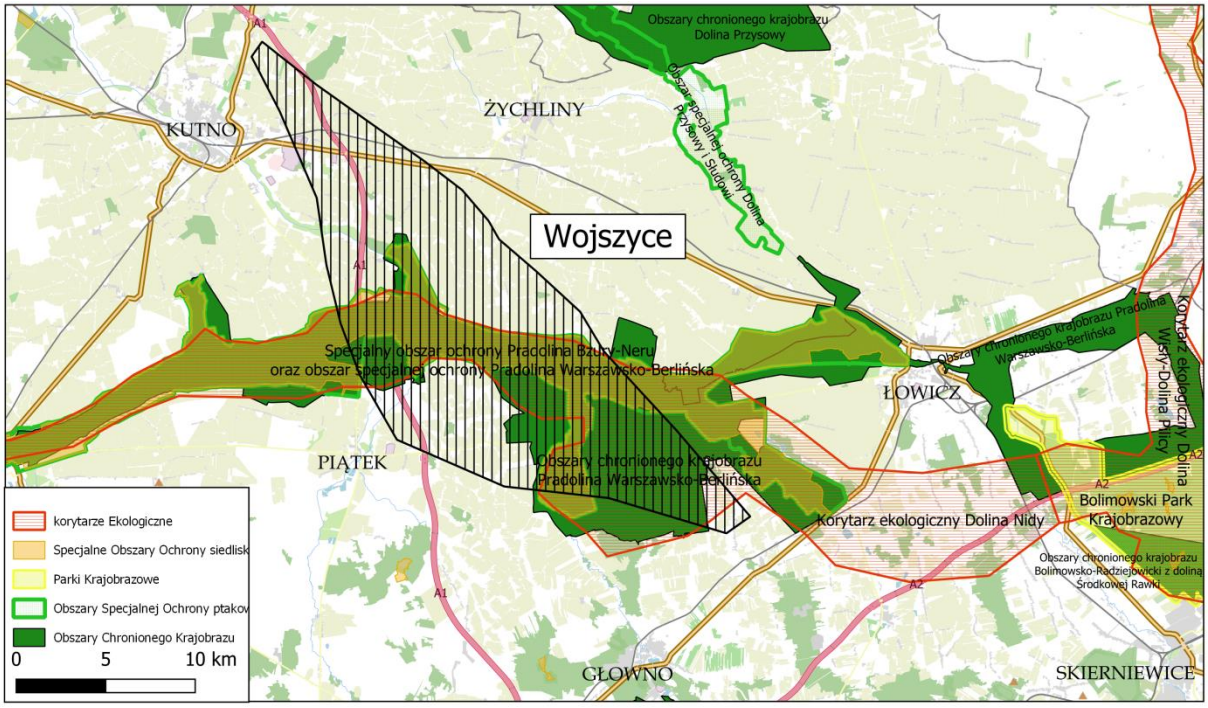


Fig. 7-36 Położenie struktury Wojszyce na podkładzie OpenStreetMap i na tle obszarów ochrony przyrody

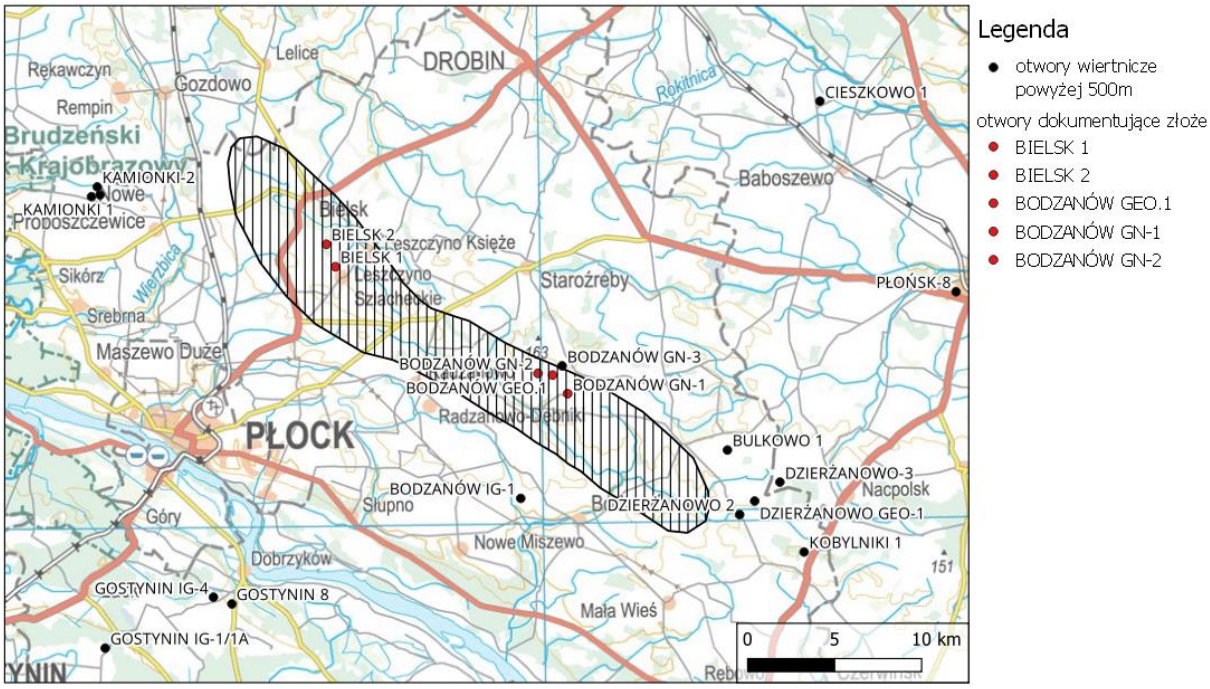


Fig. 7-37 Położenie struktury Bielsk-Bodzanów (na podkładzie geoportal.pl) z wniesionymi otworami nawiercającymi kompleks składowania

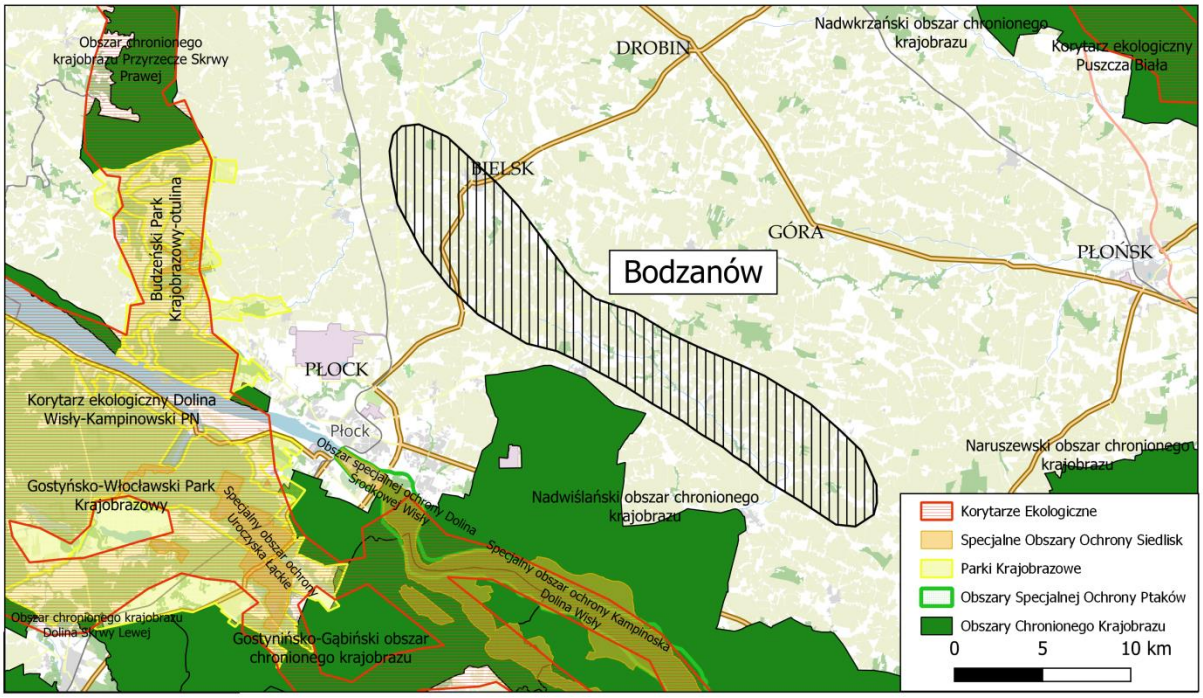


Fig. 7-38 Położenie struktury Bielsk-Bodzanów na podkładzie OpenStreetMap i na tle obszarów ochrony przyrody

7.3 Mapy grawimetryczne i ich interpretacja geologiczna

7.3.1 Dostępne dane grawimetryczne

(Olga Rosowiecka)

Poniżej scharakteryzowano dostępne dane grawimetryczne dla obszarów 4 rozpatrywanych mezozoicznych struktur solankowych (zarysy struktur za Wójcicki i in., 2013), tzn. poszczególne tematy i dokumentacje grawimetryczne, dla których podano takie informacje jak rodzaj pomiarów, zasięgi obszarów gdzie wykonano pomiary grawimetryczne w ramach tych tematów, zagęszczenie punktów pomiarowych, błąd pomiarów oraz czy wyznaczono poprawkę topograficzną (na rzeźbę terenu) dla pomierzonych wartości anomalii siły ciężkości (Fig. 7-39 – Fig. 7-42; Tabela 7-1 – Tabela 7-4). Generalnie im nowsze pomiary grawimetryczne tym są one dokładniejsze, zaś ich zagęszczenie zależy od postawionego zadania geologicznego.

7.3.1.1 Struktura Budziszewice-Zaosie

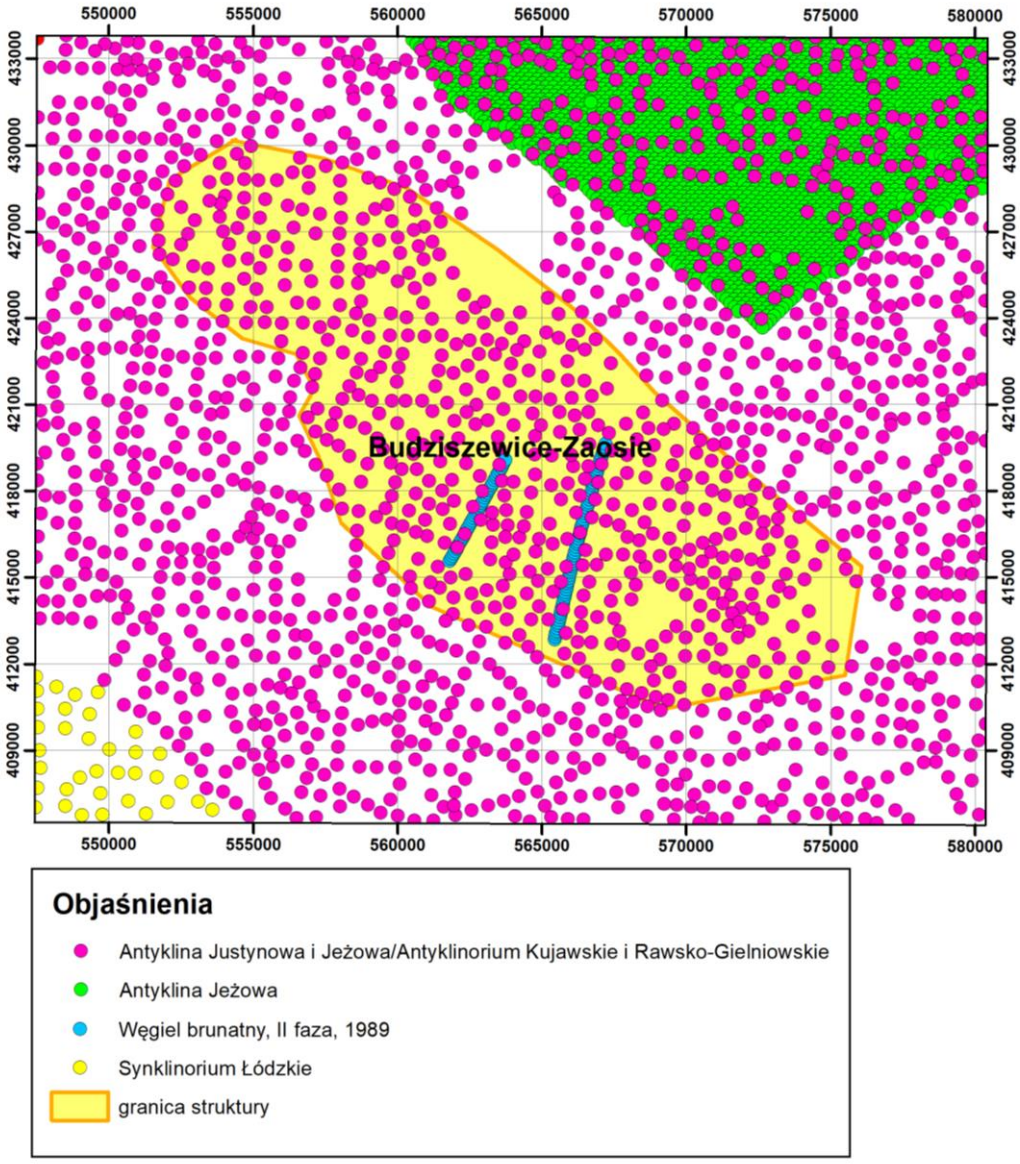


Fig. 7-39 Lokalizacja punktów grawimetrycznych w rejonie struktury Budziszewice-Zaosie

Tabela 7-1 Pomiary grawimetryczne w rejonie struktury Budziszewice-Zaosie

Temat	Dokumentacja	Rodzaj	Zagęszczenie [pkt/km^2]	Liczba profili	Krok na profilach [m]	Błąd pomiarowy [mGal]	Poprawka topograficzna
Antyklina Justynowa i Jeżowa/Antyklinorium Kujawskie i Rawsko-Gielniowskie, 1966-67	Kruk, 1966	Zdjęcie powierzchniowe	ok. 2,0	-	-	0,080	brak
	Kruk, 1967	Zdjęcie powierzchniowe	ok. 2,0	-	-	0,050	brak
Antyklina Jeżowa	Wasiak, 1972	Zdjęcie powierzchniowe	25,9	-	-	0,026	brak
Węgiel brunatny II faza, 1989	Wasiak, 1990	Zdjęcie profilowe	-	58	100	0,021	jest
Synklinorium Łódzkie	Margul, 1971	Zdjęcie powierzchniowe	ok. 2,0	-	-	0,035	brak

7.3.1.2 Struktura Konary

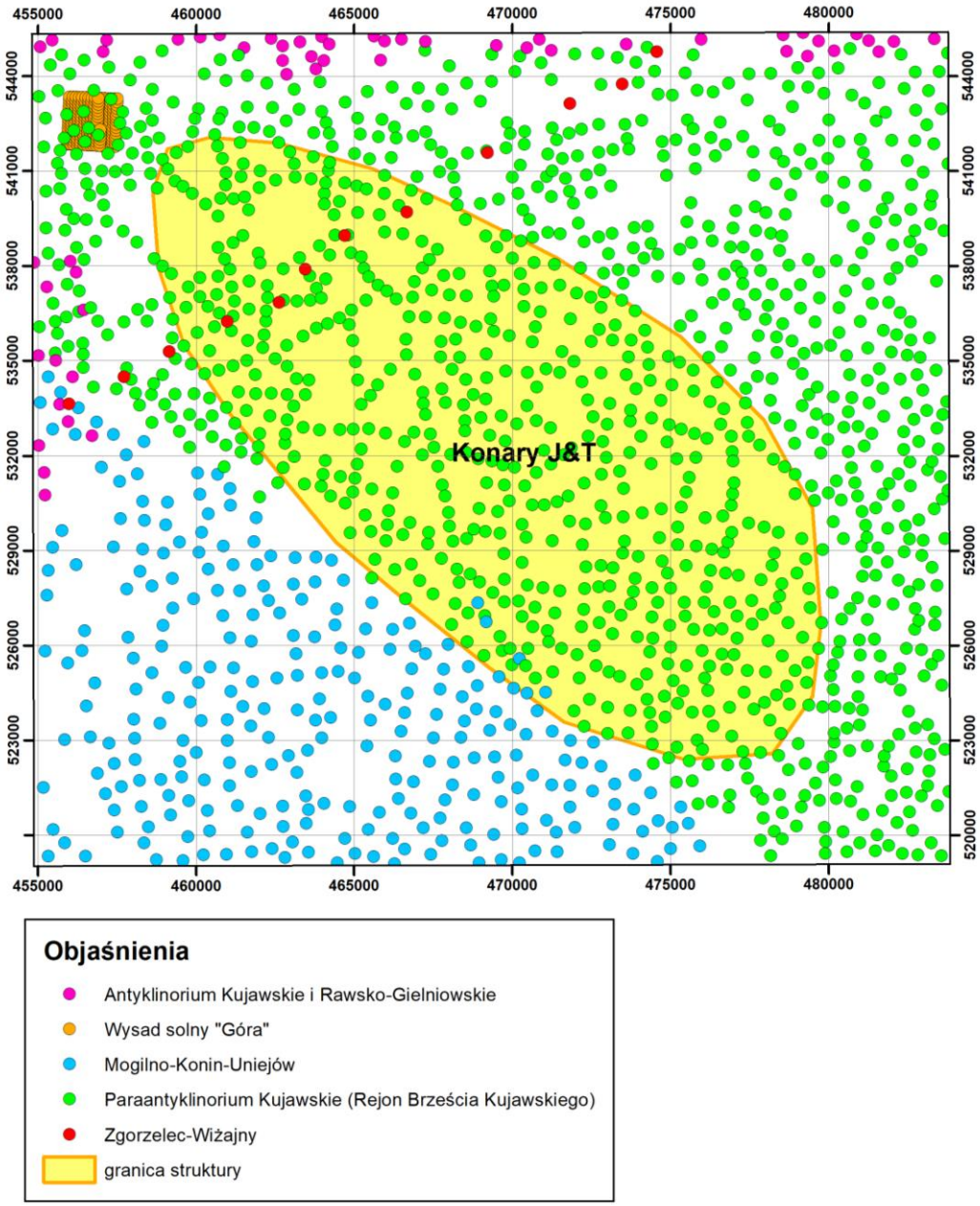


Fig. 7-40 Lokalizacja punktów grawimetrycznych w rejonie struktury Konary

Tabela 7-2 Pomiary grawimetryczne w rejonie struktury Konary

Temat	Dokumentacja	Rodzaj	Zagęszczenie [pkt/km^2]	Liczba profili	Krok na profilach [m]	Błąd pomiarowy [mGal]	Poprawka topograficzna
Antyklinorium Kujawskie i Rawsko – Gielniowskie, 1968	Łyszkowska i Kruk, 1969	Zdjęcie powierzchniowe	ok. 2,5	-	-	0,051	brak
Wysad solny „Góra”, 1992	Musiatewicz i Wojas, 1992	Zdjęcie powierzchniowe	100	-	-	0,013	brak
Mogilno-Konin-Uniejów, 1966	Reczek, 1967	Zdjęcie powierzchniowe	1,5	-	-	0,065	brak
Paraantyklinorium Kujawskie (Rejon Brześcia Kujawskiego), 1965	Bochnia i Duda, 1966	Zdjęcie powierzchniowe	ok. 2,5	-	-	0,054	brak
Zgorzelec – Wiżajny, 2007	Ostrowski i in., 2007	Zdjęcie profilowe	-	1	b.d.	0,016	jest

7.3.1.3 Struktura Wojszyce

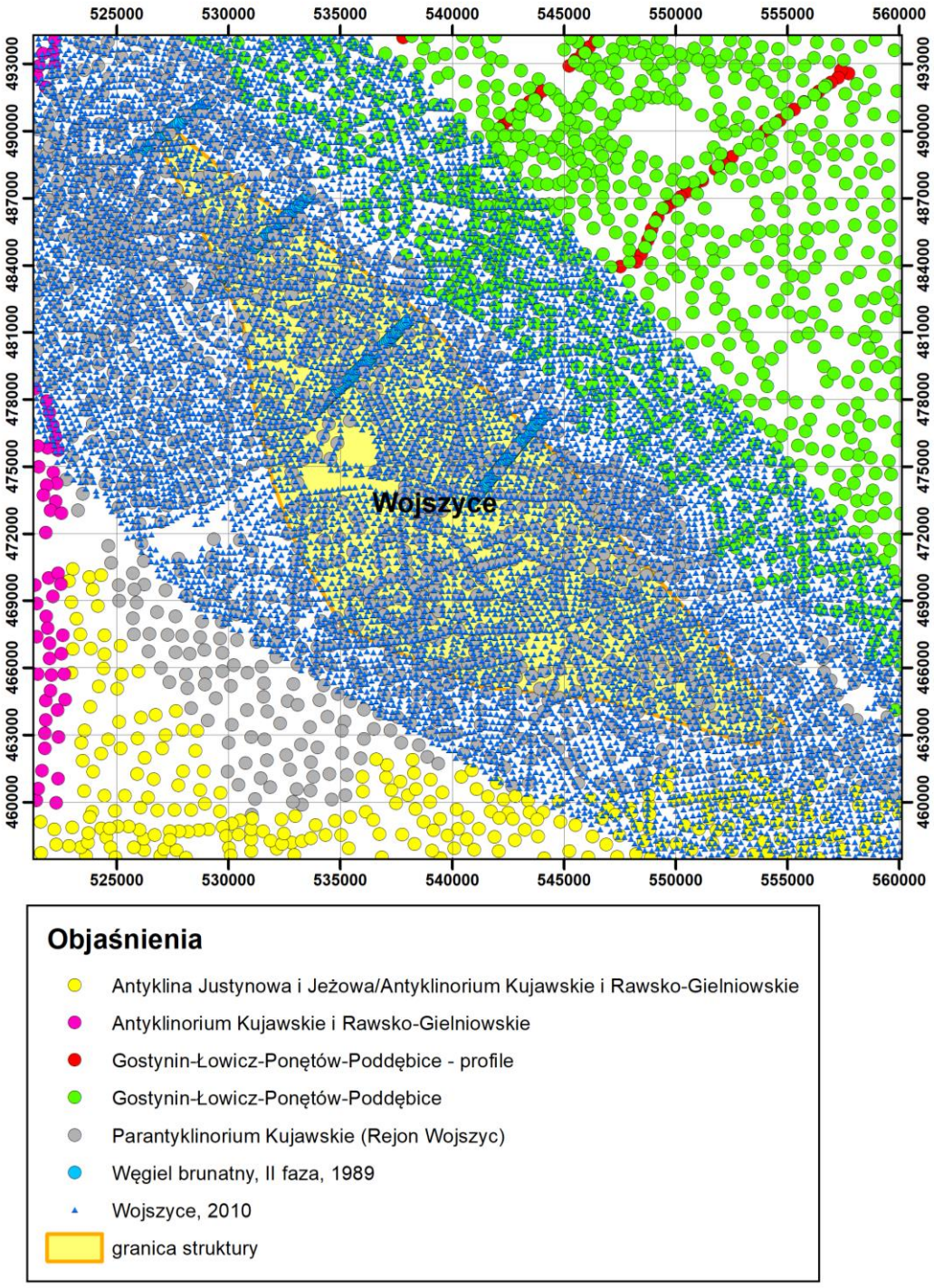


Fig. 7-41 Lokalizacja punktów grawimetrycznych w rejonie struktury Wojszyce

Tabela 7-3 Pomiary grawimetryczne w rejonie struktury Wojszyce

Temat	Dokumentacja	Rodzaj	Zagęszczenie [pkt/km^2]	Liczba profili	Krok na profilach [m]	Błąd pomiarowy [mGal]	Poprawka topograficzna
Antyklina Justynowa i Jeżowa/Antyklinorium Kujawskie i Rawsko-Gielniowskie, 1966-67	Kruk, 1966	Zdjęcie powierzchniowe	ok. 2,0	-	-	0,080	brak
	Kruk, 1967	Zdjęcie powierzchniowe	ok. 2,0	-	-	0,050	brak
Antyklinorium Kujawskie i Rawsko – Gielniowskie, 1968	Łyszkowska i Kruk, 1969	Zdjęcie powierzchniowe	ok. 2,5	-	-	0,051	brak
Gostynin-Łowicz-Ponętów-Poddębice, 1965	Soćko, 1965	Zdjęcie powierzchniowe	ok. 1,5	-	-	0,042	brak
	Soćko, 1966						
	Soćko, 1966	Zdjęcie profilowe	-	6	400	0,040	brak
Paraantyklinorium Kujawskie (Rejon Wojszyc), 1967	Kruk B., 1967a	Zdjęcie powierzchniowe	ok. 2,0	-	-	0,058	brak
Węgiel brunatny II faza, 1989	Wasiak, 1990	Zdjęcie profilowe	-	58	100	0,021	jest
Wojszyce, 2010	Ostrowski i in., 2010	Zdjęcie powierzchniowe	10-12	-	-	0,015	jest

7.3.1.4 Struktura Bielsk-Bodzanów

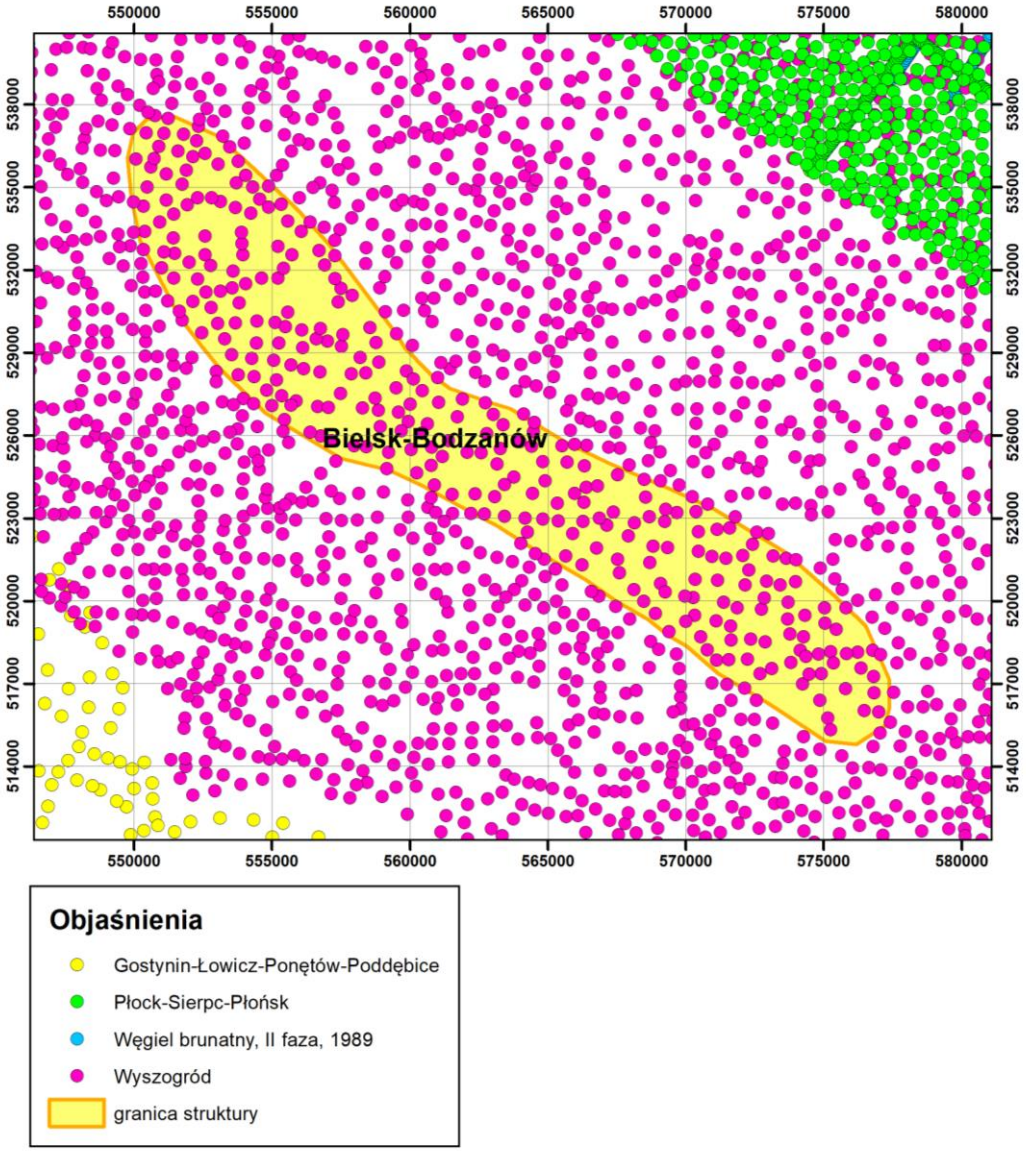


Fig. 7-42 Lokalizacja punktów grawimetrycznych w rejonie struktury Bielsk-Bodzanów

Tabela 7-4 Pomiary grawimetryczne w rejonie struktury Bielsk-Bodzanów

Temat	Dokumentacja	Rodzaj	Zagęszczenie [pkt/km^2]	Liczba profili	Krok na profilach [m]	Błąd pomiarowy [mGal]	Poprawka topograficzna
Gostynin-Łowicz-Ponętów-Poddębice, 1965	Soćko, 1965	Zdjęcie powierzchniowe	ok. 1,5	-	-	0,042	brak
	Soćko, 1966	Zdjęcie powierzchniowe	ok. 1,9	-	-	0,040	brak
Płock-Sierpc-Płońsk, 2011	Targosz i Sada, 2011	Zdjęcie powierzchniowe	4,0	-	-	0,011	jest
Węgiel brunatny II faza, 1989	Wasiak, 1990	Zdjęcie profilowe	-	58	100	0,021	jest
Wyszogród, 1959	Grzywacz J., 1960	Zdjęcie powierzchniowe	2,0	-	-	0,043	brak

7.3.1 Interpretacja transformowanych map grawimetrycznych

(Adam Wójcicki, Zdzisław Petecki)

Pozyskano z NAG/CBDG omówione w rozdziale 7.3.1 dane grawimetryczne w formie katalogów anomalii siły ciężkości w redukcji Bouguera dla gęstości redukcji wynoszącej 2,25 g/cm3. Katalogi te, po scaleniu danych pochodzących z tematów grawimetrycznych dla obszarów poszczególnych struktur posłużyły do sporządzenia gridów anomalii siły ciężkości w redukcji Bouguera, a te następnie zostały poddane transformacjom. Anomalia siły ciężkości w redukcji Bouguera jest superpozycją przyczynków od różniących się gęstością ciał zaburzających w obrębie ośrodka geologicznego, zarówno płytkich, jak i głębokich i bardzo głębokich (Fajklewicz, 2007), czyli jej źródłem jest rozkład gęstości ośrodka geologicznego.

Natomiast zadaniem dla grawimetrii w ramach niniejszego przedsięwzięcia była identyfikacja stref nieciągłości tektonicznych w obrębie górotworu, w praktyce w przedziale głębokości odpowiadającym występowaniu rozpatrywanych dla poszczególnych struktur kompleksów składowania oraz ich bezpośredniego nadkładu (czy też dodatkowych uszczelnień). Innymi słowy chodziło o prześledzenie, w miarę możliwości, takich nieciągłości w obrębie podstawowego uszczelnienia oraz (wyżej występujących) uszczelnień dodatkowych jak również nieciągłości tektonicznych w obrębie całego kompleksu składowania, który w szczególności w przypadku struktur jurajskich może składać z szeregu warstw uszczelniających i kolektorskich (patrz Tabela 5-7). W związku z tym przyjęto orientacyjnie, że interesuje nas przedział głębokości od około 0,5 km do 2 km.

Istnieje szereg metod wydzielania z anomalii siły ciężkości przyczynków pochodzących od płytko (anomalie rezydualne) lub głęboko (anomalie regionalne) występujących ciał zaburzających. Należy nadmienić, że metody te mają charakter jakościowy lub co najwyżej jakościowo-ilościowy, tzn. zależnie od rozkładu mas w ośrodku geologicznym przyporządkowanie anomalii rezydualnych do określonego przedziału głębokości może być co najwyżej przybliżone. Jedną z metod wyznaczania anomalii dla określonego (generalnie dość przybliżonego) przedziału głębokości jest filtracja częstotliwościowa z wykorzystaniem transformaty Fouriera (Fajklewicz, 2007) gdzie parametrem jest długość fali anomalii od ciała zaburzającego, zaś głębokość występowania ciała jest ułamkiem długości fali (z praktyki przyjmowano szacunkowo wartość 1/8). Możliwe jest w takim przypadku stosowanie transformacji anomalii siły ciężkości polegającej na usuwaniu niskich częstotliwości, czyli fal o znacznej długości odpowiadających głęboko występującym ciałom zaburzającym (czyli pozostawianie przyczynków od płycej występujących ciał zaburzających, czyli anomalii rezydualnych), wysokich częstotliwości (pozostają przyczynki od głębiej występujących ciał zaburzających, czyli anomalie regionalne) lub usuwanie wysokich i niskich częstotliwości, a pozostawianie przyczynków od ciał zaburzających w określonym przedziale długości fali, odpowiadającym (generalnie dość przybliżonemu) przedziałowi głębokości. Przyjęto do analiz w niniejszym podrozdziale to ostatnie rozwiązanie, zwane inaczej filtracją pasmową i poddano gridy anomalii siły ciężkości w redukcji Bouguera tej transformacji, wykorzystując oprogramowanie GEOSOFT, otrzymując anomalie rezydualne odpowiadające (hipotetycznie) przedziałowi głębokości 0,5-2 km. Z kolei, aby wyznaczyć strefy nieciągłości tektonicznych zastosowano ponadto kolejną transformację – wyliczono gradient poziomy wspomnianych anomalii rezydualnych. Gradient poziomy jest miarą zmienności rozkładu gęstości ośrodka geologicznego w poziomie

(Fajklewicz, 2007), zaś jego wartości maksymalne mogą być związane z występowaniem kontaktów gęstości, uskoków, wyklinowań warstw oraz zmian facji, z którymi wiążą się zmiany gęstości ośrodka geologicznego. Wyniki przedstawiono poniżej.

7.3.1.1 Struktura Budziszewice-Zaosie

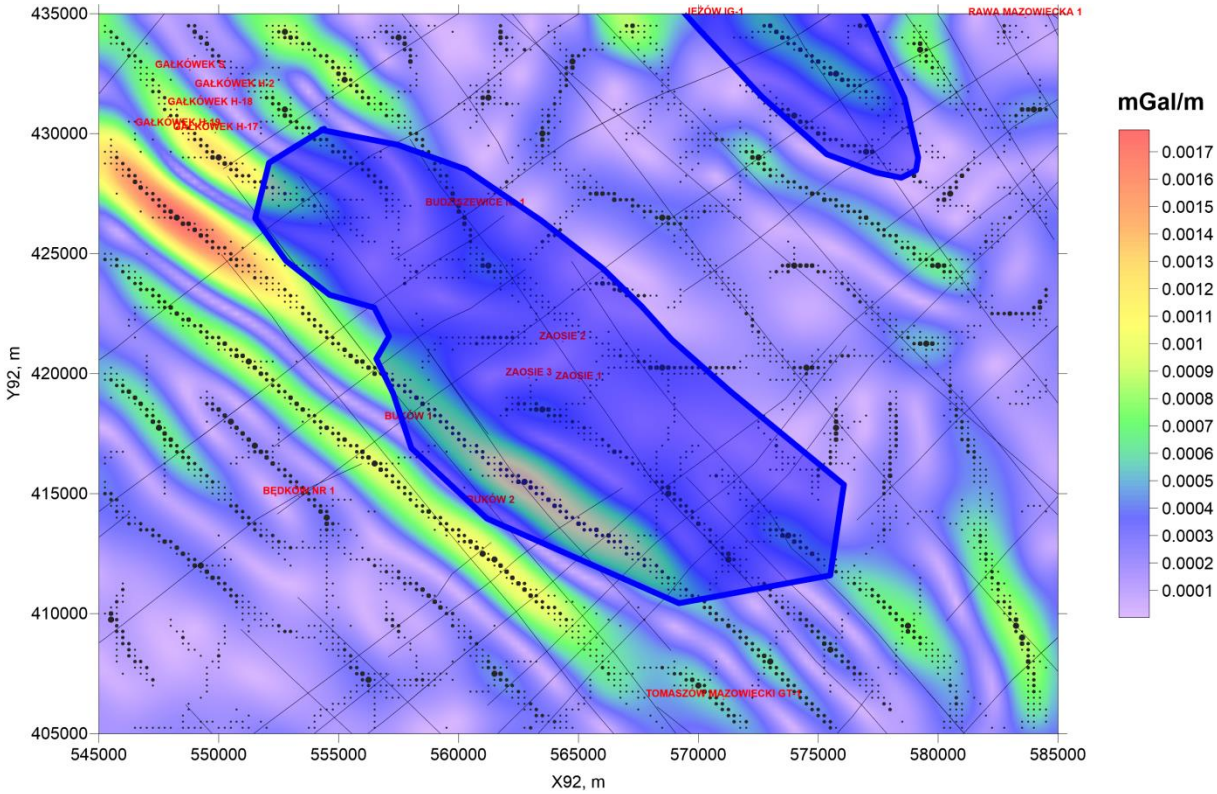


Fig. 7-43 Rozkład wartości i osi gradientu poziomego anomalii rezydualnych siły ciężkości dla długości fali 4-16 km (szacunkowy przedział głębokości 0,5-2 km) w rejonie struktury Budziszewice-Zaosie

Jak wspomniano wyżej jako podstawę do ewentualnej identyfikacji stref nieciągłości tektonicznych w przypadku map grawimetrycznych wybrano dwustopniową transformację, polegającą na wyliczeniu z gridu anomalii siły ciężkości w redukcji Bouguera anomalii rezydualnej odpowiadającej szacunkowo przedziałowi głębokości 0,5-2 km, a następnie wyliczeniu dla anomalii rezydualnych gradientu poziomego.

Na Fig. 7-43 przedstawiono wynik takiej transformacji dla obszaru struktury Budziszewice-Zaosie (wraz z otoczeniem). Na mapie przedstawione są kolorami wartości otrzymanego gradientu pionowego oraz osie, przebiegające tam, gdzie wartości gradientu poziomego osiągają wartości maksymalne i minimalne. Z naszego punktu widzenia interesujące są wartości maksymalne gradientu poziomego (ciepłe kolory, od żółtozielonego do czerwonego), które mogą być związane z występowaniem kontaktów gęstości, uskoków, wyklinowań warstw oraz zmian facji, z którymi wiążą się zmiany gęstości ośrodka geologicznego. W rejonie otworów Buków 1 i Buków 2, na SW skłonie struktury i na WSW od struktury zaznaczają się takie strefy, jednakże nie znajdują one potwierdzenia w interpretacji danych sejsmicznych dla kompleksu składowania w obrębie utworów jury (**rozdział 7.1.1**) natomiast w dokumentacji archiwalnej (Łobaziewicz, 1997) postuluje się tam występowanie uskoków w spągu jury, a więc poniżej rozpatrywanego kompleksu składowania.

7.3.1.2 Struktura Konary

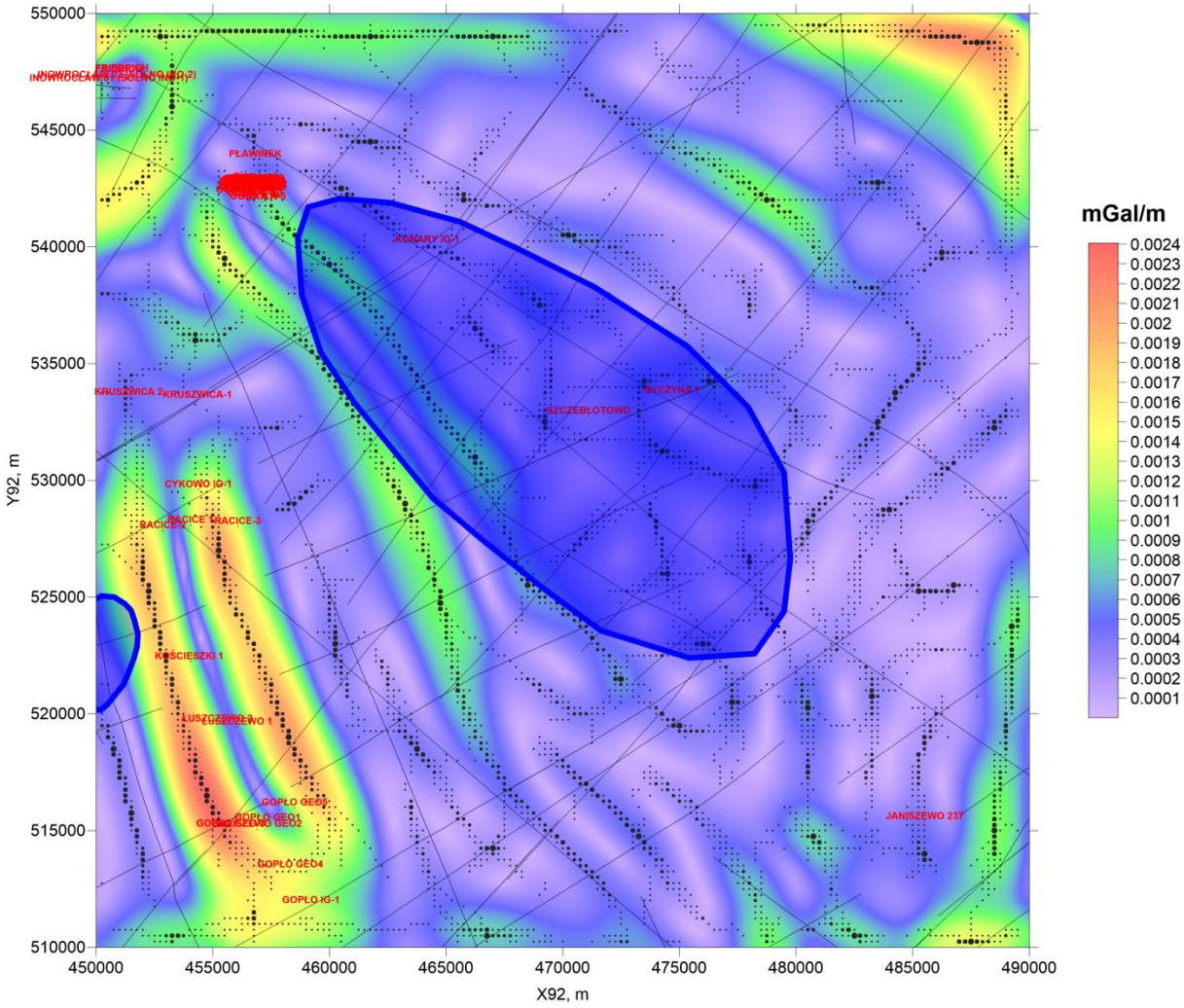


Fig. 7-44 Rozkład wartości i osi gradientu poziomego anomalii rezydualnych siły ciężkości dla długości fali 4-16 km (szacunkowy przedział głębokości 0,5-2 km) w rejonie struktury Konary

Na Fig. 7-44 przedstawiono wartości otrzymanego gradientu poziomego anomalii rezydualnych siły ciężkości (szacunkowy przedział głębokości 0,5-2 km) oraz osie, przebiegające tam, gdzie wartości gradientu poziomego osiągają wartości maksymalne i minimalne dla obszaru struktury Konary (wraz z otoczeniem). Na zachodnim skłonie struktury widoczna jest stosunkowo słabo zaznaczająca się (nieco silniej na NW) strefa maksimum gradientu poziomego, zaś przy zachodnim krańcu struktury kolejna taka strefa, nieco bardziej wyrazista. Strefy te, najprawdopodobniej związane z dolnymi partiami sekwencji utworów jury, nie zostały jednoznacznie stwierdzone jako uskoki w interpretacji danych sejsmicznych dla kompleksu składowania w obrębie utworów jury (rozdział **7.1.2**), natomiast strefa na zachodnim skłonie struktury jest postulowana w archiwalnej interpretacji podane w monografii Tarkowski (red., 2010). Natomiast bardzo silne anomalie zaznaczają się w WSW części obszaru (Fig. 7-44), w rejonie głęboko występującego wysadu solnego Gopło (strop soli na głębokości 2412 m wg Tarkowski i Czapowski, 2018), być może związane są one z tektoniką w obrębie nadkładu mezozoicznego w rejonie wysadu.

7.3.1.3 Struktura Wojszyce

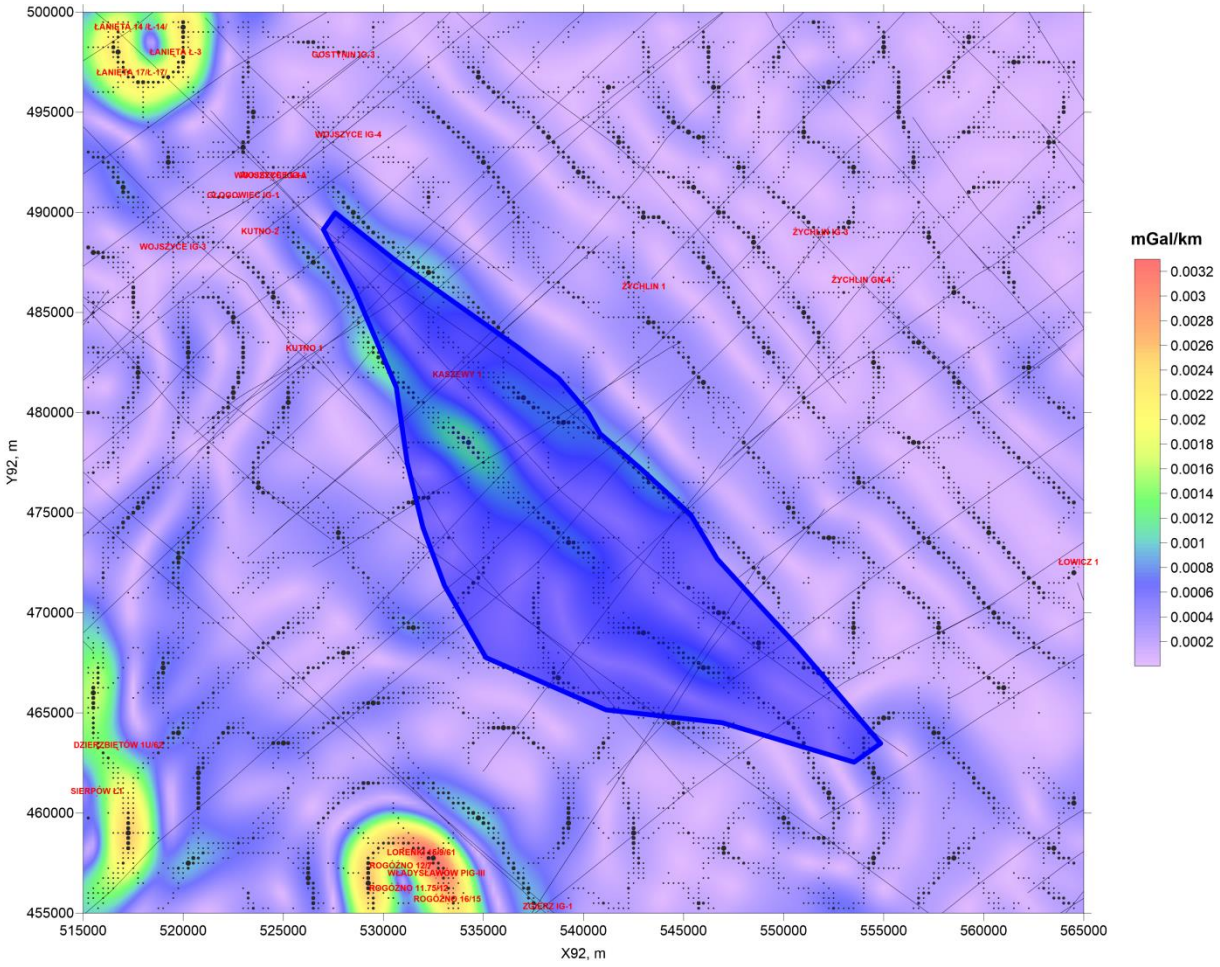


Fig. 7-45 Rozkład wartości i osi gradientu poziomego anomalii rezydualnych siły ciężkości dla długości fali 4-16 km (szacunkowy przedział głębokości 0,5-2 km) w rejonie struktury Wojszyce

Fig. 7-45 przedstawia wartości otrzymanego gradientu poziomego anomalii rezydualnych siły ciężkości (szacunkowy przedział głębokości 0,5-2 km) oraz osie, przebiegające tam, gdzie wartości gradientu poziomego osiągają wartości maksymalne i minimalne dla obszaru struktury Wojszyce (wraz z otoczeniem). W obrębie struktury widoczna jest strefa maksimum gradientu poziomego na SW od otworu Kaszewy 1 (przebiegając w kierunku z NW na SE), oraz równoległa strefa na wschód od tego otworu, na NE skłonie struktury. Mogą to być strefy uskokowe lub zmiany facjalne w obrębie najniższych partii sekwencji utworów jury lub ich bezpośredniego podłoża skutkujące kontrastem gęstości. W południowej części obszaru mapy (Fig. 7-45) zaznacza się bardzo wyraźnie przebijający utwory mezozoiku wysad solny Rogóźno, gdzie serię solną nawiercono na głębokości 321-427 m p.p.t., a czapę wysadu na głębokości 55-329 m p.p.t. (Czapowski i Tarkowski, 2018). Strefy maksimów gradientu poziomego w obrębie struktury Wojszyce najprawdopodobniej związane są z głębszymi partiami sekwencji utworów jury (lub najwyższego triasu) gdyż nie zaznaczają się tak ostro i mają mniejszą amplitudę niż te w rejonie wysadu solnego Rogóźno.

7.3.1.4 Struktura Bielsk-Bodzanów

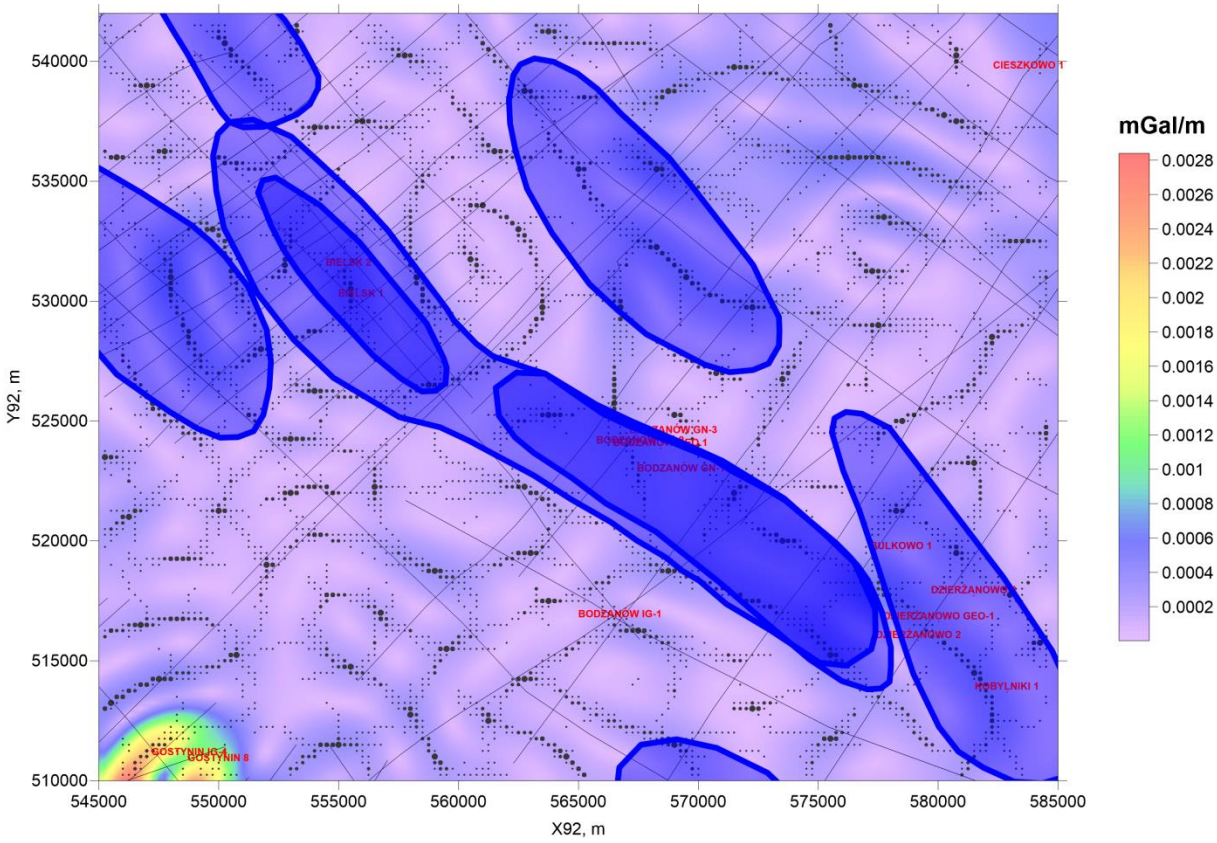


Fig. 7-46 Rozkład wartości i osi gradientu poziomego anomalii rezydualnych siły ciężkości dla długości fali 4-16 km (szacunkowy przedział głębokości 0,5-2 km) w rejonie struktury Bielsk-Bodzanów

Na Fig. 7-46 zobrazowano wartości otrzymanego gradientu poziomego anomalii rezydualnych siły ciężkości (szacunkowy przedział głębokości 0,5-2 km) oraz osie, przebiegające tam gdzie wartości gradientu poziomego osiągają wartości maksymalne i minimalne dla obszaru struktury Bielsk-Bodzanów (wraz z otoczeniem). Na obszarze struktury Bielsk-Bodzanów brak jest wyraźnych maksimów gradientu poziomego, które mogłyby być związane z występowaniem kontaktów gęstości, uskoków, wyklinowań warstw oraz zmian facji, z którymi wiążą się zmiany gęstości ośrodka geologicznego. Oznaczałoby to albo brak takich elementów strukturalnych w utworach kredy i najwyższej jury albo brak znaczących horyzontalnych zmian rozkładu gęstości w obrębie tych kompleksów. Natomiast interpretacja przedstawiona w rozdziale **7.1.3** sugeruje generalnie brak uskoków ponad spągiem kredy, co po części potwierdzałoby wyniki grawimetrii.

7.4 Ewolucja tektoniczna strefy Pabianic[5]

(Marek Jarosiński i Kinga Bobek)

Połączenie wyników analizy struktur tektonicznych z danych otworowych i interpretacji sejsmiki pozwala na odtworzenie ewolucji strukturalnej badanego kompleksu. Wyniki tej analizy posłużyły (między innymi), z kolei, do wersyfikacji interpretacji strukturalnych kompleksu kredowego w strefie Poddębice-Strzelno, przedstawionych w rozdziale **4.3**, są ponadto istotne dla oceny możliwości magazynowania/składowania substancji w obrębie wytypowanych w rozdziale **5** i analizowanych w rozdziale **7** struktur solankowych w utworach jury.

7.4.1 Strefa Pabianic na przekroju sejsmicznym PGI176310

Na podstawie sekcji czasowej z głębokości intersekcji uskoku głównego z otworem oszacowano średnią prędkość fali Vp = 1,88m/s.

Przekrój sejsmiczny (Fig. 7-47) tnie strefę Pabianic poprzecznie w kierunku SW-NE. Głównym elementem strukturalnym jest tu asymetryczny rów tektoniczny. Od NE rów jest ograniczony przez główny uskok (GSU) o biegu NW-SE. Dobrze widoczny refleks od wapienia muszlowego wskazuje, że zrzut na GSU osiąga ok. 180 m. Powyżej, refleksy są mniej czytelne i dopiero w obrębie J1 zrzut tej dyslokacji jako uskoku normalnego można oszacować na kilkanaście metrów. Od strony SW, ten w istocie półrów ograniczony jest przez mniejszą strefę uskoku antytetycznego, na którym zrzuty nie są wyraźnie widoczne, a w interpretacji geologicznej sekcji sejsmicznej nie przekraczają 30 metrów. Z interpretacji strukturalnej profilu wynika, że struktura rowu została zainicjowana w T3 i była aktywna jeszcze w J1. Należy wziąć pod uwagę, że najmłodszy etap jurajskiej subsydencji w rowie, rzędu kilkunastu metrów, mógł być efektem różnicy w kompakcji osadu pomiędzy wypełnieniem rowu i jego otoczeniem. Kompleksy J2, J3 oraz K ponad rowem są nieco wyniesione względem otoczenia. Przy czym wyniesienie to stopniowo zanika w obrębie K2, gdzie jest rozpraszane na większym obszarze, a dodatkowo może być kompensowane synsedymentacyjnie. Wyniesienie to jest najprawdopodobniej efektem delikatnego przefałdowania podczas kompresyjnej inwersji basenu polskiego, która przyczyniła się do częściowej inwersji pierwotnych struktur ekstensyjnych.

Struktura rowu jest podobna do inicjującego wysad Kłodawy, jednak ze względu na mniejszą miąższość soli w obrębie rowu (<400 m), wysad solny tu nie powstał. Na mapie strukturalnej bez utworów kenozoiku widać, że strefa tektoniczna rowu Pabianic kontynuuje się ku NW, gdzie jest ona ugięta sigmoidalnie i trafia w wysad Kłodawy. Jest to, zatem jedna z głównych stref tektonicznych basenu polskiego.

[5] Strefa ta i otwór Pabianice znajdują się pomiędzy strukturami solankowymi Lutomiersk i Tuszyn według opracowania Wójcicki i in. (2013).

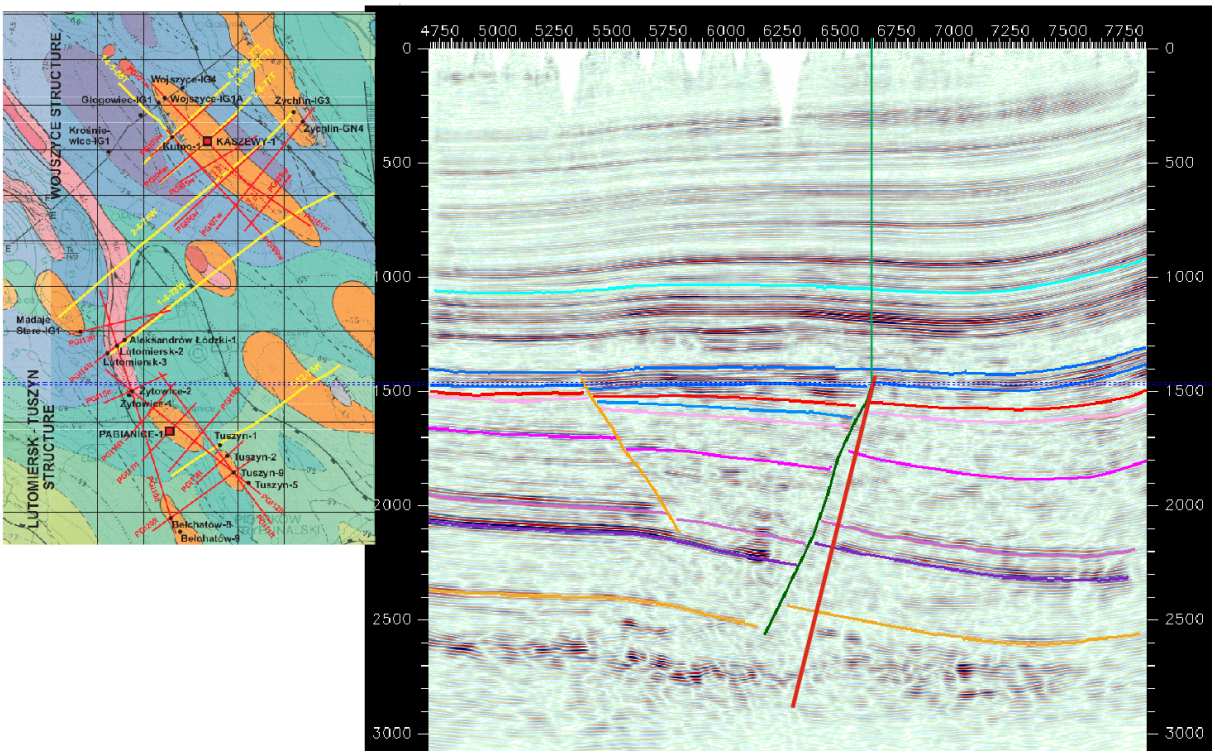


Fig. 7-47 Przekrój sejsmiczny PGI176310 przez strefę Pabianic w miejscu lokalizacji otworu Pabianice-1 (materiały projektu demo CCS PGE Bełchatów) oraz jego lokalizacja na mapie Dadlez i in. (1998)

7.4.2 Interpretacja strukturalna danych otworowych

W profilu otworu Pabianice-1 wyodrębniliśmy główną strefę uskokową (GSU) na głębokości 2770-2778, której drobne odgałęzienie występuje na głębokości 2800 m. Intersekcja otworu z GSU występuje w stropie J1. Duże lustra tektoniczne występujące w sąsiedztwie GSU mają upady w granicach 45-70° w kierunku SW, a ich powierzchnie mają rysy tektoniczne nieco skośne do upadu, lub rzadziej, zgodne z biegiem luster. Sugeruje to, że strefa tektoniczna ma charakterystykę uskoku normalnego i/lub transtensyjnego. Porównanie z profilem sejsmicznym oraz zgodność kierunków upadu GSU i luster przemawia za tym, że jest to najwyższa partia uskoku ograniczającego rów Pabianic od NE. Ponieważ uskok ten wygasa w J1 to rozmiary zrzutu i deformacji w tym przedziale stratygraficznym są niewielkie. W sąsiedztwie GSU znajduje się wyjątkowo dużo niskokątowych luster drobnych nasunięć, które wskazują na wyjątkowo aktywną inwersję tej struktury. Spiętrzenie penetratywnych struktur TF ponad rowem może być powodem antyklinalnego ugięcia kompleksu J2-K2. Znaczy to, że podczas inwersji laramijskiej ten fragment profilu znajdował się poniżej powierzchni neutralnej antykliny.

Dane otworowe (Fig. 7-48 i Fig. 7-49) wskazują, że większość struktur ekstensyjnych znajduje się w skrzydle spągowym GSU. Są to głównie żyły kwarcowe i spękania o upadach typowych dla ścięć grawitacyjnych. Powstanie dużej liczby struktur ekstensyjnych może być spowodowane bliskością GSU, która podczas formowania rowu tektonicznego w okresie od T3 do J1 była najprawdopodobniej uskokiem normalnym lub transtensyjnym. Należy jednak wziąć pod uwagę, że kruche struktury w obrębie J1 mogły powstać dopiero po lityfikacji tego kompleksu na większych głębokościach. Nie można zatem wykluczyć, że są to struktury powstałe dopiero w kredzie. Spękania grawitacyjne występują również ponad GSU, ale już bez wyraźnej mineralizacji. Wskazuje to, że GSU mogła

stanowić barierę rozdzielającą domeny o różnym ciśnieniu porowym - z wyższym ciśnieniem w skrzydle spągowym.



Fig. 7-48 Struktury kompresyjne fazy inwersji basenu polskiego – lustra tektoniczne nasunięć, kwarcowe żyły poziome i stylolity tektoniczne o lineacji poziomej na rdzeniu wiertniczym z otworu Pabianice-1

W przypadku wypełnień żył kwarcowych, do uwolnienia krzemionki z kwarcu detrytycznego potrzebne jest odpowiednie ciśnienie i temperatura. Świadectwem rozpuszczania kwarcu pod ciśnieniem są szwy stylolitowe, z których starszy zespół jest grawitacyjny. Optymalne warunki dla zainicjowania rozpuszczania kwarcu mogły zaistnieć w kompleksach pogrążonych na 2,5-3 km. Z tego powodu przyjąć należy, że powstawanie szwów grawitacyjnych było zjawiskiem diachronicznym. Najgłębiej położone grawitacyjne szwy stylolitowe w obrębie J1 - obecnie na głębokości ok 2840 m, mogły powstać już w koniaku, zaś najpłytsze z J2 – obecnie na głębokości ok. 2200 m – dopiero w kampanie. W każdym przypadku mineralizacja kwarcowa jako najstarsza mogła się zacząć dopiero w K2. Rozpuszczanie kwarcu i jego precypitacja jest warunkiem lityfikacji piaskowców i powstania w nich struktur kruchych. Wynika z tego wniosek, że spękania grawitacyjne, a zwłaszcza żyły i inne struktury zmineralizowane kwarcem są młodsze niż wczesnojurajska aktywność tektoniczna. Zatem struktury ekstensyjne w otworze Pabianice-1 można wiązać z reaktywacją GSU w kredzie. Reaktywacja ta jest na tyle subtelna, że propagowanie się GSU powyżej J1 nie jest widoczne na profilach sejsmicznych 2D. Wydaje się, że część kwarcowych żył stromych (jak również z niewielką domieszką kalcytu) w obrębie skrzydła stropowego GSU może być świadectwem kredowej przesuwczości wzdłuż tej strefy.



Fig. 7-49 Próby rdzenia z głównej strefy uskokowej (GSU) w otworze Pabianice-1 pokazujące rysy tektoniczne skośne do upadu lustra, odchylone warstwy rozcięte drobnymi uskokami transpresyjnymi (?)

Na starsze struktury ekstensyjne nakładają się struktury kompresyjne (Fig. 7-48). W badanym otworze występuje wyjątkowo bogata reprezentacja tektonicznych szwów stylolitowych. Zdecydowana większość stylolitów tektonicznych rozwinęła się w skrzydle stropowym GSU, gdzie ze względu na niższy stopień kompakcji grawitacyjnej panowały bardziej dogodne warunki dla kompakcji tektonicznej niż w skrzydle spągowym. Dodatkową przyczyną mógł być naskórkowy charakter deformacji kompresyjnych. Stylolity tektoniczne są młodsze od grawitacyjnych, co przejawia się m.in w rozwoju slikolitów na szwach grawitacyjnych.

W całym rdzeniowanym profilu otworu również licznie występują niskokątowe lustra nasunięć lub zlustrowane powierzchnie warstw (Fig. 7-49). Większość luster ma rysy w kierunku upadu, a tylko nieliczne mają rysy nieco skośne w tym część luster w sąsiedztwie GSU. Część niskokątowych luster jest zmineralizowanych kwarcem, a niektóre z nich - zwłaszcza w górnej części J2, gdzie występują węglany - również różowego kalcytu. Nie byliśmy w stanie odczytać sekwencji zdarzeń tektonicznych fazy inwersji. tzn. czy starsza była faza transtensji czy kompresji w reżimie TF. Możliwe jest jednak, że reżim TF zatrzasnął strome uskoki i zakończył fazę inwersji. Współczesna aktywność GSU sugeruje jednak, że możliwa była również reaktywacja tej strefy w neogenie.

Szczelność potencjalnych kolektorów J1 pod przykryciem uszczelnień J1 w strefie Pabianic nie ulega wątpliwości.

7.4.3 Współczesna aktywność głównej strefy uskokowej

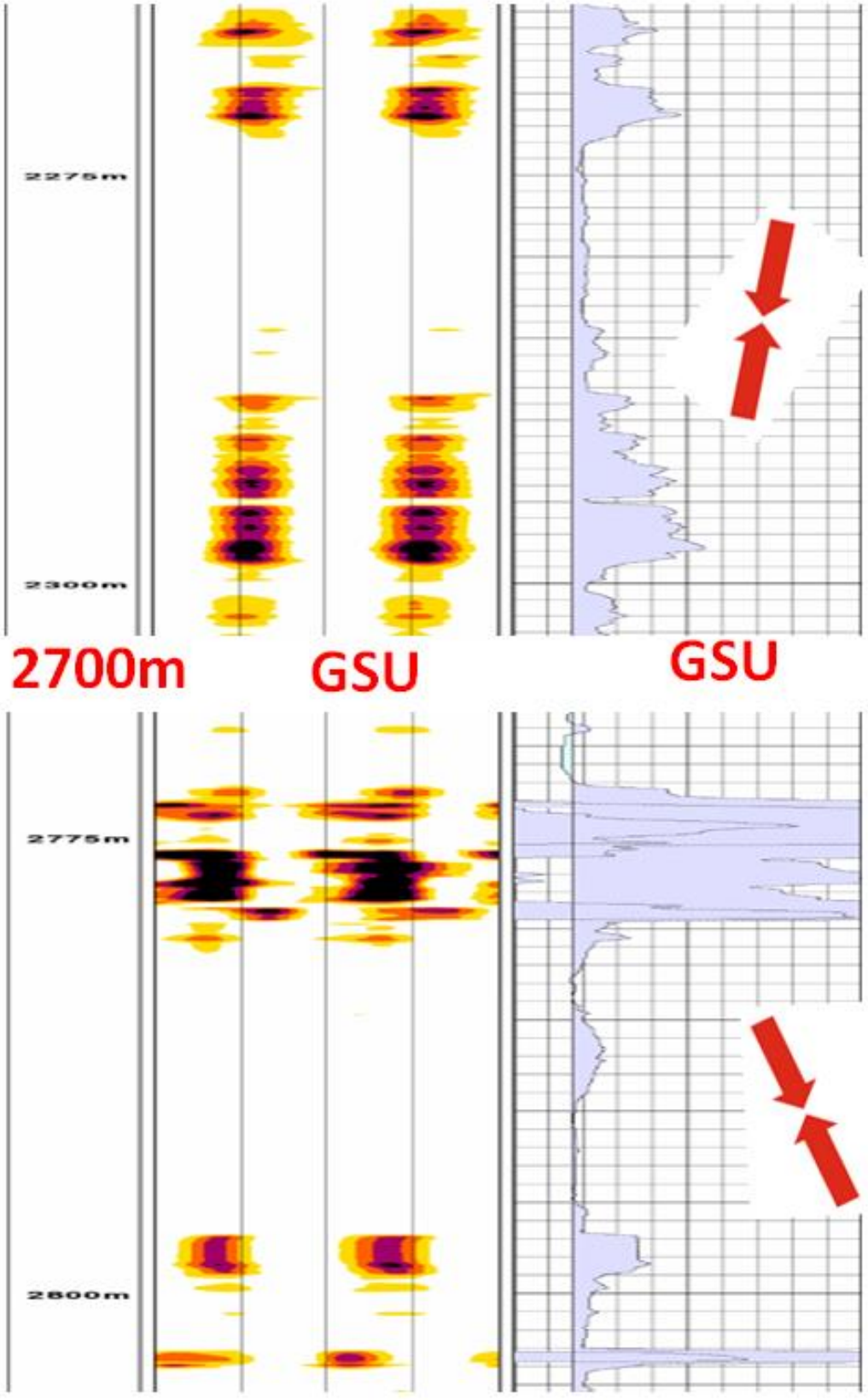


Fig. 7-50 Rotacja kierunków S_{Hmax} pomiędzy skrzydłem stropowym a spągowym GSU

Analiza struktur zniszczeniowych ściany otworu wiertniczego Pabianice-1 wskazuje, że uskok GSU jest aktywny również współcześnie. Jak wskazuje orientacja struktur breakouts (BB), w obrębie skrzydeł tego uskoku kierunki największego współczesnego naprężenia poziomego (S_{Hmax}) są odmienne (Fig. 7-50). W obrębie skrzydła stropowego S_{Hmax} ma orientację NNW-SSE, podczas gdy w skrzydle spągowym orientacja S_{Hmax} zmienia się do NW-SE, czyli w kierunku zgodnym z przebiegiem GSU. Należy podkreślić, że ten kierunek kompresji utrzymuje się aż do spągu otworu, co wskazuje na istotną różnicę odkształceń tektonicznych w poprzek uskoku. Zestawienie z orientacją GSU o biegu NW-SE wskazuje, że naprężenie regionalne o biegu NNW-SSE (lub N-S) może uruchamiać tę strefę w formie uskoku przesuwczego, którego aktywność sprzyja rotacji S_{Hmax}. Rotacja S_{Hmax} w kierunku zgodnym z biegiem uskoku sugeruje, że strefa uskoku jest osłabiona, co z kolei sugeruje transtensyjny mechanizm reaktywacji tej strefy w segmencie struktury Pabianic. Współczesna transtensyjna reaktywacja strefy TTZ była postulowana, na podstawie większego zbioru danych z innych otworów wiertniczych (Jarosiński, 2006).

Przesuwcza aktywność uskoku Pabianic-Kłodawy sugeruje, że również uskoki strefy Poddębic o podobnym biegu - NW-SE, mogą być współcześnie reaktywowane. To może mieć znaczenie dla szczelności antykliny Poddębic analizowanej w rozdziale **4.3** oraz innych struktur mezozoicznych zlokalizowanych na tym kierunku strukturalnym.

W niniejszym rozdziale wykorzystano materiały zawarte w pliku *Profilowania rdzeni Pabianice i Kaszewy.xlsx* (otwór Pabianice-1) zamieszczonym na DVD w katalogu **/Baza danych/Profilowania rdzeni dla analizowanych otworów.**

7.5 Analiza strukturalna i geomechaniczna otworu Kaszewy-1 pod kątem przydatności antykliny Wojszyc do składowania CO_2 (ew. magazynowania innych substancji)

(Marek Jarosiński, Kinga Bobek, Katarzyna Pisaniec)

7.5.1 Cel przeprowadzonych badań

Badania tektoniczne zostały przeprowadzone w celu: (1) dopełnienia interpretacji karotaży wiertniczych poprzez wskazanie charakteru geofizycznie rejestrowanych struktur; (2) wykorzystania ewolucji strukturalnej dla weryfikacji koncepcji budowy struktury Wojszyc; (3) wskazania struktur tektonicznych mogących stanowić dodatkową przestrzeń szczelinową w obrębie kolektora oraz (4) wskazania czy nie stanowią zagrożenia dla rozerwania ciągłości uszczelnień.

7.5.2 Dane i metodyka badań

Przedstawione poniżej wyniki profilowania strukturalnego w otworze Kaszewy-1, który został pobrany z głębokości 1074,2-2050,4 m. oparte są na analizie rdzenia wiertniczego i karotaży wiertniczych w tym głównie skanera mikrooporności owego (XRMI) z interwału głębokości 1053 m do 2000 m. Wykorzystano wyniki profilowania całości rdzenia przeprowadzonego w 2010 r. z udziałem Katarzyny Pisaniec, która obecnie nie pracuje w PIG-PIB. W 2023 r. przeprowadzono fragmentaryczną weryfikację poprzedniej interpretacji na podstawie 20 fragmentów rdzenia o łącznej długości 135 m (przykłady: Fig. 7-51 – Fig. 7-53). Struktury na rdzeniu nie były orientowane bezpośrednio względem stron świata, niemniej analogiczne struktury zarejestrowane sondą XRMI mają precyzyjnie określoną orientację. Wyniki profilowania zestawione zostały w postaci tabeli (Tabela 7-5).

Analiza kierunków współczesnych naprężeń została wykonana na postawie rozpoznanych w obrazie XRMI struktur typu breakout oraz pęknięć ekstensyjnych (DITF – *Drilling Induced Tensile Fractures*).

Profilowanie wielkości współczesnych naprężeń wykonano na postawie danych z dipolowej sondy akustycznej, przeliczając parametry mechaniczne z dowiązaniem do danych laboratoryjnych (20 prób skalnych poddanych procesowi trójosiowego ściskania). Model geomechaniczny 1D wykonano na postawie dopasowywania uzyskanych wyników modelowanych struktur zniszczeniowych do tych widocznych w obrazie XRMI oraz do wielkości gradientów naprężeń uzyskanych w wyniku testów hydraulicznych (*leak-off test*).

7.5.3 Profil strukturalny otworu Kaszewy-1

Otwór Kaszewy-1 przewierca następujący profil stratygraficzny (wg. A. Feldman-Olszewskiej i G. Pieńkowskiego):

- Czwartorzęd 0-17,0 m
- Neogen 17,0-61,0 m
- Jura górna 61,0-428,0 m
- Jura środkowa 428,0-1082,5 m
- Jura dolna 1082,5-1899,5 m

- Trias górny 1899,5-2050,0 m

Otwór jest pionowy, a jego największe odchylenie od pionu na głębokości 1045 m wynosi 3°. Rdzeń został pobrany z interwału głębokości 1050 – 2000 m w sposób ciągły (Posyniak i Rosa, 2010). W całym otworze rdzeń ma średnicę 7,6 cm.

Tabela 7-5 Syntetyczny profil strukturalny w otworze Kaszewy-1 zestawiony na podstawie profilowania rdzenia wiertniczego oraz interpretacji skanera (XRMI). Dla polepszenia czytelności struktur tektonicznych kolorami zaznaczono ewidentne struktury różnych reżimów tektonicznych. Niebieskie – reżim uskoków normalnych; zielone – reżim uskoków przesuwczych; czerwone – reżim nasunięć. Wytłuszczono struktury ewidentne i ważne dla interpretacji. Mineralizację czerwonym kalcytem zaznaczono na pomarańczowo

Głębokość [m]	Opis rdzenia uzupełniony obserwacjami XRMI
1074-1126	w prawie całym interwale obecne spękania seryjne (x37) o upadzie 60-75° i nierównej powierzchni, bez mineralizacji i bez śladów przemieszczenia, zaznaczają się w piaskowcach, zanikają w mułowcach i iłowcach; spękania grawitacyjne. Zazwyczaj ograniczają się do pojedynczych ławic. Prawie wszystkie zapadają na SW a 3 najmniej wyraźne na SE.
1135-1147	spękania seryjne coraz rzadsze; **drobne i nieregularne pęknięcia technologiczne**
1151,8	**lustro tektoniczne poziome** bez rys tektonicznych; spękanie zamknięte, upad 75° na SW
1155,5-1160,8	stylolity grawitacyjne, podkreślone substancją węglistą; spękania w większości otwarte (x3) o upadzie 65-70°, zapadające na SW
1160,8-1179	spękania seryjne (x14) o upadzie 70-80° zapadające na SW; niektóre powierzchnie warstw zlustrowane, a jedna z rysami ślizgowymi sugerującymi przemieszczenie grawitacyjne (przy niskim upadzie); **spękanie o zmiennym upadzie od 60° do poziomu, z żebrami wskazującymi na inicjalne ścięcie grawitacyjne kompensowane na zlustrowanej powierzchni warstwy (Fig. 7-51).** **drobne pęknięcie centralne**
1179-1194	obecne w całym interwale spękania seryjne (x12) o upadzie 70-80° i nierównej powierzchni, zapadają na SW
1200,6	lustro tektoniczne o upadzie 60° z rysami po upadzie; **drobne pęknięcie centralne**
1201-1235	spękania seryjne otwarte (x25) o upadzie 65-80° i nierównej powierzchni (inicjalne ścięcia grawitacyjne, otwierane ekstensyjnie - bez poślizgu), zapadające na SW
1242,65	lustro tektoniczne o upadzie 45°, powierzchnia lustra bez rys ślizgowych – prawdopodobnie o genezie kompakcyjnej
1275,25	liczne lustra tektoniczne (>5) o upadach ok. 30°, zwykle bez mineralizacji, czasem z rekrystalizacją kwarcu - prawdopodobnie grawitacyjne
1275,8	spękanie o upadzie 70° i nierównej powierzchni bez śladów przemieszczenia.
1287,8	lustra tektoniczne (x3) o upadzie 40° bez rys - prawdopodobnie grawitacyjne - piaskowce niezaburzone
1302,8-1306	**Lustra tektoniczne (x2) o upadzie 35° z cieniami mineralizacją kwarcowej wskazującej na reżim NF zapadające na SW;** spękania otwarte (x10) o upadzie 65-70° i nierównej powierzchni, tworzące żyły (x6) grubokrystalicznego kwarcu (1-5mm), wszystkie struktury zapadają na, SW (kwarc może pochodzić ze stylolitów grawitacyjnych w piaskowcach) - żyły otwarte w kierunku przemieszczeń na lustrach

1306,7	Wzdłuż spękania otwartego kawerna zmineralizowana" młodsze HCl+ starsze HCl- (?). To może być ślad tensji kompensowanej na połogich lustrach tektonicznym (powyżej i poniżej) sprzyjającej migracji roztworów z krzemionką, a następnie z węglanami
1308,25	**duże lustro tektoniczne o upadzie 20-30° z rysami skośnymi**, i cienką powłoką mineralizacji kwarcowej,
1317-1319,2	spękania otwarte (x8) o upadzie 70-80° i równe
1326,8-1327,1	żyła o upadzie 65-70°, grubości 1-3 mm, wypełniona kwarcem krystalicznym
1326,6-1339,0	wzdłuż spękania otwartego kawerna zmineralizowana: młodsze HCl+ starsze HCl- (?); seria spękań otwartych (x23) o upadzie 45-70°, o upadzie na SW 3 żyły o upadzie 75-85° wypełnione pomarańczowym kalcytem (HCl++)
1345,0-1346,0	spękania (x4) częściowo rozwarte, o upadzie 70° i nierównej powierzchni bez mineralizacji i śladów przemieszczenia
1349	żyła o upadzie 80°, wypełniona kwarcem krystalicznym zapadająca na SW
1351-1354,8	spękania (x6), w większości otwarte o upadzie 60-70°, zapadające na SW
1369,3-1379,9	spękania seryjne (x26) o upadzie 65-80° i nierównej powierzchni w większości otwarte zapadają na SW i nieliczne na NW (?); żyły (x4) prawie pionowe z mineralizacją kwarcową (HCl-) i jedna z kalcytem pomarańczowym (HCl++)
1385,6	lustro tektoniczne o upadzie 60° z rysami upadowymi i cieniami mineralizacji kwarcowej wskazującymi na reżim NF; spękania(x2) o upadzie 60°, zapadające na SW
1395-1407	spękania (x21), upad zmienny od 35 do 80°, zapadają na S (?). Efekt kompensacji wzdłuż powierzchni warstw (poniżej)
1407	spękania hybrydowe (ekstensyjno-grawitacyjne), o upadzie 80-90°
1416,0-1420,0	**lustra tektoniczne (x3) połogie (5-15°), z rysami upadowymi i cieniami mineralizacji sugerującej reżim NF**
1442,0-1443,2	**lustra tektoniczne (x3) połogie (5-50°), z rysami upadowymi bądź nieco skośnymi cieniami mineralizacji kwarcowej sugerującym reżim NF**
1447,5-1448,2	spękania otwarte (x3) o upadzie 45-70°, zapadające na SW
1460,0-1461,8	spękania (x7) o upadzie 60-79°, zapadające na SW; zlustrowana powierzchnia warstwy
1465,3	lustro tektoniczne ok. 15°, bez mineralizacji i rys ślizgowych
1465,5-1473	spękania (x10) w większości otwarte, o upadzie 55-75°, zapadające na SW, na niektórych powierzchniach wytrącenia syderytu bądź innego min. zaw. Fe
1487,2-1488,0	spękania częściowo zamknięte (x4), o upadzie 32-50° zapadające na SW
1491,0-1522,0	spękania seryjne (x35) , w większości otwarte o upadzie 60-76° zapadające na SW i sporadycznie na S
1525-1529	**lustro tektoniczne o upadzie 60°** i mineralizacją (minerały ilaste blaszkowe)
1527-1537	spękania seryjne (x24), w większości otwarte, o upadzie 55-75° zapadające na SW i sporadycznie na S

1570-1626	spękania seryjne otwarte (x42) otwarte o upadzie 65-80° zapadające na SW (sporadycznie ku S), niektóre z nalotem żelazistym lub ilastym
1626,5-1636	wzrasta zagęszczenie otwartych spękań seryjnych (x19) o upadzie 55-70° i
>1628,5	ślady ługowania, rekrystalizacji, mineralizacja kwarcowa
1642,3-1648,0	spękania seryjne otwarte (x 21), upad 56-70°, zapadające na SW
1659,6-1667,5	**drobne lustra tektoniczne (x5) o upadzie 0-20°, bez rys ślizgowych** – lokalnie drobna smużysta rekrystalizacja kwarcowa – wyglądają analogicznie do tych kompensujących ekstensję; spękania seryjne (x8) w większości otwarte, upad 45-70°, zapadające na SW
1668,5-1674,0	spękania otwarte (x24) o upadzie 38-60°, zapadają na SW (sporadycznie ku S)
1672,5-1676	żyła kwarcowa o upadzie 70° będąca prawdopodobnie świadectwem rozwierania spękań grawitacyjnych z poślizgiem na powierzchniach warstw i połogich luster
1675,8-1676,8	spękania (x5) w większości otwarte o upadzie 30-70°, zapadają na SW, dość wyraźne' mimo zmiennego upadu spękania należą do jednego zespołu genetycznego
1684,5-1696	**średnie lustra (x7) o upadzie 10-30°** i cieniami mineralizacji kwarcowej wskazującymi na reżim NF; żyła otwierająca się w kierunku przemieszczenia na lustrach; spękania w większości otwarte (x11), upad 35-75°, zapadają na SW
1696-1698	**fałd z płynięcia z połogą powierzchnią osiową i warstwami wychylonymi do pionu.** Spływy i podmorskie osuwiska na skłonie basenu, prawdopodobnie inicjowane aktywnością tektoniczną/sejsmiczną
	średnie lustra (x3) o upadach 0-45° z prążkami i cieniami mineralizacji kwarcowej wskazującej na reżim NF i przemieszczenie w kierunku poprzecznym do powierzchni spękań grawitacyjnych, czyli ku SW
1701,5-1703,8	spękania otwarte (x12) o upadzie 50-80° zapadające na SW
1705,2-1709,5	spękania w większości otwarte (x17), o upadzie 45-65° ku SW
1708,3-1709,5	**drobny uskok** z jednej strony rdzenia widoczny niewielki zrzut <0,8cm, z drugiej brak przemieszczenia, upad ok. 70° (może **przesuwczy?**)
1734,3-1747,0	spękania seryjne (x6) o upadzie ok. 70° i nierównej powierzchni bez śladów przemieszczenia; zaznaczają się w piaskowcach, zanikają w mułowcach i iłowcach; spękania grawitacyjne
1747-1774	**brak spękań seryjnych w obrębie grubszego pakietu mułowców i iłowców**
1774-1806	spękania seryjne (x28), w większości zamknięte o upadzie 55-75° zapadające na SW
1838,7-1843,0	spękania x 12, upad 60-70°, zapadają na SW/S, dość wyraźne
1852,3-1897	spękania seryjne (x12) w większości otwarte o upadzie 65-80° zapadające ku SW, niektóre ze śladami mineralizacji kwarcowej
1897-1898	brak struktur tektonicznych, zmienne położenie warstw
TRIAS (retyk) 1898,9-1904,90	**fałdy z płynięcia z upadami zbliżonymi do pionu (w 2 skrzynkach), z uskokami normalnymi, bez luster, o zrzutach 1 cm rozwinięte w słabo konsolidowanych osadach spękania (x7)** (Fig. 7-52); **lustra płaskie (x10) o upadzie 20-50° w obrębie mułowca, nałożone na deformacje z płynięcia; kruche uskoki normalne w tym komplementarne (x7), zrzut do 4 cm, upad ok. 60° - 70° i 80°**
1904,5-1905,5	**znaczne rozmycie ścian otworu prawdopodobnie strefa uskokowa – prawdopodobnie uskoku normalnego**

>1905,5	szybko **maleją upady warstw (od 30° do 2°)** wraz ze wzrostem głębokości
1912-1815	**duże zagęszczenie luster (x20) o upadach < 20°** i gładkich powierzchniach bez rys ślizgowych i bez mineralizacji
1915,0-1917,0	spękania otwarte (x3) o upadach 60-70° zapadające na W
1923,6-1931,5	**duże lustro tektoniczne o upadzie 45° i mineralizacji** (prawdopodobnie markasyt) bez rys i zadziorów; spękania (x9) o upadzie 55-75° zapadające na SW
1934-1938	spękania seryjne (x9) o upadzie 55-75°, zapadające na SW
1941,3-1944,4	**drobne uskoki normalne** (x5), o zrzucie 1-2 cm i upadzie 50-60°; prawdopodobnie na dominującym zespole spękań otwartych (x10) o upadach 45-70°, zapadających na SW
Tu jest zmiana typu osadów (noryk?) 1958,9-1965,8	**2 lustra płaskie na powierzchni warstw z drobnymi rysami.** spękania seryjne (x16) otwarte o upadzie 45-70° zapadające na SW, niekiedy częściowo zmineralizowane (minerały ilaste); **poniżej tej głębokości brak typowych spękań grawitacyjnych bez przemieszczenia a zdarzają się lustra o tej orientacji**
1965,9-1974	**otwarte lustra tektoniczne płaskie (x24) o upadach w granicach 10-30°** z drobnymi rysami po upadzie - tylko w jednym przypadku rysy są skośne do 40° od kierunku zapadania; zamknięte spękania (x 4) o upadzie 30-35°, wzdłuż luster i spękań skała czerwona zmienia kolor na beżowy i pojawia się piryt.
1974-1981,6	spękania seryjne (x18) o upadzie 45-75° i zlustrowanej powierzchni zapadające na SW; żyła pionowa 0,5 mm lustra płaskie (x2) o upadzie 15°
1982,5-1986	lustra tektoniczne na powierzchniach warstw (> x7) o upadzie 0-5° z rysami bez mineralizacji i zadziorów **Drobne pęknięcie CF o wysokości 15 km**
1986-1990	**lustra tektoniczne (x7) o upadzie 10- 45°** równe z rysami upadowymi lub częściej odchylonymi o 20-30° (a niekiedy 120 i 150°) od kierunku zapadania
1990-1996	spękanie o upadzie 20°, szczelina zamknięta z drobną mineralizacją kwarcową spękanie o upadzie 60-70° z żyłą kwarcową; **lustra tektoniczne (x2) pionowe o rysach poziomych oraz lustro o upadzie 45° z rysami skośnymi do 70° od kierunku zapadania;**
1996-1998	**strefa uskokowa z okruchami skał o powierzchniach zlustrowanych, ściana otworu rozmyta**
1998 -2003	**lustra tektoniczne (x3) strome o upadzie 75-89° z rysami poziomymi**; oraz lustra (x3) o upadzie 45° i kierunku zapadania 300° względem zapadania stromych luster przesuwczych, z rysami upadowymi.
2004-2006	**strefa uskokowa z licznymi zlustrowaniami** na powierzchniach o zróżnicowanej orientacji; połogie warstwy iłowców; spękanie o upadzie 50° i mineralizacji kwarcowej
2006 -2010,7	lustra tektoniczne (x11) o upadzie 40-50°, z rysami upadowymi lub odchylonymi o 20° od kierunku zapadania luster, drobna mineralizacja (HCl+) (sugeruje reżim NF)
2010,7-2012	**duże lustra tektoniczne (x3) o upadzie ok. 60° z wyraźnymi rysami upadowymi zadziorami wskazującymi na reżim NF**
2012-2012,5	**strefa uskokowa o długości w profilu 50 cm, z rdzeniem pokruszonym z licznymi lustrami w różnych kierunkach (Fig. 7-53)**

2012-2024	lustra tektoniczne (x9) płaskie o upadach 10-35° z rysami upadowymi brak zadziorów; lustra tektoniczne (x11) płaskie o upadzie 40-65° z rysami upadowymi lub lekko skośnymi pod kątem 155-170° od kierunku zapadania. **Niewyraźne zadziory wskazują na reżim NF**
2024,2	**strefa uskokowa o długości profilu 20 cm**
2024,3-2031,4	Lustra tektoniczne (x6) płaskie, o upadzie 15-30° bez rys lub z rysami upadowymi; **drobne pęknięcie CF**
2031,4	**Strefa uskokowa o długości profilu 30 cm – rdzeń spękany i zlustrowany w różnych kierunkach**
2031,4-2040	połogie lustra tektoniczne (x16) płaskie lub nierówne o upadach 10-35°, z rysami upadowymi (**niekiedy sugerującymi reżim NF)**; **drobne pęknięcia CF (x2)**



Fig. 7-51 Penetratywny zespół spękań grawitacyjnych z połogimi lustrami reżimu uskoków normalnych



Fig. 7-52 Kruche spękania grawitacyjne systemu penetratywnego z kawerną oraz podatne deformacje osuwiska podmorskiego



Fig. 7-53 Lustra tektoniczne głównej strefy uskokowej (GSU)

7.5.4 Interpretacja obserwacji strukturalnych na rdzeniu wiertniczym i w XRMI

7.5.4.1 Położenie warstw

Na głębokości 1080 zachodzi wzrost upadu warstw do 22° co może być świadectwem drobnego ugięcia fleksuralnego. Największe zaburzenia położenia warstw występują w dwóch strefach deformacji nieskonsolidowanego osadu:

Na głębokości 1696 - 1699 m, 200 m ponad spągiem jury występuje fałd z płynięcia, w obrębie którego warstwy są odchylone do pionu. W sąsiedztwie tej strefy występują młodsze deformacje kruche o kinematyce uskoków normalnych wzbudzone prawdopodobnie niejednorodnością teksturalną osadu lub propagowaniem się strefy uskokowej ku górze.

Na głębokości 1899 -1904 na granicy T/J znajduje się większa strefa zaburzeń słabo skonsolidowanego osadu, w obrębie której występują również drobne uskoki. Ten zaburzony kompleks rozcięty jest strefą uskokową o miąższości 1 m profilu otworu oraz lustrami komplementarnych drobnych uskoków normalnych i spękaniami grawitacyjnymi zapadającymi na SW. Poniżej strefy z uskokami, warstwy są odchylone do 30° i na kolejnych 10 metrach profilu powracają do poziomego położenia. Fałd z płynięcia mógł być zainicjowany wzrostem gradientu morfologicznego dna zbiornika ponad strefą uskoku. W otoczeniu tej strefy występują same lustra uskoków normalnych, które zapewne charakteryzują kinematykę głównego uskoku, który z czasem przebił się w obręb strefy zaburzonego osadu.

7.5.4.2 Strefy uskokowe

Na głębokości 1899-1905 występuje 8 drobnych uskoków normalnych i luster tektonicznych o upadach 60-80° i kilkucentymetrowych zrzutach. Sumaryczny zrzut na tych uskokach nie przekracza 0,5 m. Jest to prawdopodobnie przejaw ugięcia fleksuralnego przed zniszczeniem i przemieszczeniem. W najwyższym interwale tej strefy do gł. 1991 m poza deformacjami kruchymi odnotowano również fałdki z płynięcia i deformacje podatne, świadczące o rozpoczęciu przemieszczenia w warunkach synsedymentacyjnych i kontynuacji w warunkach kruchych. Tutaj warstwy są również odchylone nawet do 50°. To może być efekt gięcia inicjalnej fleksury.

Na głębokości 1941-1942 m występują lustra drobnych uskoków normalnych o upadzie 50-60°. Przemieszczenie tu wynosi zaledwie kilka cm. Orientacja luster jest zgodna z orientacją dominującego zespołu ścięć grawitacyjnych.

W obrębie triasu, w przedziale głębokości 1990-2006 otwór przecina strefę uskoku przesuwczego o charakterze kruchym. W obrębie tej strefy występuje 6 stromych luster tektonicznych z rysami poziomymi lub skośnymi. Strefie tej znajdują się dwa interwały pokruszonego rdzenia ze zlustrowanymi powierzchniami, w których ściany otworu są szeroko rozmyte, wskazujące na strefy maksymalnego przemieszczenia na uskokach. Zmienne upady warstw widoczne na rdzeniu wiertniczym mogą być świadectwem przemieszczenia przesuwczego.

Poniżej występują jeszcze 3 drobne strefy uskokowe na głębokościach 2012, 2024 i 2031 m o miąższościach w profilu 0,2-0,5 m, gdzie skała jest pokruszona a powierzchnie okruchów są zlustrowane. Nie znaleźliśmy bezpośrednich dowodów na kinematykę przemieszczenia na tych strefach. W sąsiedztwie tych stref występują wysokokątowe lustra tektoniczne z rysami upadowymi

oraz nieco skośnymi do kierunku zapadania. Dlatego przypuszczać można, że są to odgałęzienia strefy przesuwczej o charakterze tensyjnym i transtensyjnym.

7.5.4.3 Spękania

Charakterystyka ogólna

W otworze stwierdzono spękania o charakterze tensyjnym i ścięciowym bez przemieszczenia (Fig. 7-54), a także spękania ze śladami przemieszczenia w postaci luster tektonicznych bez rys i z rysami ślizgowymi.

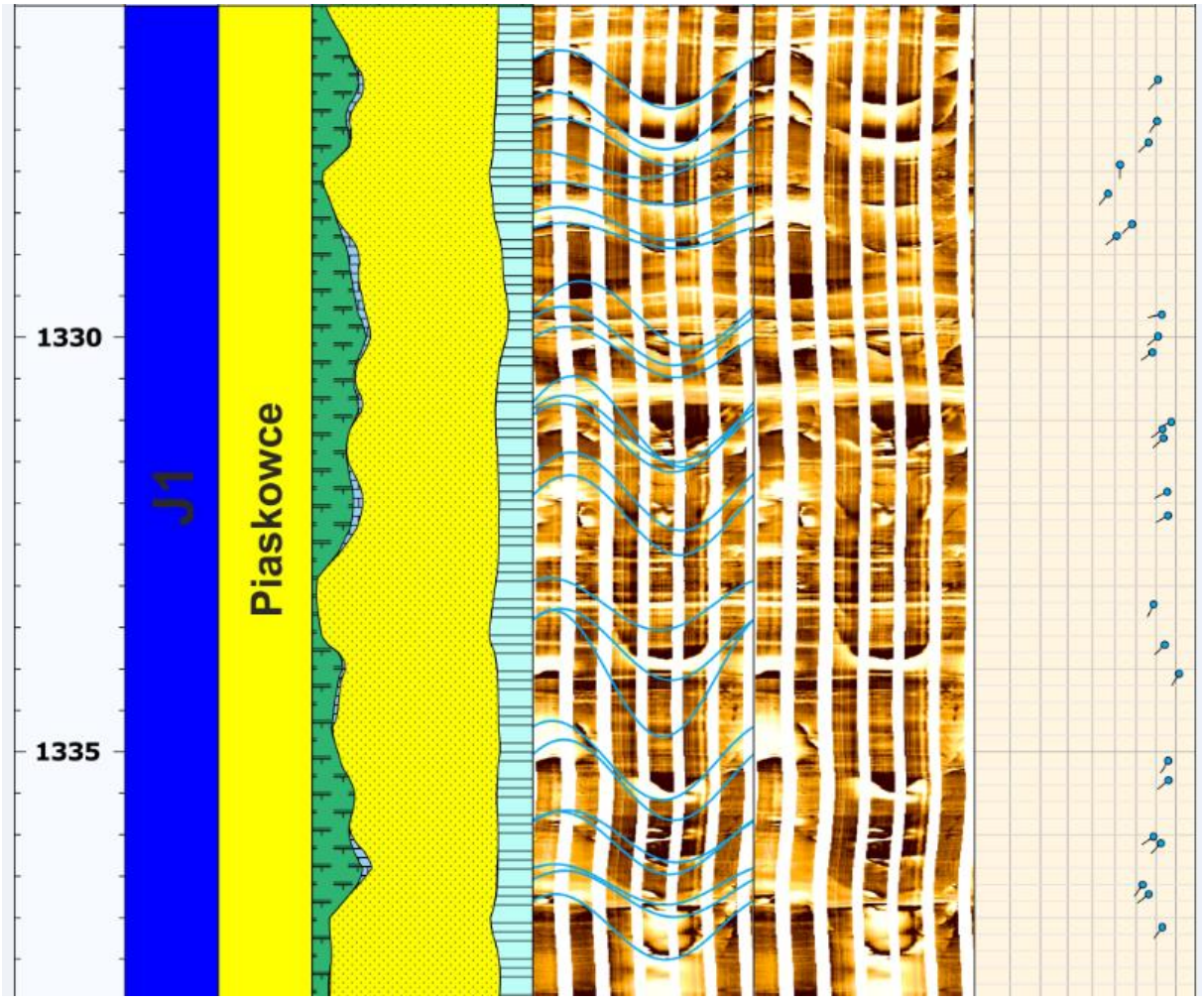


Fig. 7-54 Grawitacyjne spękania penetratywne w zapisie skanera elektooporowego XRMI

Najliczniej występującymi strukturami w profilu otworu Kaszewy-1 są spękania grawitacyjne należące do jednego zespołu kierunkowego. W obrębie poziomu J1 spękania te mają upady pomiędzy 55° - 70° i kierunki zapadania systematycznie ku SW. Rozwijają się zwykle w obrębie piaskowców, a zanikają w mułowcach. Mimo, że mają upady charakterystyczne dla ścięć grawitacyjnych to ich powierzchnie zazwyczaj nie są gładkie i ale równe, co wskazuje, że na większości z nich nie doszło do poślizgu. Można zatem przyjąć, że są to zatem pierwotne ścięcia grawitacyjne bez przemieszczenia. Wśród nich występują również powierzchnie zlustrowane, a nawet z cieniami mineralizacji, co pozwoliło na stwierdzenie kinematyki uskoków normalnych. W sąsiedztwie takich luster w obrębie warstw

mułowcowych często występują spękania o niższych upadach – 40 - 55° oraz lustra tektoniczne o upadach mniejszych od 30°, którym towarzyszą zlustrowane powierzchnie ławic. W kilku miejscach stwierdziliśmy, że spękania o niższym upadzie niż spękania grawitacyjne - włącznie z nisko kątowymi i poślizgami na powierzchniach ławic mają kinematykę uskoków normalnych. W sąsiedztwie interwałów z zagęszczeniem luster tektonicznych, w obrębie piaskowców występują również żyły strome z przewagą wypełnienia kwarcowego. Żyły i cienie kompresji na powierzchniach luster są głównie kwarcowe, lecz spotyka się również młodszą, śladową mineralizację węglanami (dolomitem i kalcytem) - w jednej strefie również pomarańczowym kalcytem. Mineralizacja węglanowa zaznaczyła się zwłaszcza na głębokości 1300 - 1400 m – tam, gdzie występują żyły i kawerny o największej aperturze i ze szczotami mineralizacji.

Można dostrzec prawidłowość, że największa liczba ścięć grawitacyjnych występuje w piaskowcach ponad pakietami mułowcowo-ilastymi, natomiast pod tymi pakietami jest ich zdecydowanie mniej. Sekwencja zmienności litologicznej w powiązaniu ze zmiennością kątów upadu i spójny kierunek zapadania ku SW wskazuje, że wszystkie te struktury należą do jednego zespołu genetycznego. Są to mianowicie naskórkowe ścięcia grawitacyjne, otwierane tensyjnie i kompensowane w obrębie niżej ległych mułowców i iłowców. Ekstensja generująca te spękania ma stały kierunek i zwrot ku SW, spójny z kierunkiem zapadania spękań i poślizgów na lustrach tektonicznych.

W obrębie retyku i najwyższej części noryku grawitacyjne spękania wysokokątowe głównego zespołu zapadającego ku SW występują rzadziej niż w jurze dolnej i mają przeciętnie nieco niższe upady - w granicach 45 - 70°, a ich powierzchnie są bardziej gładkie i częściej zlustrowane. W noryku, w spągowym skrzydle strefy uskoku przesuwczego poniżej głębokości 2000 m spękania te mają jeszcze mniejsze upady - w granicach 40 - 60°. Spadek kąta upadu ścięć grawitacyjnych może być spowodowany spadkiem kąta tarcia wewnętrznego wraz ze zmianą litologii na bardziej drobnoziarnistą oraz wzrostem ciśnienia otaczającego na większej głębokości. Pod większym ciśnieniem okalającym dochodzi wówczas do przemieszczenia i wygładzenia powierzchni luster, na których przeważają rysy upadowe choć w sąsiedztwie uskoku przesuwczego występują również rysy skośne do upadu z przewagą kinematyki NF.

W profilu triasu dużo częściej niż w profilu jury występują spękania niskokątowe o upadach < 40°. Spękania takie są zwykle płaskie i zlustrowane z drobnymi rysami tektonicznymi - przeważnie w kierunku upadu lub nieco skośnymi. Skośność rys sugeruje, że spękania te powstały przed uskokiem przesuwczym. Brak mineralizacji nie pozwala na określenie ich kinematyki. W spągowym skrzydle uskoku przesuwczego spękania te są szczególnie liczne i przeważają nad spękaniami wysokokątowymi. Możliwe są dwa mechanizmy powstania tych niskokątowych spękań: (1) jako poślizgi kompensujące ekstensję grawitacyjną oraz (2) jako efekt kompresji w reżimie TF, być może związany z kompresją poniżej powierzchni neutralnej podczas łagodnego wyboczenia antykliny Wojszyc w trakcie kompresyjnej inwersji basenu polskiego w K2.

Czerwone skały noryku ulegają odbarwieniu do koloru beżowego wzdłuż spękań wysoko- i niskokątowych. To może mieć związek z redukcją związków żelaza płynami migrującymi szczelinami. W miejscach odbarwień stwierdziliśmy m.in. ziarna pirytu. W obrębie triasu nie spotykaliśmy natomiast ewidentnej mineralizacji kalcytem, choć drobna mineralizacja niekiedy lekko burzy z kwasem sugerując domieszkę węglanów.

Gęstość spękań

Na podstawie danych skanera elektrooporowego XRMI wykonaliśmy profil gęstości spękań w obrębie kolektora J1. Profil wykonano na podstawie pełnych sinusoid intersekcyjnych spękań ze ścianą otworu wiertniczego. Ponieważ część spękań wygasa na powierzchniach warstw to można uznać, że gęstość spękań przedstawiona na Fig. 7-55 może być nieco zawyżona, a ich profil nieco rozmyty w relacji do rzeczywistych gęstości. Rozmycie profilu wynika również z zastosowania okna o wysokości 5 m, kroczącego w odstępie 1 m. Profil ten obejmuje spękania o upadach wyższych od 40°, które mogą mieć wpływ na anizotropię szczelinowatości/przepuszczalności kolektora. W tym ujęciu, prawie wszystkie spękania należą do penetratywnego zespołu spękań opisanego na rdzeniu.

Analiza skanera XRMI, podobnie jak obserwacje wykonane na rdzeniu wykazały, że zagęszczenie spękań skorelowane jest z litologią. Jest ich mianowicie najwięcej w piaskowcach i niektórych mułowcach, a są nieliczne lub nie występują w łupkach ilastych. Czytelny zapis XRMI i dostępny rdzeń wiertniczy rozpoczynają się od głębokości 1075 m, czyli nie obejmują najwyższego pakietu piaskowców i mułowców w interwale głębokości 970 – 1070 m.

W przedziale głębokości 1070 – 1220 m spękania występują w klastrach obejmujących ok. 50% długości interwału (Fig. 7-55), w których gęstość spękań wynosi średnio ok 0,84 m^2/m^3. Spękania występują we wszystkich typach litologicznych, a najliczniej w mułowcach, w których wyjątkowo przekraczają gęstość 4 m^2/m^3.

W interwale 1220 – 1300, mimo obecności pakietów piaskowców spękania nie występują.

Największe zagęszczenie spękań występuje w długim interwale 1300 – 1740 m, który w większości składa się z kilku do kilkunastu metrów przewarstwień piaskowców, mułowców i iłowców. Spękania pokrywają tu ok. 70% profilu i najliczniej występują w piaskowcach i mułowcach. Na szczególną uwagę zasługuje ok. 60 m miąższości pakiet piaskowców w stropie tego interwału (1310-1370m), w którym gęstość spękań lokalnie przekracza 4 m^2/m^3, a średnio wynosi 3,2 m^2/m^3. Pozostałe klastry spękań występują w warstwach o mniejszej grubości, lecz powszechnie osiągają w nich podobnie wysokie gęstości 2 – 4 m^2/m^3 ze średnią wynoszącą 2,3 m^2/m^3.

W interwale głębokości 1740 – 1980 m – czyli w skrzydle stropowym dyslokacji przesuwczej, spękania strome występują, lecz są tu znacznie mniej liczne niż w poprzednim interwale. Pakiety ze spękaniami pokrywają tu zaledwie ok. 20% profilu. W grubszych pakietach piaskowca w spągu J1 występują nielicznie. W klastrach ich gęstość osiąga około 1 m^2/m^3, natomiast w bezpośrednim sąsiedztwie uskoku przesuwczego jest ich ponad 2 m^2/m^3. Średnia gęstość spękań w tym interwale wynosi 0,55 m^2/m^3. W skrzydle spągowym tej dyslokacji analogicznych spękań nie stwierdzono.

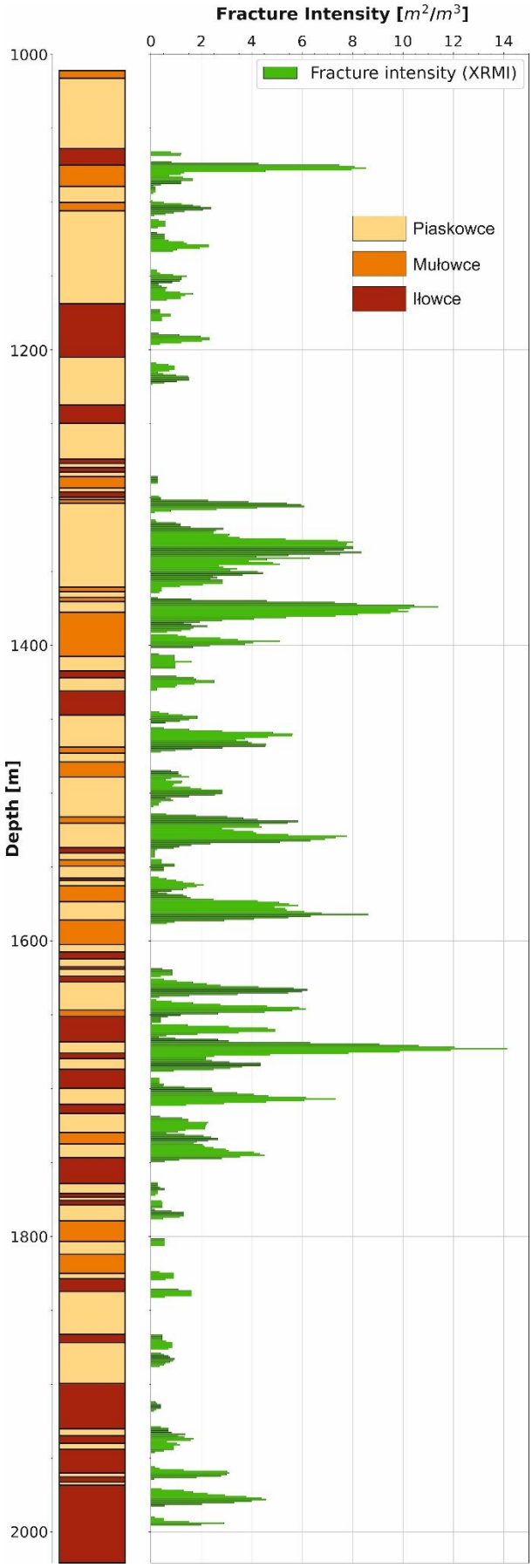


Fig. 7-55 Profil gęstości spękań stromych zespołu penetratywnego

7.5.5 Ewolucja tektoniczna brachyantykliny Wojszyc

7.5.5.1 Ukształtowanie makrostruktury brachyantykliny Wojszyc

Profile sejsmiczne PIG4A6310 (Fig. 7-56), oraz profil T0030677_FX przecinają poprzecznie brachyantyklinę Wojszyc w sąsiedztwie otworu Kaszewy-1 (Fig. 7-57) (interpretacja - materiały projektu demo CCS PGE Bełchatów). Pokazują one, że struktura antyklinalna rozwijała się wieloetapowo, na krawędzi bruzdy śródpolskiej, będącej centrum subsydencji permo-mezozoicznego basenu polskiego. Pierwszy etap aktywności tektonicznej można wyróżnić w pstrym piaskowcu, w którym na SW od osi antykliny powstał uskok normalny o upadzie ku SW, wzdłuż którego dojść mogło do wzrostu miąższości tej jednostki litostratygraficznej o ok. 100 m. w kierunku skrzydła zrzuconego - czyli rowu Krośniewic. Uskok ten mógł być również aktywny podczas sedymentacji młodszych jednostek triasu, jeszcze przed powstaniem antykliny, lecz sumaryczny zrzut w tym okresie nie przekroczył kilkudziesięciu metrów. Ten etap był jednoczesny z powstaniem uskoku inicjującego rozwój „rowu Krośniewic" (i wysadu Kłodawy), w którym obserwuje się wzrost miąższości osadów triasu do ponad 3 km - zdeponowanych przed pierwszym epizodem fałdowania antykliny Wojszyc (Fig. 7-57).

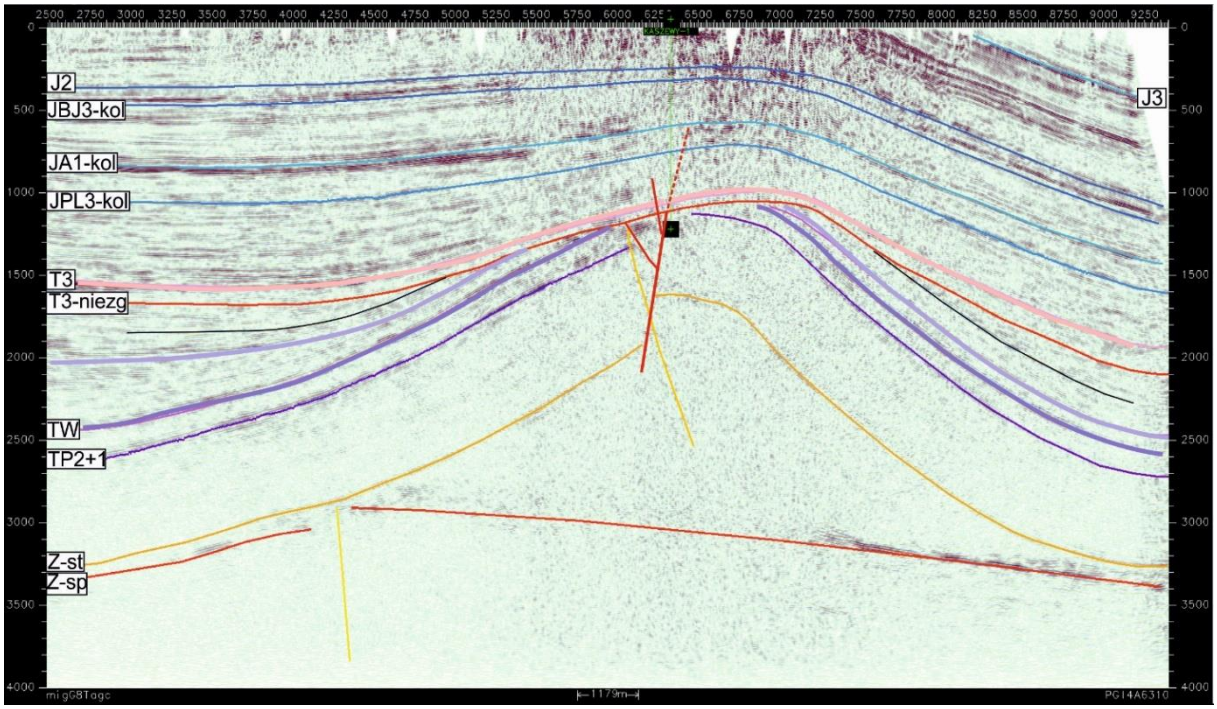


Fig. 7-56 Przekrój sejsmiczny PGI056310 przez strukturę Wojszyc

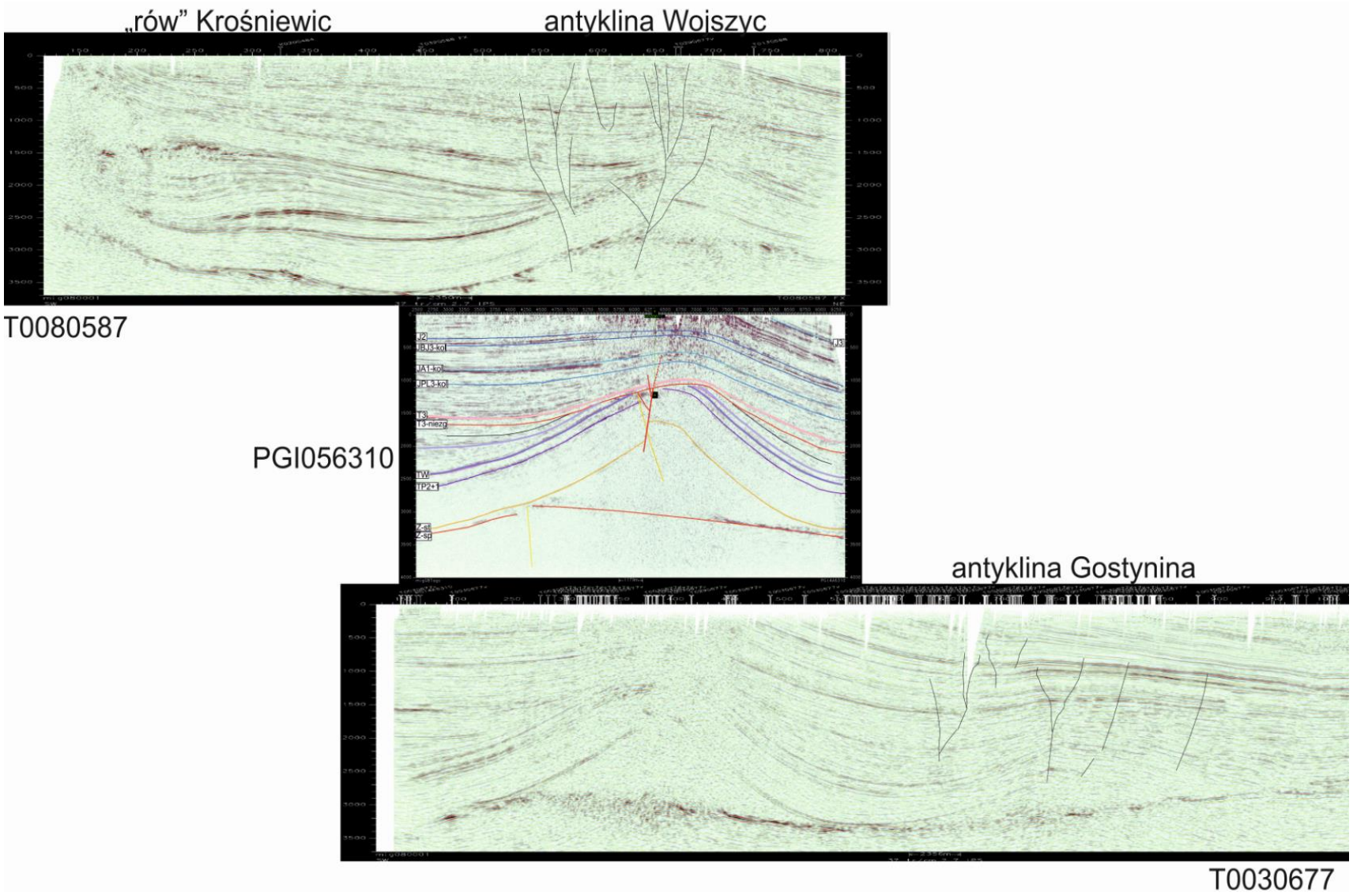


Fig. 7-57 Przekroje sejsmiczne w sąsiedztwie otworu Kaszewy-1, na których przedstawiono uskoki istotne dla interpretacji tektoniki struktury Wojszyc

Powstanie antykliny Wojszyc nastąpiło podczas sedymentacji retyku. Na profilach sejsmicznych obserwujemy zarówno wzrost miąższości w obu skrzydłach antykliny jak i wyklinowania refleksów sejsmicznych w stylu *toplap* w szczycie antykliny, gdzie wyróżnić można powierzchnię niezgodności kątowej. Powierzchnia ta została rozpoznana w otworze Kaszewy-1 na głębokości 1960 m. Po fazie erozji przegubu antykliny, sedymentacja została wznowiona jeszcze w najwyższym retyku. Na profilach sejsmicznych widać względnie stałą miąższość tej pokrywy osadowej, co wskazuje, że po ustaniu fałdowania doszło do wyrównania dna zbiornika sedymentacyjnego. Na podstawie palinspastycznego wyrównania struktury do powierzchni niezgodności kątowej oszacowaliśmy, że wysokość fałdu, od szczytu antykliny do dna synkliny po stronie NE wynosiła wówczas 950 m. Podczas sedymentacji dolnej jury – do pliensbachu włącznie – wzrosła miąższość w obu skrzydłach antykliny. Wzrost miąższości tego kompleksu po NE stronie antykliny osiąga 150 m, podczas gdy po SW stronie - nawet 400 m. Przypuszczamy jednak, że nie jest to efekt kompresyjnego fałdowania, lecz dyferencjalnej kompakcji osadów triasu, o znacznie większej miąższości w synklinach niż w przegubie antykliny. W tym przypadku, różnice w przyrostach miąższości J1 dobrze korelują się z różnicami miąższości triasu po obu stronach antykliny. Wydaje się, że pierwsza faza wyniesienia antykliny w górnym triasie była efektem kompresyjnego fałdowania, które objęło również antyklinę Gostynina - znajdującą się 20 km na NE od antykliny Wojszyc (Fig. 7-57). Antyklina Wojszyc mogła być zainicjowana jako „*marginal fold*" (wg. Jarosiński i in., 2009) w strefie gradientu miąższości wypełnienia basenu polskiego.

Po pliensbachu nastąpiło odtworzenie centrum subsydencji bruzdy śródpolskiej ze skłonem zbiornika pod SW skrzydłem antykliny Wojszyc. W obrębie bruzdy, miąższość osadów młodszych od pliensbachu a starszych od górnej jury jest o 400 m większa niż nad antykliną i w obrębie jej NE skrzydła. Miąższość osadów górnej jury wzrasta jeszcze bardziej w obrębie bruzdy, ale ze względu na ich erozję w kenozoiku, nie można podać dokładnych wartości. W osi antykliny na powierzchnię podkenozoiczną wychodzą wapienie oksfordu. Wapienie te wraz z całą antykliną wyniesione zostały na skutek inwersji basenu polskiego. Wówczas, prawdopodobnie na skutek wielkoskalowego fałdowania skorupy ziemskiej, doszło do wyniesienia wału śródpolskiego, otoczonego z obu stron synklinoriami niecek. W efekcie inwersji basenu, granica wału śródpolskiego znalazła się w przegubie antykliny Wojszyc, a ograniczająca ją od NE synklina stanowi część niecki brzeżnej. Fałdowanie skorupy ziemskiej miało najprawdopodobniej charakter kompresyjny, ale z powodu całkowitego wyciśnięcia soli cechsztyńskiej z rowu Krośniewic do wysadu Kłodawy nie doprowadziło ono do naskórkowego fałdowania kompleksu mezozoicznego struktury Wojszyc. Delikatnemu przefałdowaniu uległa wówczas sąsiednia antyklina Gostynina. Podczas tej fazy inwersji przegub antykliny Wojszyc został wyniesiony o conajmniej 1500 m względem synkliny od strony NE, co stanowi strome lateralne zamknięcie struktury zbiornikowej. Od strony SW zamknięcie struktury jest płytkie ze względu na większe podniesienie tego skrzydła antykliny niż jej przegubu w fazie inwersji basenu.

W obrazie sejsmicznym, w przegubie antykliny Wojszyc interpretowany jest uskok, powstały w pstrym piaskowcu. Na innych sekcjach sejsmicznych widzimy, że uskok ten kontynuuje się w kierunku NW, gdzie jego zrzut jest coraz większy. Przedłużenie tego uskoku ku górze trafia w otwór Kaszewy-1 blisko stropu triasu. Odnotowane w otworze strefy uskokowe mogą stanowić struktury potomne mniejszej skali składające się na strefę uskokową widoczną w sejsmice. Jednak w przegubie antykliny gwałtownie spada jakość obrazowania sejsmicznego, dlatego niemożliwe jest prześledzenie kontynuacji tego uskoku i uskoków potomnych w obrębie jury.

7.5.5.2 Ewolucja strukturalna na podstawie obserwacji otworowych

W badanych skałach wyraźnie przeważa mineralizacja kwarcem, którego źródła można upatrywać w rozpuszczaniu ziaren piaskowca pod ciśnieniem m.in na grawitacyjnych szwach stylolitowych. Na ich podstawie nie można dokładnie określić minimalnej głębokości pogrążenia piaskowca, gdyż sam proces rozpuszczania uwarunkowany może być również chemizmem roztworów, zwłaszcza gdy w grę wchodzić mogą kwasy humusowe (Colón i in., 2004). Jednak większość badaczy utrzymuje, że głównym czynnikiem warunkującym rozwój stylolitów w czystych piaskowcach jest ciśnienie i temperatura. Na intensyfikację procesów rozpuszczania pod ciśnieniem i precypitacji kwarcu wskazuje typowa utrata porowatości piaskowców na głębokości 2-3 km (Giles i in., 2000). Precyzyjne badania petrograficzne dla piaskowców z basenu Morza Północnego wskazały, że stylolity obciążeniowe powstawały przy minimalnej temperaturze pomiędzy 86 a 136 °C, co odpowiadało głębokości pogrążenia na 2,5 - 3 km (Baron i Parnell, 2007). Jeżeli przyjmiemy taką minimalną głębokość pogrążenia dla rozwoju stylolitów w piaskowcach to dla szwów znajdujących się w otworze Kaszewy-1 na głębokości 1100 m przyjąć możemy, że były one pogrążone o co najmniej o 1,5 km głębiej niż współcześnie. Wartość ta jest zbieżna z naszymi szacunkami wyniesienia osi antykliny podczas inwersji laramijskiej basenu polskiego na podstawie interpretacji profili sejsmicznych. Wskazuje to, że grawitacyjne szwy stylolitowe w skałach J1 mogły się rozwinąć podczas maksymalnego pogrążenia piaskowców w kredzie – przed inwersją laramijską. Ich rozwój mógł być źródłem krzemionki dla mineralizacji kwarcowej żył i luster tektonicznych, które powinny się korelować z tą fazą ewolucji basenu.

W tym kontekście rozważać będziemy genezę penetratywnego zespołu ścięć grawitacyjnych w piaskowcach, z których zdecydowana większość jest otwartymi spękaniami wysokokątowymi bez mineralizacji i śladów przemieszczenia. Część z nich uległa wtórnemu przemieszczeniu i na ich powierzchniach obserwuje się cienie mineralizacji kwarcowej, a na niej niekiedy również śladowe ilości młodszej mineralizacji węglanowej. Struktury te wskazują jednoznacznie na kinematykę przemieszczenia w reżimie uskoków normalnych (NF). Stowarzyszone z tymi spękaniami lustra tektoniczne przechodzą płynnie ku dołowi w niskokątowe lustra, również o kinematyce NF. Prawie wszystkie spękania i lustra tektoniczne tego systemu zapadają w jednym kierunku – ku SW. Zatem przyczyną powstania tych penetratywnych spękań musiał być asymetryczny czynnik grawitacyjny. Ponieważ brachyantyklina Wojszyc zlokalizowana była na krawędzi bruzdy śródpolskiej - będącej centrum subsydencji basenu polskiego, to w jej obrębie obserwujemy podwyższony gradient przyrostu miąższości osadów mezozoiku. Wskazuje to na możliwy mechanizm powstawania spękań, którym najprawdopodobniej było pełzanie po nachylonym stoku basenu sedymentacyjnego, którego krawędź stanowił obecny przegub antykliny Wojszyc. Nie dysponujemy danymi dla oszacowania nachylenia stoku, ale można założyć, że wynosiło ono kilka stopni. W jurze zachodziła ciągle wzmożona kompakcja miąższych osadów triasu zdeponowanych w „rowie" Krośniewic, która dodatkowo podwyższała nachylenie skłonu zbiornika. Na tym stoku, blisko spągu jury (obecnie 200 m powyżej granicy T/J) doszło do spływów grawitacyjnych nieskonsolidowanego osadu. W sąsiedztwie powstałych wówczas fałdów z płynięcia występują również kruche uskoki i lustra tektoniczne. Sugeruje to wpływ uskoku na powstanie osuwiska podmorskiego, który mógł powodować wzrost gradientu nachylenia stoku przez ugięcie fleksuralne nad uskokiem. Uskok ten propagował się w obręb osuwiska w postaci wiązki drobniejszych uskoków, dopiero po lityfikacji osuwiska – a zatem najprawdopodobniej w kredzie.

Penetratywny zespół spękań grawitacyjnych wskazuje, że spełzywanie w kierunku centrum basenu zachodziło nie tylko w obrębie nieskonsolidowanego osadu, ale również poprzez poślizgi na powierzchniach ławic i połogich luster w obrębie w pełni skonsolidowanego osadu. Było to tym łatwiejsze, że wraz z głębokością pogrążenia wzrastał upad warstw w kierunku SW. Na podstawie profili sejsmicznych szacujemy, że podczas maksymalnego pogrążenia badanego kompleksu w kredzie, warstwy poniżej triasowej powierzchni niezgodności kątowej były nachylone pod kątem co najmniej 15°, a strop pliensbachu o ok. 6° w kierunku SW. Stwarzało to dogodne warunki dla poślizgów w obrębie iłowców i powstania penetratywnego zespołu asymetrycznych ścięć grawitacyjnych, w górnej części stoku basenu – czyli ponad antykliną Wojszyc i jej SW skrzydłem. Spękania te mogły powstawać sukcesywnie podczas sedymentacji wyższych partii kompleksu jurajsko - kredowego, gdyż lokalizacja stoku dna basenu była w tym czasie stabilna.

Spękania te powstają głównie w obrębie piaskowców i mułowców, a w skałach ilastych zastępują je niskokątowe lustra tektoniczne oraz zlustrowane powierzchnie ławic. Jest to, naszym zdaniem, świadectwo kompensacji naskórkowej ekstensji grawitacyjnej w górnej części stoku basenu poprzez poślizgi na strukturach połogich. Wyróżniliśmy strefy z bardziej intensywnymi deformacjami grawitacyjnymi, w obrębie których występują żyły kwarcowe i lustra z cieniami mineralizacji wskazującymi na kinematykę uskoków normalnych. Jesteśmy zdania, że są to miejsca kompensacji przemieszczeń na głównej strefie uskokowej przebijającej się z kompleksu triasowego w obręb jury. Krzemionka nie impregnuje większości otwartych spękań zespołu penetratywnego, a jedynie te w strefach podwyższonych deformacji, co świadczy o tym, że pochodziła ona z rozpuszczania detrytycznego kwarcu, i że reaktywacja uskoków zachodziła w kredzie, kiedy badany kompleks znajdował się na głębokości umożliwiającej rozpuszczanie detrytycznego kwarcu pod ciśnieniem. W tym czasie musiała nastąpić ponowna reaktywacja strefy uskokowej widocznej na sejsmice i propagującej się ku górze w postaci rozproszonych niższej rangi stref uskokowych i luster tektonicznych. Lustra tektoniczne na głębokości ok. 2000 m - w obrębie noryku, wskazują, że uskok główny mógł być wówczas reaktywowany jako przesuwczy. Asocjacja stowarzyszonych z nim luster o rysach skośnych i upadowych wskazuje na kinematykę transtensyjną. Reaktywacji strefy uskokowej w kredzie towarzyszyła autigeniczna mineralizacja kwarcowa oraz młodsza, śladowa mineralizacja węglanami.

Ważną kwestią jest źródło węglanów, gdyż badany kompleks był izolowany zarówno od wapieni środkowego triasu jak i górnej jury grubymi kompleksami łupków ilastych. Nie dysponując dowodami geochemicznymi przyjąć można, że podczas inwersji basenu polskiego dojść mogło do połączenia hydraulicznego kolektorów J1 z węglanami J3 strefą uskoku transtensyjnego. Zwłaszcza, że w jej obrębie obserwowaliśmy również otwarte kawerny z mineralizacją pomarańczowego kalcytu. Stwierdziliśmy również, że w obrębie triasu roztwory siarczkowe redukują związki żelaza, oraz, że lokalnie krystalizuje piryt. Źródła tych roztworów jak również mineralizacji kalcytowej powinny być przedmiotem osobnych badań.

Charakterystyczny jest brak w profilu otworu typowych struktur intensywnych deformacji kompresyjnych, takich jak szwy stylolitowe z lineacją poziomą oraz niskokątowe lustra nasunięć. Ponieważ interpretacja sejmiki wskazuje, że antyklina Wojszyc powstała jako struktura kompresyjna na pograniczu noryku i retyku i była reaktywowana podczas kompresyjnej fazy inwersji basenu polskiego - w późnej kredzie, to można by się spodziewać wystąpienia struktur kompresyjnych. Struktury kompresyjne poprzedzające pierwszą fazę fałdowania w triasie mogły się nie wykształcić

ze względu na niski stopień konsolidacji płytko pogrążonych osadów noryku. W obrębie noryku stwierdziliśmy największe zagęszczenie niskokątowych spękań w postaci płaskich luster tektonicznych. Spękania te mogły powstać jako struktury kompresyjne, w triasie lub kredzie, ale z braku odpowiednich wskaźników kinematycznych na ich powierzchniach, nie możemy zweryfikować tego przypuszczenia.

7.5.6 Model geomechaniczny 1D otworu Kaszewy-1

Dla otworu Kaszewy-1 w interwale rdzeniowania (1050 – 2050 m) wykonaliśmy model geomechaniczny obejmujący kierunki i wielkości współczesnych naprężeń tektonicznych. W analizach tych wykorzystaliśmy obserwowane struktury zniszczeniowe ścian otworów wiertniczych rejestrowane przez skaner elektrooporowy (XRMI; Fig. 7-58). Należą do nich kompresyjne zniszczenia ścian otworów – *breakouts* (BB), tworzące wgłębienia w ścianie otworu oraz tensyjne pęknięcia ściany otworu indukowane ciśnieniem płuczki (DITF). Wspólną cechą tych struktur jest symetryczne występowanie po obu stronach ściany otworu. W analizach wykorzystaliśmy również spękania tektoniczne otwierane ciśnieniem płuczki (DENF). Lokalizacja tych struktur w profilu otworu przedstawiona jest na Fig. 7-58.

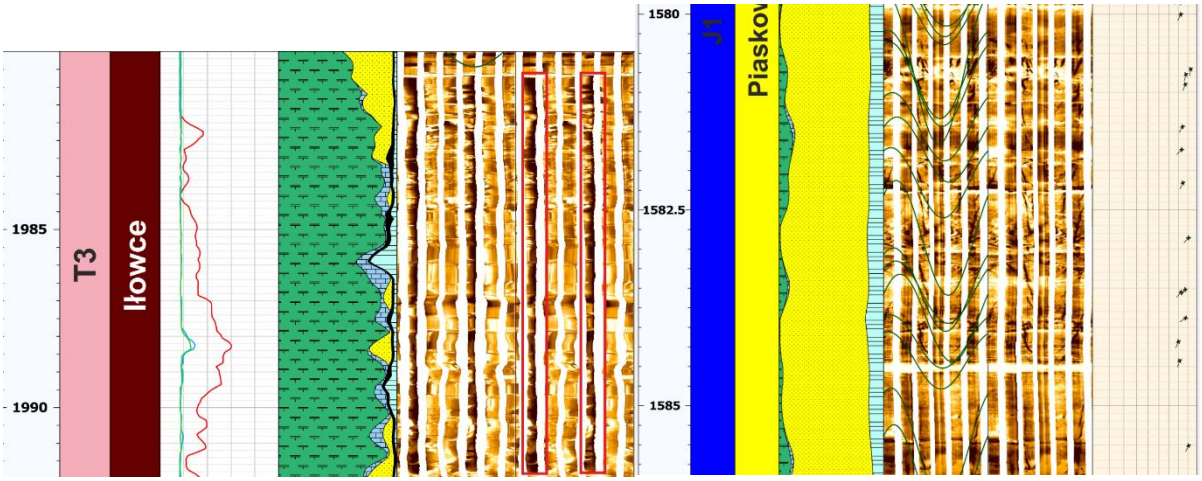


Fig. 7-58 Przykłady struktur BB (po lewej) oraz DITF/DENF (po prawej) z otworu Kaszewy-1

Kierunek największego naprężenia poziomego (S_{Hmax}) został wyznaczony na podstawie orientacji BB, które są prostopadłe do S_{Hmax} oraz DITF, które są równoległe do SHmax. Fig. 7-59 przedstawia ich dystrybucję statystyczną z uwzględnieniem długości tych struktur w profilu otworu. Kierunki S_{Hmax} wyznaczone na podstawie struktur kompresyjnych BB i tensyjnych DITF są zbieżne, a ich statystyczna kompilacja wskazuje na $AziS_{Hmax}$ = 147°. Tylko nieco odmienny jest dominujący bieg rozwieranych spękań tektonicznych wynoszący 135°. Ponieważ struktury DITF rozrzucone są wzdłuż całego profilu otworu to możemy stwierdzić, że ten kierunek S_{Hmax} jest stabilny z głębokością.

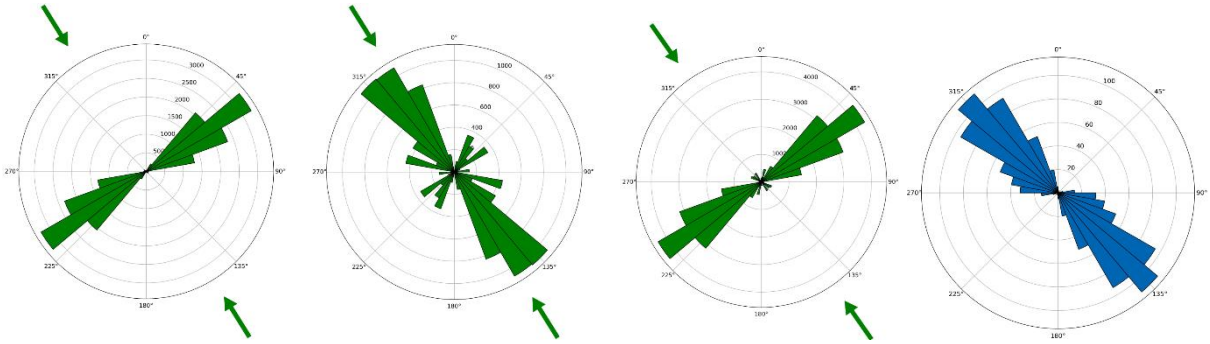


Fig. 7-59 Rozety przedstawiają w kolejności: kierunki BB, kierunki DITF, statystykę BB i DITF (+ 90°) ze strzałkami wskazującymi na kierunek S_{Hmax}. Ostatnia rozeta przedstawia kierunki biegu DENF

Do analizy wielkości naprężeń posłużyły te same struktury zniszczeniowe ściany otworu jak również parametry mechaniczne – na podstawie sprawozdania firmy Schlumberger (SLB) (materiały projektu demo CCS PGE Bełchatów) oraz ciśnienia porowe i otworowe na podstawie sprawozdania z otworu (Posyniak i Rosa, 2010). W 2011 roku podobny model geomechaniczny został wykonany przez firmę SLB. Nasz model, mimo, że wykonany podobną metodyką zbliżoną do stosowanej przez SLB *1D Mechanical Earth Model* dał odmienne wyniki. Przyczyną tego jest: (1) lepsze dopasowanie struktur modelowanych do obserwowanych; (2) uwzględnienie w modelu oprócz kompresyjnych struktur breakouts (BB) również technologicznych tensyjnych pęknięć ścian otworu (DITF); (3) zastosowanie liniowo zmiennej wartości odkształcenia sprężystego w profilu otworu, (4) uwzględnienie współczynnika Biota przy obliczaniu naprężeń efektywnych.

Modelowanie prowadziliśmy do momentu uzyskania takiej samej sumarycznej długości modelowanych i obserwowanych struktur BB i DITF, oraz do uzyskania jak najlepszego dopasowania wielkości minimalnego naprężenia (S_{hmin}) do wyników testów szczelinowania hydraulicznego. Wyniki modelowania wykazały, że nie jest możliwe jednoczesne dopasowanie modelu do wyników testów szczelinowania hydraulicznego jak i do pęknięć DITF. Dlatego przedstawiliśmy dwa niezależne modele naprężeń, które odpowiadają poszczególnym grupom danych. W obu modelach równie dobrze dopasowane są sumaryczne długości modelowanych i obserwowanych struktur BB (Tabela 7-6).

Tabela 7-6 Wyniki modelowania profili naprężeń i odkształceń sprężystych

Typ walidacji	BadHole	BB	DITF	e_{Htop}	e_{Hbot}	e_{htop}	e_{hbot}
Obserwowane	29,5	38,5	42,6	-	-	-	-
Model HF	29,5	45,0	0	6,0e-4	8,7e-4	4e-4	4,8e-4
Model DITF	29,5	45,9	38,3	5,5e-4	8,4e-4	0,7e-4	0,8e-4

Oba warianty modeli naprężeń są zbliżone, jeżeli chodzi o wielkość maksymalnego odkształcenia sprężystego. Wartość tego odkształcenia musieliśmy zróżnicować z głębokością, tak aby w górnej części profilu nie wystąpiły modelowane BB, które nie były obserwowane w profilu otworu. Generalnie dla górnej partii modelu przyjęto odkształcenia o ok. 1/3 mniejsze niż dla spągu otworu. Nieco wyższe wartości e_H obliczono dla modelu walidowanego testami szczelinowania hydraulicznego. Warianty modeli różnią się natomiast zasadniczo wielkością minimalnego odkształcenia. Model walidowany DITF ujawnia ok. 6-krotnie mniejsze minimalne odkształcenie

sprężyste niż model walidowany HF. Zmienność tego parametru z głębokością jest mniejsza i osiąga wartość kilkunastu procent.

Aby maksymalnie zbliżyć do siebie wyniki dwóch wariantów modeli, dla DITF przyjęliśmy minimalne wartości wytrzymałości tensyjnej bliskie 0. Jest to o tyle uzasadnione, że DITF rozwijają się w interwałach, w których występują również otwarte DENF. Mimo to, minimalne wartości S_h wyznaczone przy walidacji modelu testami szczelinowania są o 5 - 20 MPa wyższe niż te wyznaczone przy walidacji DITF. W obrębie najistotniejszej z punktu widzenia sekwestracji - górnej partii kolektora – do głębokości 1380 m różnica ta wynosi 5-10 MPa. Na obecnym etapie badań nie jesteśmy w stanie wskazać, który z modeli jest bardziej wiarygodny.

Z jednej strony, wyniki niektórych testów szczelinowania są ewidentnie nieprawidłowe. Np. na głębokości 1525 m mimo ciśnienia przekraczającego naprężenie pionowe (S_v) o ponad 2 MPa, nie osiągnięto efektu szczelinowania. Z kolei w teście na głębokości 1245 m szczeliny hydrauliczne zamykały się pod ciśnieniem przewyższającym S_v o ok. 6 MPa. Z mechanicznego punktu widzenia jest to trudne do wytłumaczenia, gdyż wartość S_v powinna stanowić górny limit ciśnień otwierania szczelin, gdyż przy ciśnieniach wyższych powinny otwierać się poziome powierzchnie ławic. W reżimie naprężeń uskoków odwróconych nie można bezpośrednio wyprowadzić wielkości S_h z wyników testów szczelinowania, a jedynie wskazać minimalną wartość $S_h > S_v$. Z kolei wartości wyznaczone z DITF mogą być obarczone efektami, których nie uwzględniliśmy w naszym modelu. Po pierwsze, jeżeli DITF powstawały na spodzie otworu, to wówczas należy uwzględnić dodatkowy czynnik dynamicznego obciążenia strumieniem płuczki. Z naszych szacunków wynika, że obciążenie to może odpowiadać za ok. 1 MPa różnicy pomiędzy wariantami S_h. Po drugie, w powstawaniu DENF może odgrywać rolę naprężenie termiczne wzbudzone studzeniem ściany otworu strumieniem płuczki. Powstające wówczas naprężenia tensyjne w ścianie otworu mogą powodować generowanie DITF i DENF przy wyższych wartościach S_h. Wpływ tego czynnika zależy od różnicy temperatur i tempa chłodzenia. Nasze szacunki wskazują, że w przypadku temperatury płuczki mniejszej o kilkanaście stopni od przewiercanej formacji naprężenia termiczne mogą odpowiadać nawet za ok. 10 MPa różnicy wartości S_h pomiędzy wariantami modeli naprężeń. W ten sposób wytłumaczyć można różnice naprężeń S_h w górnej części kolektora J1.

Jeżeli przyjmiemy wyniki modelowania w dwóch wariantach (Fig. 7-60) za przedział dopuszczalnych rozwiązań to wówczas stwierdzimy, że w obrębie kolektora J1 może panować reżim naprężeń zmienny w zakresie od SS do TF. Ze względu na kierunki naprężeń równoległe do osi antykliny Wojszyc i do biegu uskoków i spękań, taki stan naprężeń nie sprzyja współczesnej ścięciowej reaktywacji antykliny ani uskoków. W warstwach, w których występuje reżim TF również niskie jest prawdopodobieństwo otwierania spękań grawitacyjnych systemu penetratywnego. Natomiast w warstwach, w których panuje reżim SS spękania te będą mogły być otwierane podwyższonym ciśnieniem zatłaczanego płynu.

Wynikający z rozwiązań dwóch wariantów modelu niewielki spadek wartości odkształceń sprężystych ku górze profilu może wynikać ze współczesnego doginania antykliny Wojszyc. Taką możliwość sugeruje odstępstwo kierunku S_H od trendu regionalnego dla tej części Polski, który wskazuje na S_H w kierunku zbliżonym do N-S. Reżim TF sprzyjałby takiej reaktywacji. Wówczas można by uznać, że NW-SE kierunek S_{Hmax} w otworze Kaszewy-1 zlokalizowanym w przegubie antykliny Wojszyc, może być efektem tensji z jej gięcia – prostopadłej względem osi antykliny, która powinna występować

powyżej powierzchni neutralnej. Wówczas należałoby uznać, że badana część profilu znajduje się powyżej powierzchni neutralnej.

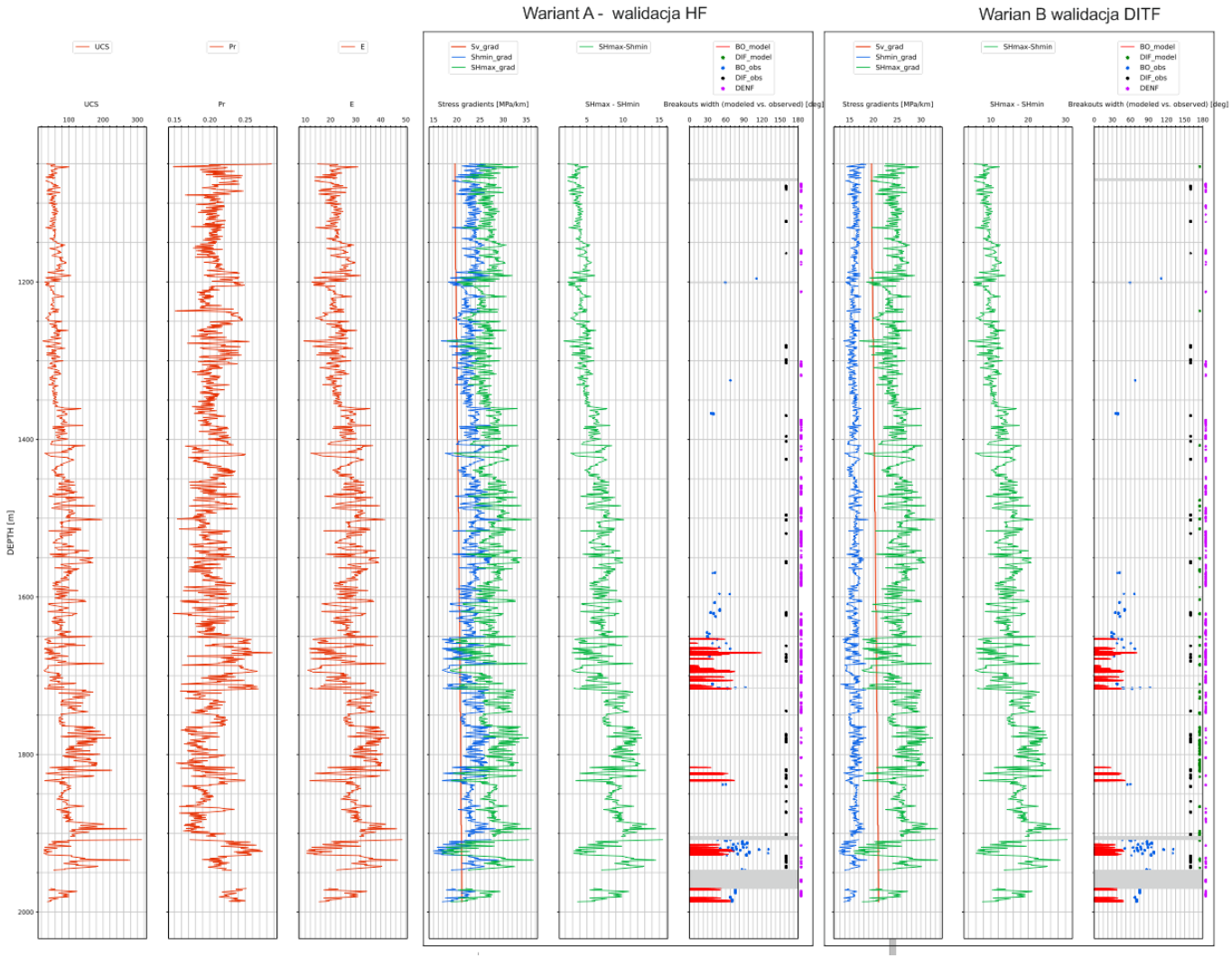


Fig. 7-60 Wyniki modelowania profili naprężeń dla kolektora J1 otworu Kaszewy-1. W trzech pierwszych kolumnach od lewej podano wykresy: wytrzymałości jednoosiowej; współczynnika Poissona i modułu Younga; kolejne 3 wykresy pokazują wyniki modelowania naprężeń dla walidacji HF oraz ostatnie 3 wykresy - wyniki modelowania naprężeń dla walidacji DITF

7.5.7 Wnioski strukturalno-geomechaniczne dotyczące uszczelnienia i kolektorów

Lateralne zamknięcie brachyantykliny Wojszyc wynika z modelu sejsmicznego utworzonego na podstawie trzech profili sejsmicznych 2D. Dotychczasowe analizy wskazują, że w obrębie struktury Wojszyc zachodzić może istotna lateralna anizotropia prędkości fali sejsmicznej. Przejawiać się ona może obniżeniem prędkości o ok. 10% w kierunku prostopadłym do osi struktury. Z naszych analiz wynika, że anizotropia ta może być spowodowana penetratywnym zespołem otwartych spękań grawitacyjnych. Może być ona również powodem asymetrii antykliny Wojszyc obserwowanej na przekroju czasowym. Zasięg strefy anizotropii byłby wówczas uwarunkowany wystąpieniem spękań tego zespołu. Spłaszczenie jej przegubu od SW strony może wynikać ze zmniejszenia prędkości fali w tym segmencie profilu. Przedstawiony przez nas model genetyczny wskazuje, że występowanie spękań powinno być ograniczone do przegubu antykliny i górnej części jej SW skrzydła.

Model grawimetryczny (Fig. 7-61; materiały projektu demo CCS PGE Bełchatów), który został wykonany niezależnie od naszych analiz strukturalnych pokazuje, że ponad przegubem antykliny w obrębie jury środkowej i górnej występuje strefa obniżonej gęstości. Gęstość po SW stronie antykliny jest większa niż po jej NE stronie ze względu na różny stopień pogrążenia i konsolidacji skał. Dlatego spadek gęstości można by podawać względem każdego skrzydła osobno. Oszacowaliśmy, że średnio spadek gęstości w J2 i J3 wynosi 2,5- 5,5%. Ponieważ z tego interwału stratygraficznego nie mieliśmy rdzenia ani obrazu skanera XRMI dlatego nie możemy stwierdzić co może być przyczyną tej anomalii. Nie można wykluczyć, że przyczyną anomalii jest gęsty zespół otwartych spękań. Model genetyczny tych spękań wskazuje, że powinny one powstawać również w obrębie J2 i J3. Gdyby anomalie ekstrapolować w głąb J1 to wówczas średnia anomalia gęstości mogłaby wynieść ok. 3%. Ale wówczas szczeliny musiałyby mieć ok 1 cm apertury. O ile jest to wyobrażalne w najpłycej położonych wapieniach oksfordu to nie jest to możliwe w utworach J2 i J3. Ażeby uzyskać bardziej realistyczny wynik należałby powiększyć anomalię w obrębie J3 i zmniejszać ją systematycznie w obrębie J2 i J1.

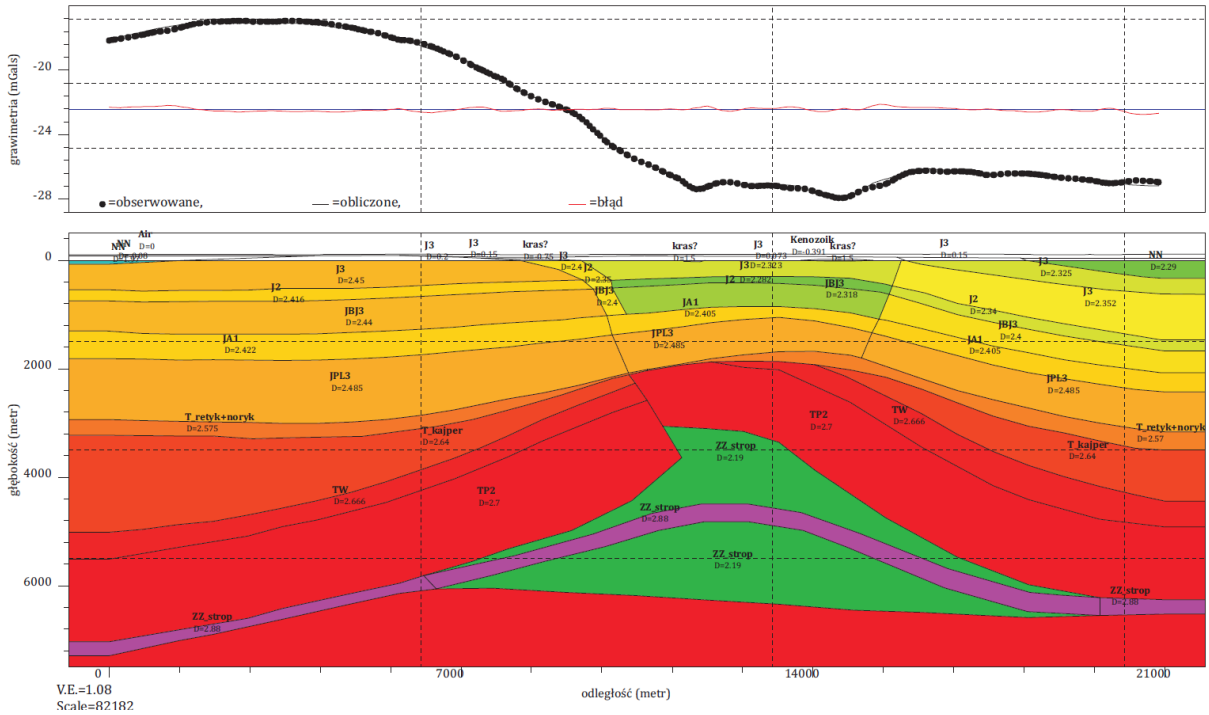


Fig. 7-61 Model grawimetryczny wzdłuż profilu sejsmicznego PGI04

Na profilach sejsmicznych przecinających poprzecznie antyklinę Wojszyc, w sąsiedztwie otworu Kaszewy-1 interpretowana jest strefa uskokowa przecinająca przegub antykliny po jej SW stronie. Jak wynika z sąsiednich przekrojów jej bieg jest generalnie równoległy względem osi antykliny. Przemieszczając się wzdłuż struktury zaobserwujemy, że deformacje związane z tym uskokiem nasilają się w kierunku NW i zanikają ku SE. Uskok ten interpretowany jest w obrębie kompleksu triasowego, a wyżej jego przebieg nie jest widoczny ze względu na utratę jakości obrazowania profili sejsmicznych w przegubie antykliny. Jakość obrazowania spada w strefie, gdzie wapienie oksfordu wychodzą na powierzchnię podtrzeciorzędową.

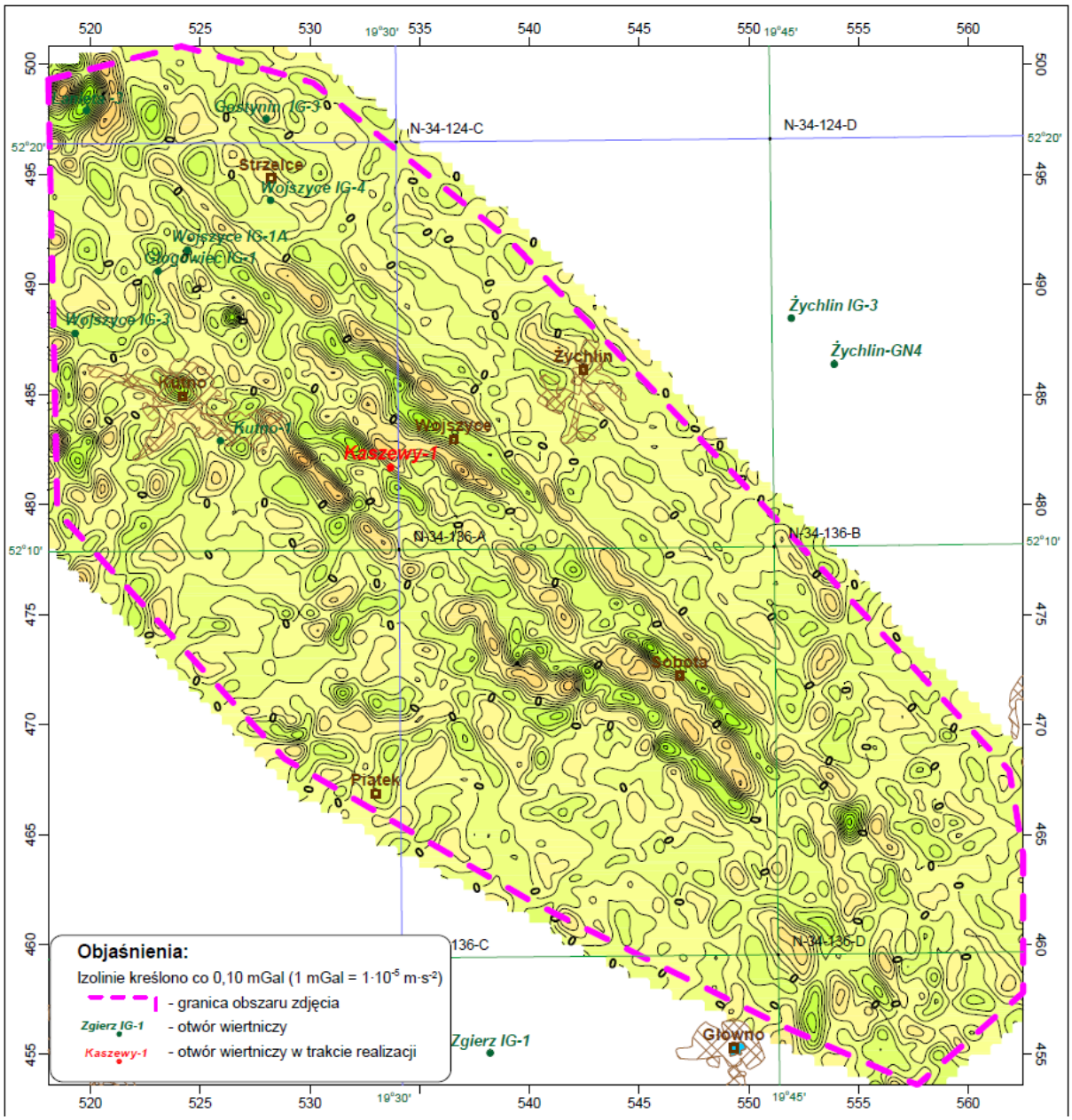


Fig. 7-62 Anomalie rezydualne na podstawie filtracji częstotliwościowej dla orientacyjnej głębokości 0-500 m w obrębie której, mieści się strop J3

Jak wynika ze szczegółowej mapy anomalii grawimetrycznych (Fig. 7-62; materiały projektu demo CCS PGE Bełchatów), powierzchnia ta jest urzeźbiona w postaci skałek twardego i gęstego wapienia skalistego, przykrytych osadami węgli brunatnych i iłów miocenu o wyjątkowo małej gęstości. Dodatnie anomalie osiągają tu wartości > 0,5 mGal i układają się w 3 lub 4 pasy podłużne względem osi brachyantykliny. Pas tych najwyraźniejszych anomalii ma szerokość ok. 5 km, a poszczególne ciągi anomalii mają długość większą niż kilkanaście kilometrów i nie są ciągłe. Rysuje to obraz krasowych ostańców wapiennych przypominających pogrzebaną w osadzie Jurę Krakowsko-Częstochowską. O występowaniu tu komór krasowych świadczy trudny do opanowania zanik płuczki wiertniczej w tym interwale głębokościowym. Postawiliśmy hipotezę, że jakość obrazowania spada ze względu rozproszenie fali sejsmicznej w obrębie stromych „skałek" stropu J3, przy maksymalnej różnicy impedancji pomiędzy wapieniem skalistym a pokrywą kenozoiczną. Osiągnięcie dobrej jakości obrazowania uwarunkowane będzie wykluczeniem tej strefy ze wzbudzania i rejestracji fali.

Ostańce wapienne, ze względu na ich rozciągłość wzdłuż struktury Wojszyc i rozdzielenie wąskimi dolinami są najprawdopodobniej uwarunkowane tektonicznie. Mogą je rozdzielać zarówno strefy zagęszczenia spękań jak i uskoki. I w tym miejscu dochodzimy do najistotniejszego pytania, czy strefy uskokowe mogą rozszczelniać strukturę Wojszyc.

7.5.7.1 Integralność uszczelnień J2

Wszystkie strefy uskokowe stwierdzone w otworze Kaszewy-1 mogą być genetycznie związane z uskokiem interpretowanym na podstawie profili sejsmicznych (Fig. 7-56 i Fig. 7-57). Uskok ten tnie kompleks triasu po SW stronie przegubu antykliny. Ze względu na widoczną na kilku profilach sejsmicznych stałą lokalizację uskoku względem osi antykliny, przypuszczać można, że jego bieg jest zbieżny z osią antykliny i z zespołem penetratywnych spękań, zapadających podobnie jak uskok – ku SW. Nachylenie tej strefy jest przez nas interpretowane odmiennie niż przez innych autorów. W naszej interpretacji jest to uskok normalny o upadzie ku SW, a nie uskok odwrócony o upadzie przeciwnym. Taka interpretacja może mieć również wpływ na model grawimetryczny (Fig. 7-61). Uskok ten powstał w pstrym piaskowcu i wówczas doszło do największego zrzutu na tym uskoku. Zarówno badania strukturalne rdzenia jak i interpretacja profilu sejsmicznego o relatywnie dobrej jakości obrazowania (Fig. 7-56) wskazują, że uskok ten był reaktywowany w kredzie, prawdopodobnie podczas fazy inwersji laramijskiej. Zarówno rozwidlona geometria uskoków tnących jurę jak i analizy na rdzeniu wskazują, że była to reaktywacja przesuwcza, najprawdopodobniej – transtensyjna.

Taka reaktywacja uskoku nie doprowadziła do istotnych pionowych przemieszczeń, a jedynie do przerwania ciągłości warstw i refleksów sejsmicznych. W obrębie jury mogły wówczas powstać również liczne, lecz drobne uskoki normalne, które teoretycznie powinny być ustawione kulisowo i odchylone w stronę kierunku południkowego względem uskoku głównego. Uskoki o kinematyce przesuwczej mają dużą zdolność propagowania się w górę profilu bez widocznego przemieszczenia pionowego. Uskoki te, jeśli przebiły się w obręb J3, mogły warunkować również geometrię ostańców erozyjnych na powierzchni podkenozoicznej.

Potencjalne główne kolektory znajdują się w obrębie J1, a uszczelnienia w obrębie J2 oraz najwyższej J1 (formacja ciechocińska; w obrębie J1 występują także uszczelnienia drugorzędne pomiędzy kolektorami). Zatem należy zadać pytanie o możliwą rolę spękań penetratywnych i uskoków w obrębie takiego składowiska. Analizy nasze wskazały, że spękania penetratywne rozwinęły się głównie w piaskowcach i mułowcach zatem nie powinny stanowić problemu w obrębie ilastych uszczelnień J2 i J1. Nawet jeżeli tam występują, to powinny być mniej liczne i nie mieć ciągłości pionowej, wygasając w obrębie połogich ścięć i na powierzchniach ławic. Jest jednak prawdopodobne, że ze względu na podwyższoną zawartość minerałów ilastych sprzyjających pełzaniu łupków, struktury kruche w ogóle się w uszczelnieniach nie wykształciły lub są w pełni zasklepione. Jednak brak rdzenia z interwału J2 i nieliczne próby z najwyższej J1 nie pozwoliły na wiarygodne zweryfikowanie powyższych tez.

Zatem pozostaje pytanie o możliwość rozszczelnienia uszczelnień J2 przez uskoki. Aktywne uskoki transtensyjne zwykle efektywnie otwierają drogi migracji wód porowych z preferencją cyrkulacji descensyjnej. Takie zjawisko mogło uwarunkować wystąpienie mineralizacji węglanowej w obrębie J1, stwierdzonej badaniami rdzenia wiertniczego. Ważnych informacji dostarcza interpretacja analogicznych uskoków w obrębie antykliny Gostynina, gdzie jakość obrazowania sejsmicznego jest dobra (Fig. 7-57). Uskoki o analogicznej relacji względem antykliny, tworzą tam charakterystyczne dla

uskoków przesuwczych struktury kwiatowe. Tną one cały kompleks jury i wygasają dopiero na pograniczu dolnej i górnej kredy. Antyklina Gostynina została najpewniej kompresyjnie zmodyfikowana w obrębie kredy górnej pod wpływem kompresji poprzecznej względem biegu tych uskoków, a uskoki te zostały wówczas zaciśnięte. W obrazie sejsmicznym nie dostrzegliśmy śladów młodszej reaktywacji tych uskoków.

Przez analogię wnioskować można, że również w obrębie antykliny Wojszyc uskoki o znikomym zrzucie tną cały kompleks jurajski. Nie mamy pewności, jaką rolę odegrały podczas głównej fazy kompresyjnej inwersji laramijskiej basenu polskiego. Stwierdzić można, że ze względu na kierunek kompresji, uskoki te nie były wówczas reaktywowane. Ale jeżeli antyklina Wojszyc została wówczas dofałdowana kompresyjnie to spodziewać się można ekstensji ponad powierzchnią neutralną i kompresji poniżej. Sekcje sejsmiczne wskazują, że antyklina Wojszyc, jeżeli w ogóle uległa reaktywacji kompresyjnej – to była ona znikoma. Obserwuje się tu zwłaszcza wyniesienie całego wału śródpolskiego. Model gęstości (Fig. 7-61) sugeruje otwieranie spękań powyżej J1, co by wskazywało, że powierzchnia neutralna znajdowała się niżej, np. w stropie triasu. Nasze obserwacje wskazują, że przy rozwarstwieniu mechanicznym kompleksu mezozoicznego mogło powstać wiele powierzchni neutralnych w obrębie izolowanych kompleksów kompetentnych i sprężystych, rozdzielonych podatnymi łupkami ilastymi.

Widoczne na mapie rezydualnych anomalii grawimetrycznych (Fig. 7-62) ciągi skałek wapiennych o rozciągłości zgodnej z osią antykliny Wojszyc, są najprawdopodobniej również produktem naskórkowej ekstensji grawitacyjnej na skłonie basenu bruzdy śródpolskiej. Dlatego nie można ich traktować jako świadectwa przerwania ciągłości uszczelnień J2.

Badania naprężeń w otworze Kaszewy-1 pokazały, że współczesne naprężenie tektoniczne S_{Hmax} w osi struktury Wojszyc ma stabilną orientację NW-SE. Taka orientacja nie sprzyja reaktywacji przesuwczej uskoków o tym samym biegu NW-SE. Przy takiej orientacji S_{Hmax} uskoki te mogłyby być reaktywowane jedynie jako uskoki normalne. Jednak nasze badania geomechaniczne wykazały, że w kolektorach J1 panuje współcześnie reżim uskoków przesuwczych (SS) lub odwróconych (TF), które wykluczają reaktywację uskoków normalnych. Stąd wnioskujemy, że stan współczesnych naprężeń nie sprzyja reaktywacji uskoków rozcinających kompleks jurajski. Na reżim TF w obrębie kolektora wskazują testy szczelinowania hydraulicznego, w których uzyskano ciśnienia zatrzaśnięcia szczeliny zbliżone do obciążenia litostatycznego na głębokości prowadzonych testów.

Ekstrapolacja powyższych trendów gradientów naprężeń w górę – w obręb uszczelnień J2, sugeruje, że potencjalne struktury tektoniczne tam występujące – analogiczne do tych w kolektorze, nie będą reaktywowane. Ewentualne występowanie w obrębie uszczelnień warstw z reżimem TF wskazywałoby na najwyższą integralność uszczelnień. Gdyby ten wynik się potwierdził w przyszłych testach zaplanowanych w obrębie uszczelnień J2, to mając również na względzie wzrost tendencji do pełzania w łupkach o podwyższonej zawartości minerałów ilastych, uszczelnienie J2 należałoby uznać za znakomite.

Odrębną, ważną dla składowania CO_2 kwestią jest możliwość występowania otwartych szczelin w obrębie kolektorów J1. Nadzwyczajnie duża liczba otwartych spękań stwierdzonych na rdzeniu i w obrazie skanera XRMI w J1 wskazuje na możliwość ich otwierania przy przewyższeniu ciśnień porowych. Jest to tym bardziej prawdopodobne, że najniższe naprężenie główne S_{Hmin} jest tu prostopadłe względem biegu tych stromych spękań. Dodatkowo, podczas zatłaczania CO_2 pojawi się

rozprzestrzeniający się w czasie czynnik kontrakcji termicznej, dodatkowo otwierającej szczeliny. Stwarza to dogodne warunki dla wykorzystania nachylonych lub poziomych otworów do zatłaczania CO_2. Dzięki optymalnej orientacji takich otworów będzie można uzyskać bardzo dobrą chłonność ośrodka i zredukować opory zatłaczania CO_2. Profil gęstości spękań wskazuje, że optymalne warunki dla zlokalizowania poziomego interwału otworu zatłaczającego występują na głębokości 1310-1370 m, gdzie gęstość otwartych spękań, a nawet kawern jest duża. Jednak należy wziąć pod uwagę, że interwał ten może mieć wyjątkową szczelinowatość jedynie w lokalizacji otworu Kaszewy-1. W przypadku schłodzonego CO_2 szczeliny otwierane kontrakcją termiczną będą efektywnie rozprowadzać CO_2 wzdłuż osi struktury.

Magazynowanie gazów – nośników energii takich jak wodór, mieszaniny wodoru i gazu ziemnego, gaz ziemny oraz sprężone powietrze, generalnie nie wiąże się z takimi wyzwaniami jak czynnik kontrakcji termicznej. W przypadku wodoru i mieszanin z gazem ziemnym ze zdecydowaną przewagą wodoru dochodzą inne czynniki, związane z jego reaktywnością z niektórymi minerałami występującymi w skałach budujących kolektory oraz oddziaływaniem na skały budujące uszczelnienia (rozdział **5.1.1**). Ponadto pojemność magazynowa wymagana przy tego rodzaju działalności jest, jeśli chodzi o aktualne doświadczenia światowe (rozdziały **1.1.1** i **5.1.1**), daleko mniejsza niż charakteryzującej się potencjalnie ogromną pojemnością struktury Wojszyce (np. w przypadku gazu ziemnego teoretycznie kilkadziesiąt razy większą niż łącznie wszystkie PMG aktualnie funkcjonujące w Polsce).

7.5.7.2 Rekomendacje dla dalszych badań struktury Wojszyc

Na podstawie dostępnych danych nie uzyskaliśmy wiarygodnej odpowiedzi na pytanie o przyczynę ujemnej anomalii grawimetrycznej jaką wymodelowano w obrębie jury (Fig. 7-61). Dane te sugerują możliwość tektonicznego „rozrzedzenia" przegubu antykliny.

Koniecznym pierwszym elementem rozpoznania badanej struktury powinno być wykonanie wiercenia o głębokości conajmniej 1000 m w odległości najwyżej kilku km w kierunku SE od otworu Kaszewy-1 – w szczycie struktury Wojszyc. Otwór ten powinien mieć w całości rdzeniowany profil jury, z węglanami J3, uszczelnieniami J2 i górną częścią kolektora J1. W otworze konieczne byłoby, poza wykonaniem karotaży standardowych, również wykonanie karotaży sondy akustycznej dipolowej i skanera XRMI. Interwały te nie były odpowiednio zbadane w otworze Kaszewy-1. W obrębie uszczelnień i w stropie kolektora powinny zostać przeprowadzone testy szczelinowania hydraulicznego, w interwałach: bez spękań, ze spękaniami oraz ze strefą uskokową – w sumie ok. 8 testów. Dla scharakteryzowania głównych typów litologicznych z interwałów szczelinowanych należałoby wykonać kilkanaście laboratoryjnych testów mechanicznych i petrofizycznych. To pozwoli na pełną charakterystykę strukturalną, geomechaniczną i hydrauliczną uszczelnień w obrębie J2. W przypadku otworu głębszego, testów powinno być więcej.

Przy poważnym zainteresowaniu przemysłu strukturą Wojszyc, powinno zostać wykonane zdjęcie 3D/3C, z analizą anizotropii w obrębie poszczególnych formacji litostratygraficznych. Projekt powinien zostać tak zaprojektowany, aby sygnał sejsmiczny z punktu wzbudzania do odbiornika w miarę możliwości omijał „horyzont skałkowy" w obrębie wychodni wapieni oksfordu na powierzchni podkenozoicznej. Należy znaleźć kompromis pomiędzy precyzją obrazowania, a jakością korelacji horyzontów, gdyż sygnał sejsmiczny o podwyższonej częstotliwości jest bardziej podatny na zaburzenia. W konstrukcji modelu strukturalnego i geomechanicznego struktury Wojszyc

należy uwzględnić anizotropię prędkości fali P. Model gęstościowy i geomechaniczny należy porównać z wynikami projektu sejsmicznego.

Powinny zostać przeanalizowane scenariusze masowego zatłaczania CO_2 do jurajskiego systemu sekwestracyjnego struktury Wojszyc, składającego się z wielopoziomowej sekwencji zbiornikowo-szczelinowej. Celem takich badań powinno być sprawdzenie, ile CO_2 można bezpiecznie zatłoczyć do tej, być może najbardziej obiecującej struktury w Polsce. Badania procesów fizykochemicznych zachodzących podczas zatłaczania CO_2 powinny być prowadzone przez multidyscyplinarny zespół, w szerokim zakresie skali obserwacji, od porów do skali regionalnej. Badania laboratoryjne powinny określić właściwości mechaniczne i hydrauliczne skał zbiornikowych i uszczelniających. Wyniki tych badań powinny zostać wykorzystane w modelach geomechanicznych 1D oraz symulacjach numerycznych parametrów efektywnych, zapewniających dane wejściowe dla modeli wielkoskalowych. W większych skalach powinna być badana wydajność zatłaczania dla różnych poziomów zbiornikowych oraz procesy hydro-chemo-mechaniczne związane z zatłaczaniem CO_2. Zbadane powinno być rozprzestrzenianie się chmury CO_2 w długim okresie, z uwzględnieniem rozpuszczania CO_2 i konwekcyjnego mieszania solanki wzbogaconej w CO_2, w tym anizotropii przepływu wywołanej gęstym zespołem otwartych spękań w przegubie antykliny. Modele przepływów, które posłużą do analizy zakresu integralności uszczelnienia, powinny być sprzężone z analizą mechanicznej reakcji skały na podwyższone ciśnienie porowe. W skali regionalnej należy zbadać efekty wynikające z nadciśnienia płynu porowego i wypychania solanki z kolektorów ku wychodniom skał zbiornikowych lub innych stref komunikacji hydraulicznej z wodami słodkimi. Modele wariantów procesu zatłaczania zostaną wykorzystane do wybrania najbardziej efektywnego scenariusza, który zostanie wykorzystany do oceny ryzyka środowiskowego oraz jako podstawa do utworzenia koncepcji monitorowania składowiska.

Analogiczne analizy laboratoryjne i symulacje ewentualnie powinny zostać wykonane na potrzeby magazynowania gazów – nośników energii takich jak wodór, mieszaniny wodoru i gazu ziemnego, gaz ziemny oraz sprężone powietrze.

7.6 Przekroje sejsmiczno-grawimetryczne przez strukturę Wojszyce

(Adam Wójcicki – na podstawie materiałów projektu demo CCS PGE Bełchatów)

W ramach projektu demo CCS PGE Bełchatów wykonano na obszarze struktury sejsmikę wysokorozdzielczą 2D wzdłuż 8 profili sejsmicznych o łącznej długości 225 km (zdjęcie sejsmiczne Wojszyce 2D – Musiatowicz i Zubrzycka 2010; Fig. 7-63).

W ramach tego projektu wykonano także szczegółowe zdjęcie grawimetryczne o zagęszczeniu punktów pomiarowych 10-12 pkt/km^2 (Ostrowski i in., 2010), omawiane, m.in., w rozdziałach **7.3** (mapy transformowane rozkładu anomalii siły ciężkości) i **7.5** (mapa anomalii rezydualnych odpowiadających rozkładowi gęstości w obrębie utworów przypowierzchniowych oraz modelowanie grawimetryczne na profilu poprzecznym przebiegającym w bliskim sąsiedztwie otworu Kaszewy 1).

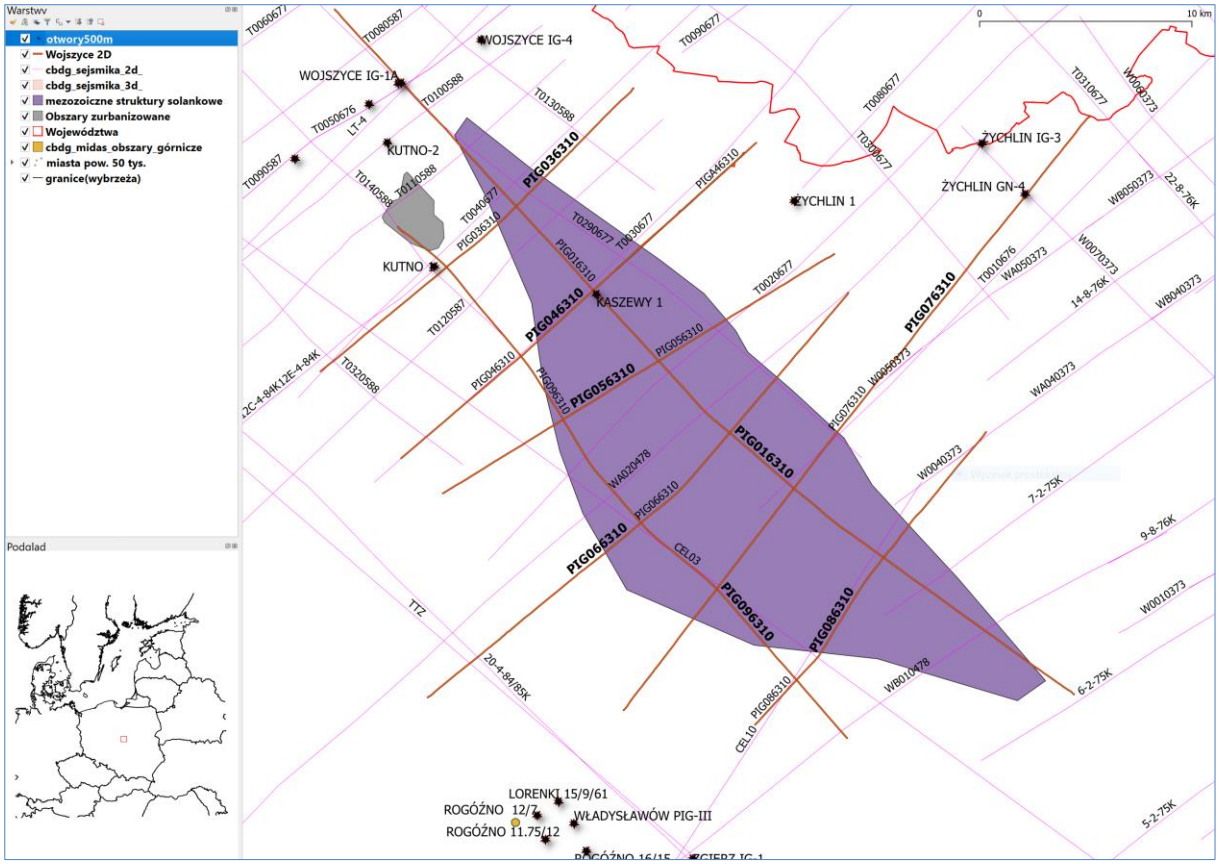


Fig. 7-63 Lokalizacja profili sejsmicznych na obszarze struktury Wojszyce, w tym sejsmiki wysokorozdzielczej Wojszyce 2D z 2010 roku

Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy brał udział w tym projekcie demo CCS, wspomagając PGE Bełchatów w komponencie składowania (co obejmowało m.in. opracowanie projektów robót geologicznych, nadzór na pracami polowymi, zagadnienia komunikacji i akceptacji społecznej oraz udział w opracowaniu i interpretacji wyników, tzn. przekrojów, map i modeli geologiczno-geofizycznych; Szynkaruk, 2011). Przy interpretacji zdjęcia sejsmicznego Wojszyce 2D wykorzystano ponadto wyniki interpretacji sejsmiki z wcześniej wykonanych prac w rejonie struktury oraz dane z otworu Kaszewy 1 i otworów archiwalnych zlokalizowanych w sąsiedztwie struktury (Fig. 7-63 i Fig. 7-68). Dokonano korelacji kluczowych horyzontów sejsmicznych (patrz niżej), dla

których sporządzono następnie mapy czasowe i głębokościowe, wykorzystane do konstrukcji modeli 3D.

W ramach tych prac sformułowano, m.in., następujące wnioski dla zdjęcia sejsmicznego Wojszyce 2D:

- zasadniczym problemem interpretacyjnym była zróżnicowana jakość obrazu sejsmicznego;

- ogólnie jakość danych sejsmicznych pomierzonych na temacie „Wojszyce 2D" jest dobra (wysoka rozdzielczość pionowa, dobra ciągłość refleksów);

- wyjątek stanowi strefa przegubowa badanej antykliny, gdzie obserwujemy znaczący spadek jakości obrazu sejsmicznego, szczególnie dla utworów górno- i środkowojurajskich;

- w obrębie jury dolnej oraz triasu szerokość strefy charakteryzującej się słabą jakością obrazu sejsmicznego jest mniejsza (niż w J3 i J2) poza profilem PIG016310, który w całości charakteryzuje się bardzo słabą jakością danych;

- wyinterpretowane uskoki mają rozciągłość NW-SE i deformują osady cechsztyńskie oraz górnotriasowe do stropu kajpru – brak jest wyraźnych przesłanek świadczących o kontynuacji uskoków w najwyższą partię triasu oraz jurę;

- ze względu na niską jakość obrazu sejsmicznego w obrębie utworów jurajskich w przegubowej strefie antykliny Wojszyce nie można wykluczyć istnienia niewielkich uskoków normalnych;

- zamknięcie struktury od strony SE ma niewielką amplitudę co w połączeniu z niską jakością danych sejsmicznych, szczególnie na mniejszych głębokościach (środkowa i górna jura), zwiększa ryzyko popełnienia błędu w interpretacji;

- słaba jakość obrazu sejsmicznego w centralnej części struktury Wojszyce obniża pewność oraz jednoznaczność interpretacji w tej strefie.

Poniżej przedstawiono wyniki interpretacji sejsmiki i grawimetrii na wybranych 4 profilach sejsmicznych wykonanych w 2010 roku w ramach zdjęcia Wojszyce 2D (materiały projektu demo CCS PGE Bełchatów), tzn. na profilu poprzecznym PIG046310 (Fig. 7-64) przebiegającym w sąsiedztwie otworu Kaszewy 1 (wykonanego również w ramach projektu demo CCS PGE Bełchatów – Posyniak i Rosa, 2009), na prostopadłym do poprzedniego profilu podłużnym PIG016310 (Fig. 7-65) oraz na profilach poprzecznych PIG066310 (Fig. 7-66) i PIG046310 (Fig. 7-67). Na wszystkich profilach interpretowano horyzonty od stropu jury środkowej do spągu cechsztynu, przy czym z punktu widzenia niniejszego przedsięwzięcia najistotniejsze są: strop jury górnej (śledzona tylko na NE skrzydle struktury), strop jury środkowej (czyli spąg jury górnej), strop bajosu górnego – kolektor (cienki), strop aalenu dolnego – kolektor (aalen dolny i góny toark stanowią w zasadzie jeden kolektor), strop pliensbachu górnego – kolektor, oraz strop triasu górnego czyli spąg jury i ewentualnie T3-niezg. Ostatnia granica to niezgodność kątowa występująca poniżej stropu kajpru, poniżej, która związana jest z zasadniczą fazą wzrostu cechsztyńskiej poduszki solnej znajdującej się w podłożu antykliny Wojszyce. Z tą fazą aktywności związany jest również rozwój strefy uskokowej, zlokalizowanej w kulminacji struktury Wojszyce, w sąsiedztwie otworu Kaszewy. Brak jest wyraźnych przesłanek świadczących o kontynuacji tego uskoku w najwyższą partię triasu oraz jurę.

Przekroje sejsmiczne zestawiono na poszczególnych profilach (Fig. 7-64 – Fig. 7-67) z krzywymi anomalii siły ciężkości w redukcji Bouguera oraz gradientem pionowym wyliczonym z anomalii Bouguera. Gradient pionowy jest miarą zmienności rozkładu gęstości w górotworze w kierunku pionowym (Fajklewicz, 2007). Strzałkami zaznaczono na krzywych gradientu pionowego strefy, gdzie najprawdopodobniej występują lokalne zmiany gęstości – zwiększenie lub zmniejszenie. Ponieważ szerokość tych anomalii jest przeważnie dość mała, najprawdopodobniej związane są one z najpłycej występującymi utworami jury. Wydaje się to być zgodne z sugestią z rozdziału **7.5.7** na temat występowania, w szczególności na osi struktury, skomplikowanej rzeźby stropu jury górnej, tzn. krasowych ostańców wapiennych o wysokiej gęstości przedzielonych zagłębieniami wypełnionymi osadami węgli brunatnych i iłów miocenu o niskiej gęstości. Charakterystyczne jest przy tym występowanie ujemnej anomalii grawimetrycznej w redukcji Bouguera w kulminacji struktury, tzn. w przegubie antykliny (Fig. 7-64 – Fig. 7-66). W rozdziale **7.5.7** przedstawiono hipotezę, że przyczyną tej anomalii mogą być gęste spękania w utworach jury górnej i środkowej.

W ramach projektu demo CCS stworzono też szereg modeli struktury Wojszyce, w tym model geometryczny (Fig. 7-68) uwzględniający horyzonty jurajskie po strop triasu włącznie.

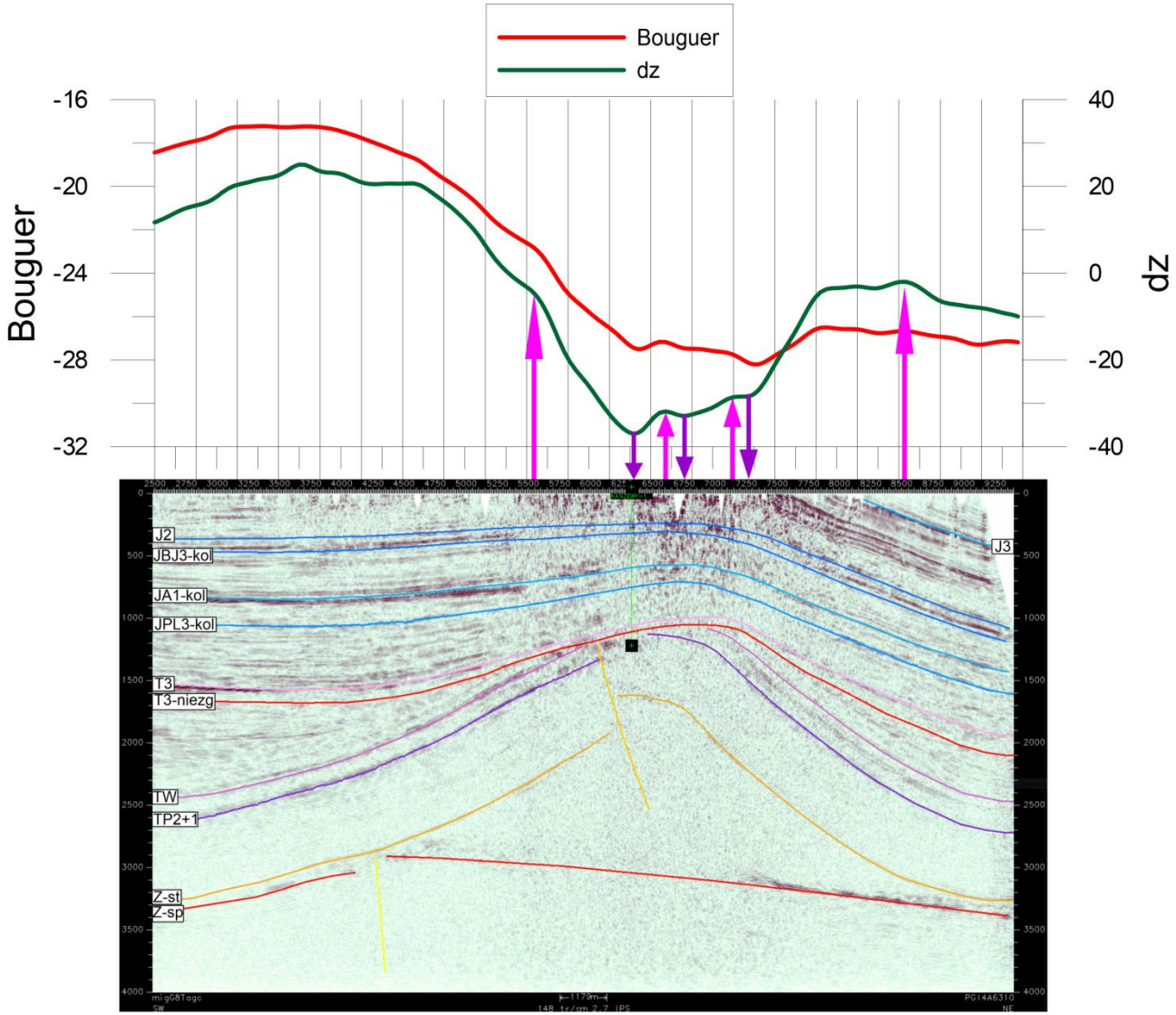


Fig. 7-64 Przekrój sejsmiczny na profilu PIG046310 oraz anomalie w redukcji Bouguera i gradientu pionowego wzdłuż tego profilu. Strzałki w górę lub w dół oznaczają lokalne zmiany gęstości (zwiększenie lub zmniejszenie), najprawdopodobniej w najpłytszej części jury

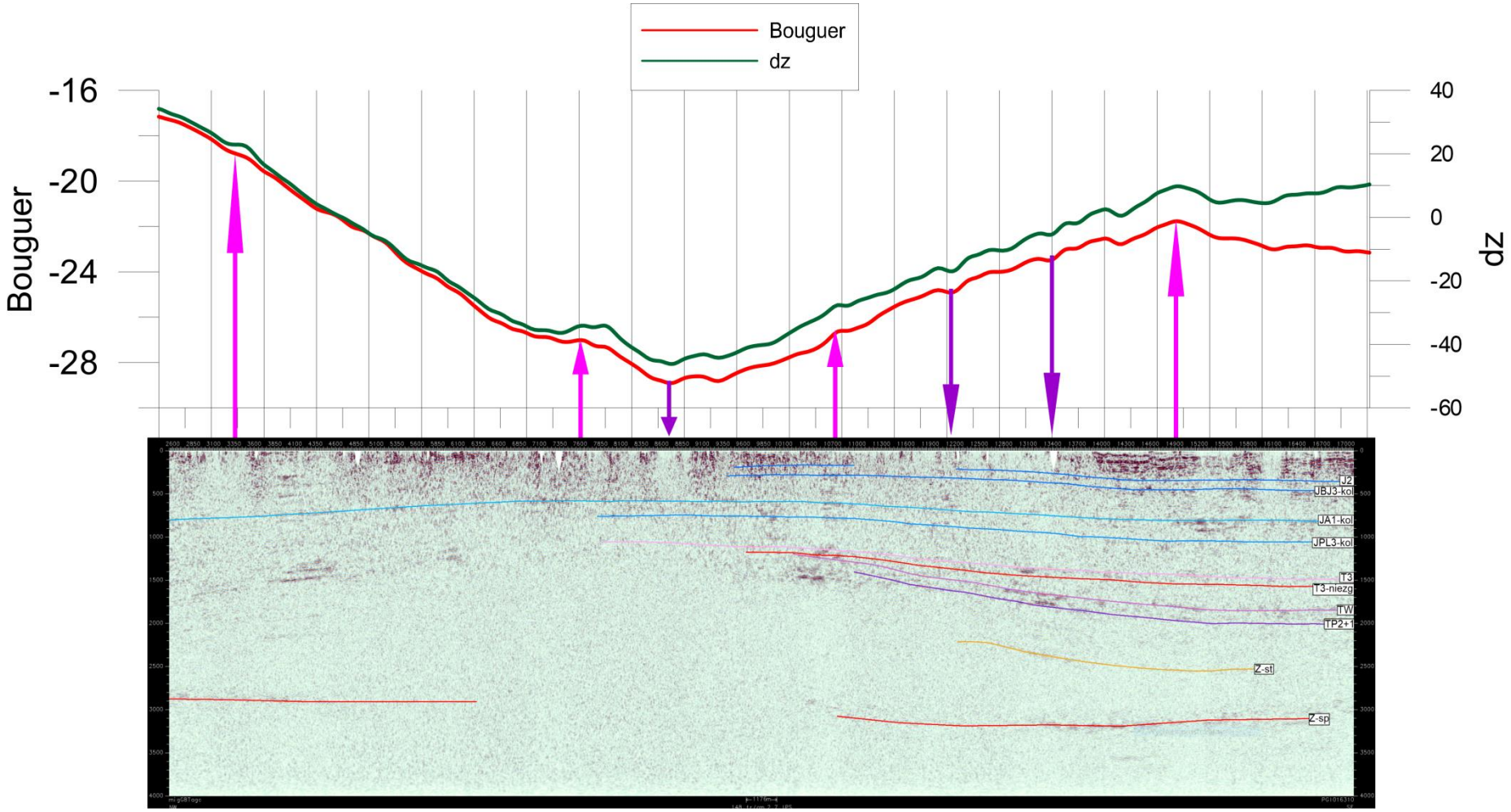


Fig. 7-65 Przekrój sejsmiczny na profilu PIG016310 oraz anomalie w redukcji Bouguera i gradientu pionowego wzdłuż tego profilu. Strzałki w górę lub w dół oznaczają lokalne zmiany gęstości (zwiększenie lub zmniejszenie), najprawdopodobniej w najpłytszej części jury

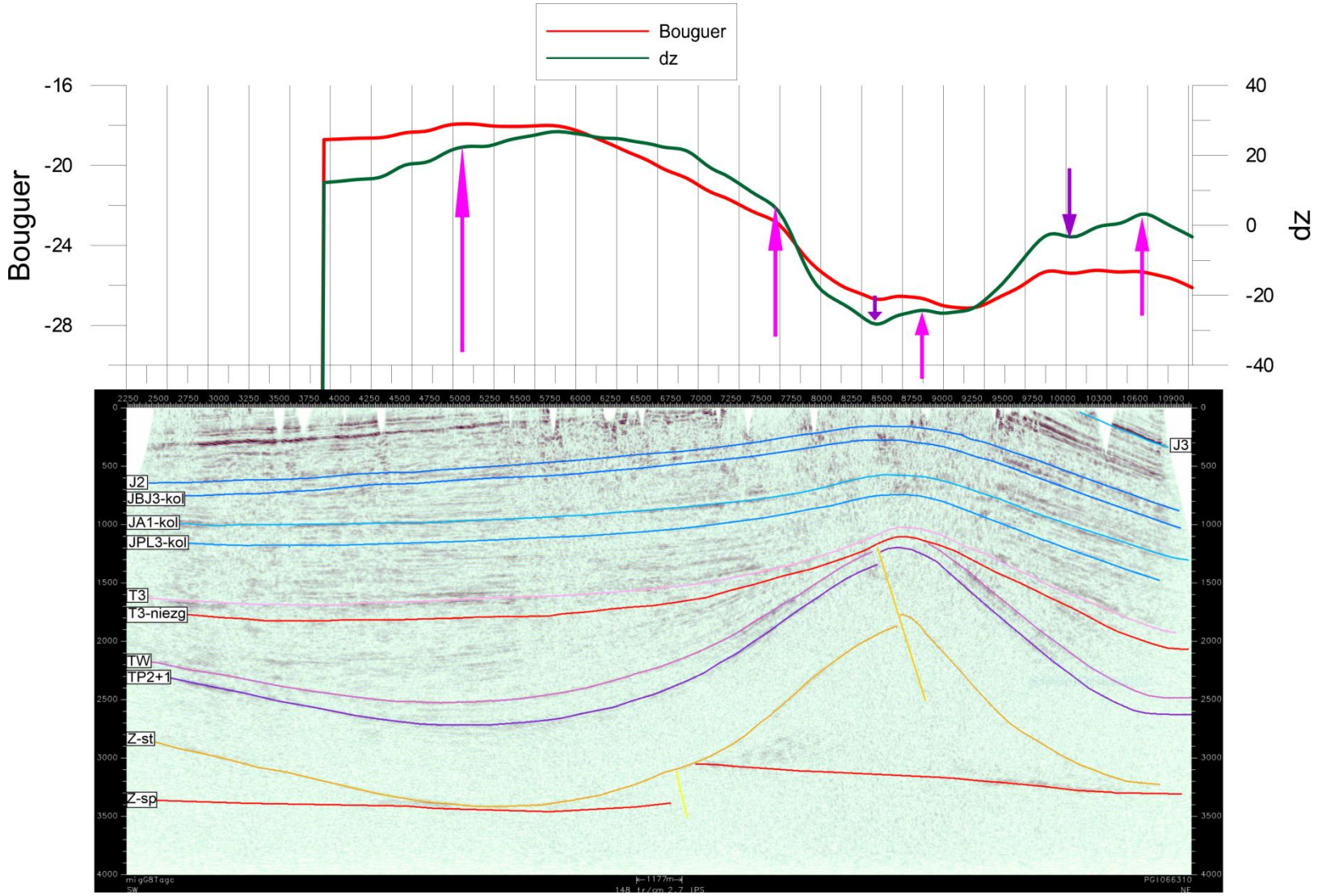


Fig. 7-66 Przekrój sejsmiczny na profilu PIG066310 oraz anomalie w redukcji Bouguera i gradientu pionowego wzdłuż tego profilu. Strzałki w górę lub w dół oznaczają lokalne zmiany gęstości (zwiększenie lub zmniejszenie), najprawdopodobniej w najpłytszej części jury (a „schodki" z lewej strony na krzywych grawimetrycznych – granicę zdjęcia szczegółowego)

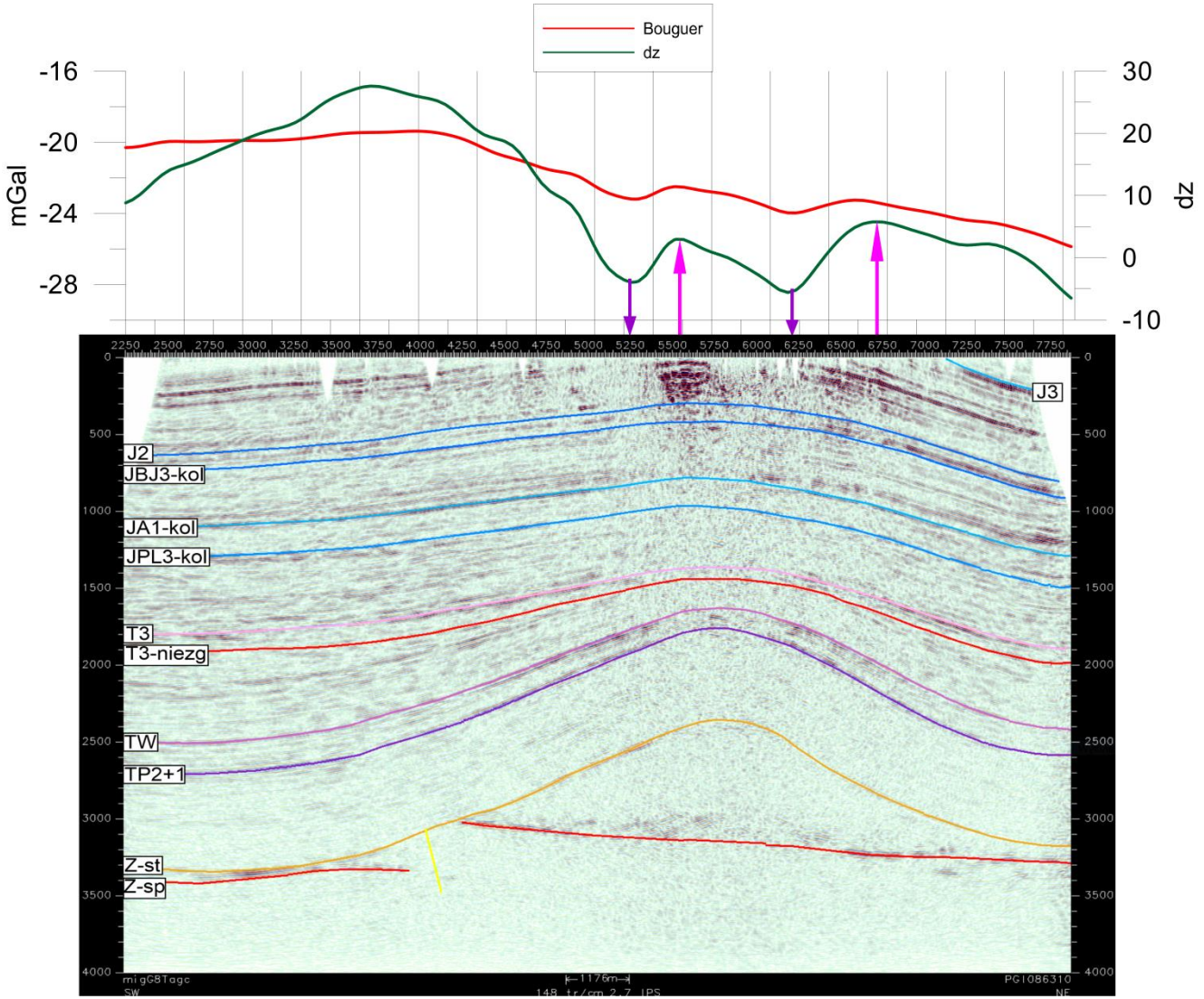


Fig. 7-67 Przekrój sejsmiczny na profilu PIG046310 oraz anomalie w redukcji Bouguera i gradientu pionowego wzdłuż tego profilu. Strzałki w górę lub w dół oznaczają lokalne zmiany gęstości (zwiększenie lub zmniejszenie), najprawdopodobniej w najpłytszej części jury

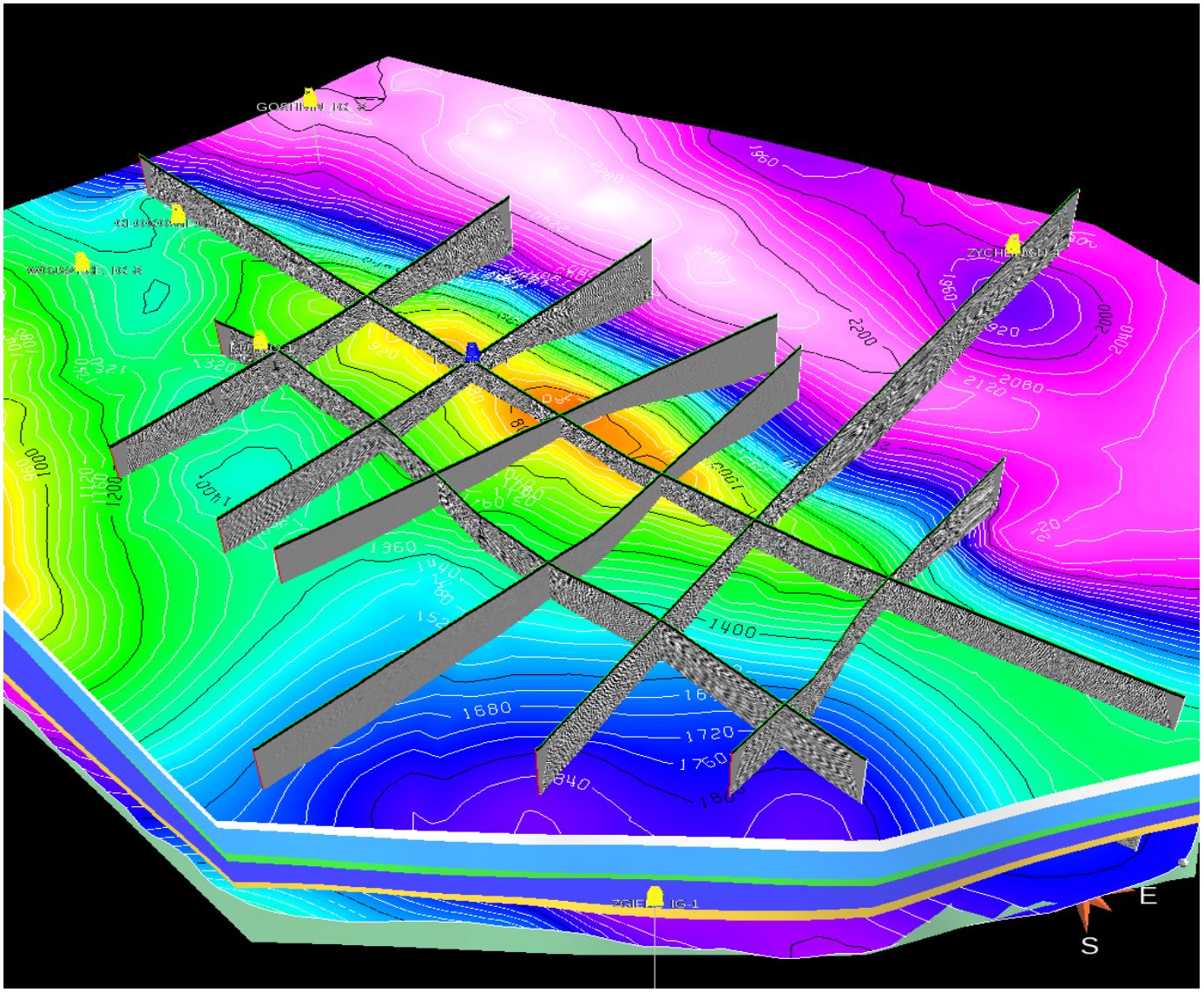


Fig. 7-68 Model geometryczny struktury Wojszyce na podstawie profili sejsmicznych (zdjęcie Wojszyce 2D) i zamieszczonych otworów

7.7 Przekroje sejsmiczno-grawimetryczne przez struktury Budziszewice-Zaosie, Konary i Bielsk-Bodzanów

(Adam Wójcicki – na podstawie danych i informacji z rozdziałów 6, 7.1, 7.2 i 7.3 oraz 4.2 i 4.5)

Niniejszy rozdział obejmuje kompleksową interpretację geologiczno-geofizyczną wzdłuż 12 profili sejsmicznych przecinających struktury Budziszewice-Zaosie (4 profile, w tym dwa połączone w jeden), Konary (4 profile) i Bielsk Bodzanów (rejon kulminacji Bielska; 4 profile).

Niezbędne do interpretacji informacje na temat charakterystyki geologiczno-złożowej poszczególnych struktur zebrano zasadniczo z opracowania „Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO_2 wraz z ich programem monitorowania" (Wójcicki i in., 2013) oraz publikacji – patrz Tabela 5-7. W rejonie struktury Bielsk-Bodzanów wykorzystano ponadto nowe informacje na temat parametrów uszczelnienia górnokredowego przedstawione w rozdziałach **4.2** i **4.5** niniejszego opracowania.

Wykorzystano wyniki interpretacji danych sejsmicznych na profilach przedstawione w rozdziale **7.1** oraz dane grawimetryczne opracowane w rozdziale **7.3** – anomalie rezydualne odnoszące się do szacunkowego przedziału głębokości występowania rozpatrywanych dla poszczególnych struktur kompleksów magazynowania/składowania oraz ich bezpośredniego nadkładu (czy też dodatkowych uszczelnień), czyli orientacyjnie 0,5-2 km oraz gridy obliczonego z tych anomalii gradientu poziomego. Ze wspomnianych gridów wycięto krzywe anomalii rezydualnych i gradientu poziomego na profilach. Na poszczególnych profilach zaznaczono maksima gradientu, które mogą być związane z występowaniem kontaktów gęstości, uskoków, wyklinowań warstw oraz zmian facji, z którymi wiążą się zmiany gęstości ośrodka geologicznego.

Profile sejsmiczne były przedmiotem wykonanego przez podwykonawcę reprocessingu, którego wyniki scharakteryzowano w rozdziale **6**.

Jako modele prędkości na profilach wykorzystano opracowane w ramach reprocessingu rozkłady prędkości składania skalibrowane danymi na temat prędkości w otworach wiertniczych, które były też podstawą do opracowania modeli rozkładu gęstości.

Prędkości składania przeliczono na prędkości interwałowe V_{int} wzorem Dixa (Dix, 1955):

$$V_{int} = [(t_2 \times V_{RMS2}^2 - t_1 \times V_{RMS1}^2) / (t_2 - t_1)]^{1/2}$$

gdzie

t_1, t_2 – czas dojścia fali do stropu i spągu interwału, a V_{RMS1}, V_{RMS2} – prędkości składania do stropu i spągu interwału.

Natomiast głębokość h_1 stropu interwału otrzymano z zależności $h_1 = t_1 \times V_{RMS1}$.

Z kolei z tak otrzymanych rozkładów prędkości interwałowych wyliczono gęstości ρ ośrodka geologicznego wzorem Gardnera: $\rho = 0{,}23 \times V_p^{1/4}$

gdzie V_p jest prędkością fali w ośrodku geologicznym.

Modele gęstościowe ośrodka geologicznego zestawiono z przeliczonymi do domeny głębokościowej (w oparciu o ww. prędkości składania) horyzontami sejsmicznymi, otrzymując modele strukturalno-gęstościowe, czyli grawimetryczne.

7.7.1 Struktura Budziszewice-Zaosie

Struktura Budziszewice-Zaosie jest rozpoznana archiwalną sejsmiką 2D z ubiegłego wieku i sześcioma otworami wykonanymi w latach 1978-1989 (Fig. 7-69). Jej parametry geologiczno-złożowe przedstawia Tabela 5-7.

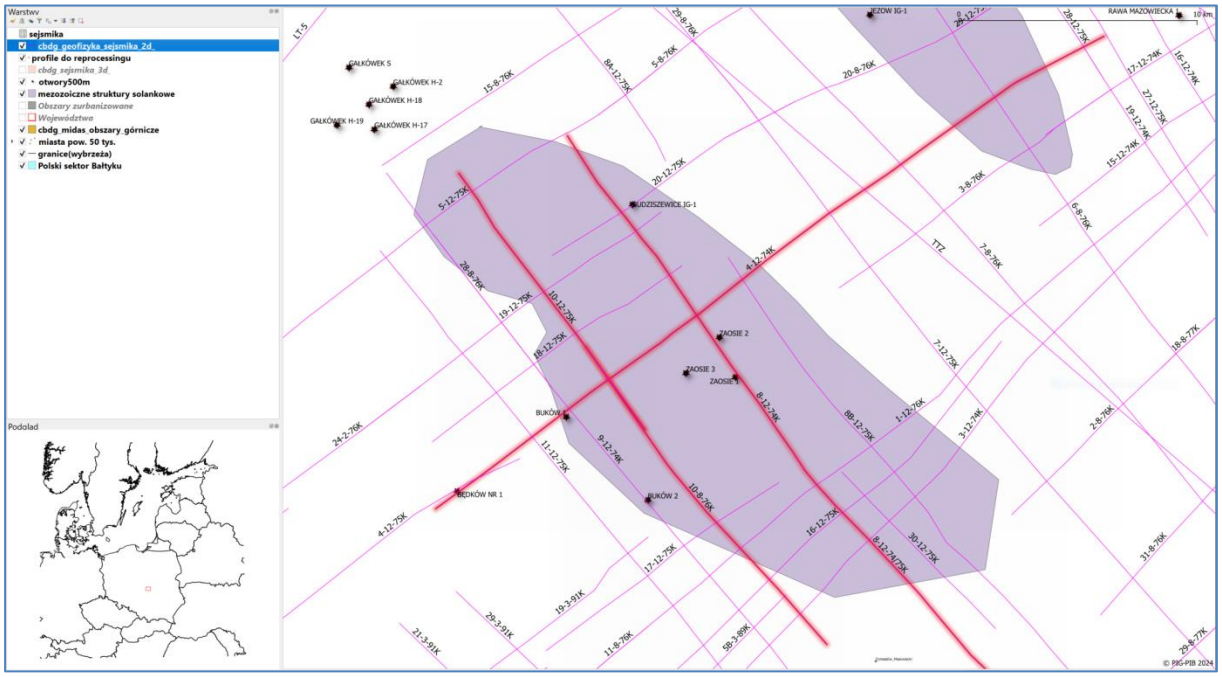


Fig. 7-69 Struktura Budziszewice-Zaosie w utworach jury (Wójcicki i in., 2013) – rozpoznanie archiwalną sejsmiką (w tym 4 profile wybrane do reprocessingu) i otworami

W obrębie jurajskiej struktury Budziszewice-Zaosie głównymi skałami zbiornikowymi są utwory piaskowcowe formacji drzewickiej (górny pliensbach) występujące w szczycie struktury na głębokości 775 m (Feldman-Olszewska [w:] Wójcicki i in., 2013). Miąższość tych utworów jest zmienna – największe miąższości obserwujemy na skrzydłach antykliny (67 m – Buków 1 i 146 m - Budziszewice IG 1), natomiast maleje ona drastycznie w kierunku szczytowej części struktury (43 m - Zaosie 1). Skałami uszczelniającymi dla tego kolektora są utwory formacji ciechocińskiej (dolny toark i najwyższy pliensbach) a na skrzydłach również górnego odcinka formacji drzewickiej. Miąższość formacji ciechocińskiej waha się od 53 m (Budziszewice IG 1) - 77 m (Buków 1) do 120 m (Zaosie 1). Dodatkowo na skrzydłach antykliny bezpośrednio nad kolektorem formacji drzewickiej występuje jeszcze około 10-15 m kompleks skał ilasto-mułowcowych najwyższego odcinka formacji drzewickiej. Drugim, nieco mniej miąższym potencjalnym poziomem kolektorskim jest górny odcinek formacji ostrowieckiej (synemur). Podobnie jak wyższy poziom zbiornikowy wykazuje on tendencję cienienia w kierunku szczytowych partii antykliny. Jego miąższość w strefach bocznych waha się w granicach 55-63 m, jednak w szczycie struktury maleje jedynie do 15 m (Zaosie 1). Bezpośrednim uszczelnieniem dla tego poziomu zbiornikowego są ilaste utwory formacji gielniowskiej (dolny pliensbach). Charakteryzują się one znaczną miąższością w szczytowych i północno-wschodnich partiach antykliny Budziszewic (do 98 m). Natomiast poziom ten ulega znacznemu cienieniu na południowo-zachodnim skłonie struktury (do około 35 m).

Analizy laboratoryjne próbek skał z otworu Buków-2 dały dla piaskowców synemuru i hettangu średnią wartość porowatości całkowitej 14% a w otworze Zaosie-2 - 20% (Wójcicki i in., 2013).

Dla piaskowców górnego pliensbachu otrzymano z analiz laboratoryjnych średnią wartość porowatości całkowitej 25%. Natomiast otrzymane z interpretacji krzywych geofizyki wiertniczej, skalibrowanych wynikami analiz laboratoryjnych, wartości porowatości całkowitej wynoszą 18% dla górnego pliensbachu i 13% dla synemuru i hettangu (Wójcicki i in., 2013).

Interpretacja przekrojów grawimetryczno-sejsmicznych (poziom odniesienia 150 m n.p.m.)

Na profilu poprzecznym do osi struktury 4-12-74K (Fig. 7-70) obserwuje się w szczycie i przegubie struktury Budziszewice-Zaosie) rozległą anomalię ujemną w obrazie anomalii rezydualnych, której założenia są najprawdopodobniej związane z podłożem kompleksów jurajskich, ostrzejszą (a więcej wiązaną z płycej występującymi ciałami zaburzającymi) w strefie na NE od przecięcia z profilem 8-12-74K, odpowiadającej przegubowi struktury. Natomiast w szczycie struktury obserwuje się strefę obniżonej gęstości w utworach jury górnej i środkowej. Maksima gradientu poziomego zaznaczają się na profilu na SW i NE od otworu Buków 1, gdzie jak to sugerują archiwalne mapy sejsmiczne (rozdział **7.2**), w podłożu kompleksów jurajskich występują strefy uskokowe. Według zestawione na rysunku interpretacji danych sejsmicznych strefy te nie kontynuują się w obrębie jury, jednakże wąskie i o znacznej amplitudzie anomalie gradientu poziomego sugerują znaczące zmiany gęstości w obrębie kompleksów jurajskich, co jest też widoczne na przekroju gęstościowym, a jeszcze wyraźniej, jeśli chodzi o prędkości.

Na profilu podłużnym do osi struktury 8-12-74K (Fig. 7-71) obserwuje się anomalię ujemną w obrazie anomalii rezydualnych na SW od otworu Zaosie 1, a więc w pobliżu szczytu struktury. Obserwuje się szereg maksimów gradientu poziomego, co w powiązaniu z rozkładami prędkości i gęstości sugeruje poziome zmiany gęstości w obrębie utworów jury.

Na podłużnym profilu łączonym 10-8-76K i 10-12-75K (Fig. 7-72) widoczny jest wzrost gęstości i prędkości w ośrodku geologicznym w kierunku na SW, korelujący się w coraz to większymi wartościami krzywej anomalii rezydualnych. Szeroka anomalia gradientu poziomego sugeruje pozioma zmianę gęstości w obrębie podłoża jury.

Nieregularny obraz horyzontów sejsmicznych przeliczonych do domeny głębokościowej (i zestawionych z rozkładami gęstości na profilach), zwłaszcza najgłębiej występujących, związanych jest z drobnymi niedoskonałościami opracowanych w ramach reprocessingu rozkładów prędkości składania, wykorzystanych w modelach prędkości. Generalnie konwersję czasowo-głębokościową wykonywano z myślą o jakościowym zobrazowaniu geometrii struktur, w tym ich zamknięć.

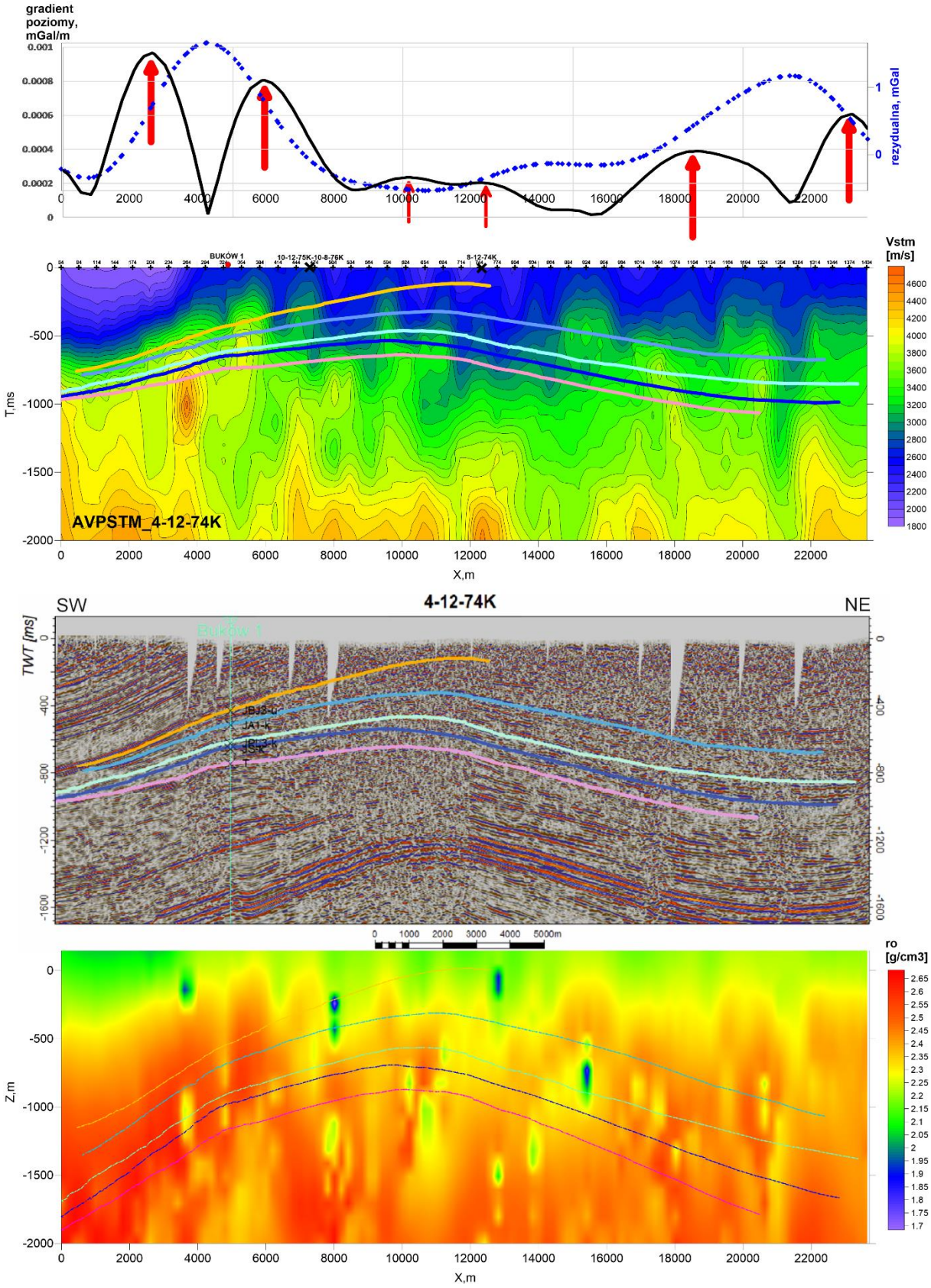


Fig. 7-70 Przekrój sejsmiczno-grawimetryczny na profilu 4-12-74K; od góry: krzywe anomalii rezydualnych dla orientacyjnego przedziału głębokości 0,5-2 km i gradientu poziomego (strzałki wskazują jego maksima), rozkład prędkości składania w domenie czasu z nałożonymi wyinterpretowanymi horyzontami sejsmicznymi, interpretacja sejsmiki na przekroju w domenie czasu, rozkład gęstości określony na podstawie prędkości składania (dowiązanych do otworów) z nałożonymi horyzontami sejsmicznymi w domenie głębokości

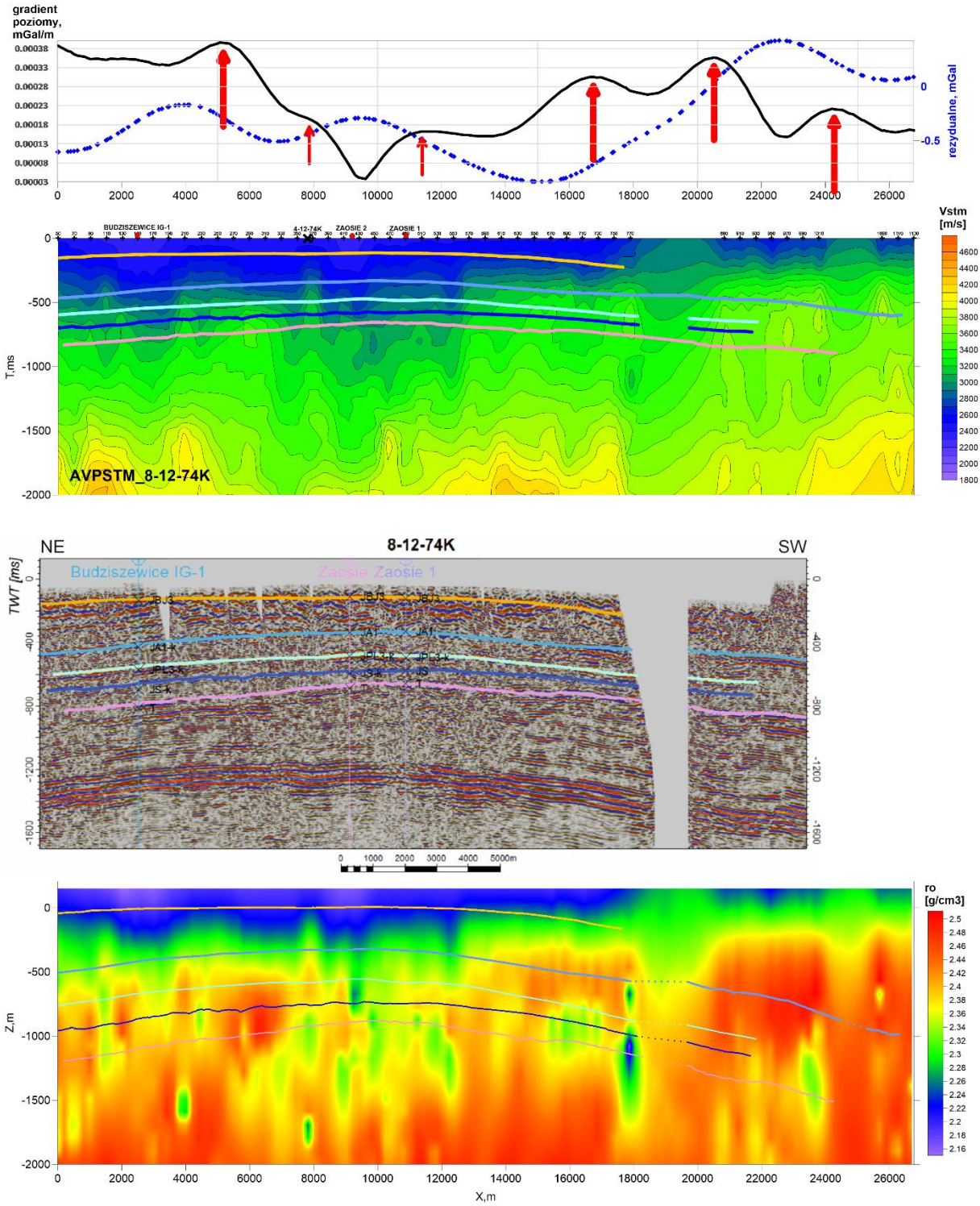


Fig. 7-71 Przekrój sejsmiczno-grawimetryczny na profilu 8-12-74K; od góry: krzywe anomalii rezydualnych dla orientacyjnego przedziału głębokości 0,5-2 km i gradientu poziomego (strzałki wskazują jego maksima), rozkład prędkości składania w domenie czasu z nałożonymi wyinterpretowanymi horyzontami sejsmicznymi, interpretacja sejsmiki na przekroju w domenie czasu, rozkład gęstości określony na podstawie prędkości składania (dowiązanych do otworów) z nałożonymi horyzontami sejsmicznymi w domenie głębokości

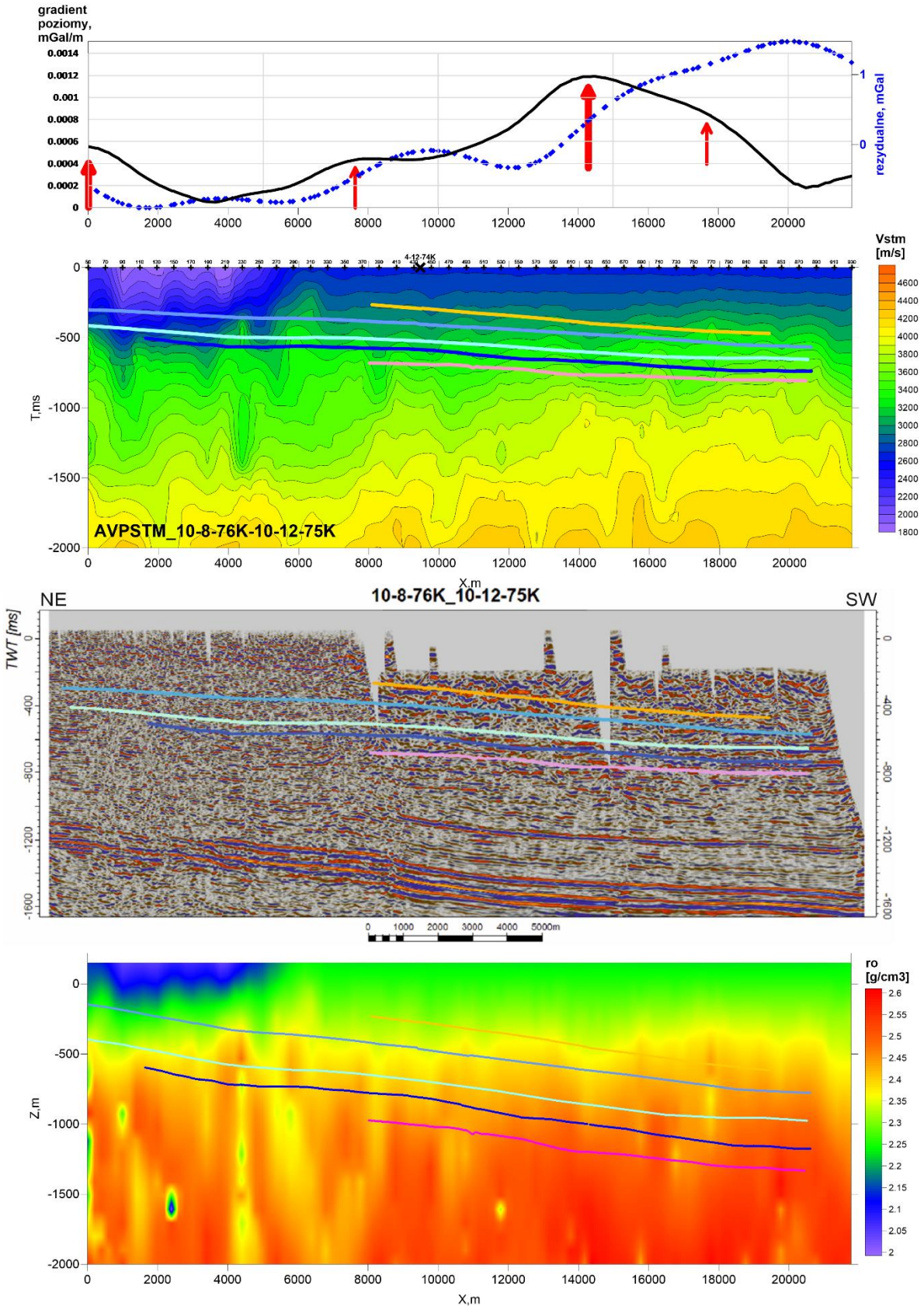


Fig. 7-72 Przekrój sejsmiczno-grawimetryczny na połączonych profilach 10-8-76K i 10-12-75K; od góry: krzywe anomalii rezydualnych dla orientacyjnego przedziału głębokości 0,5-2 km i gradientu poziomego (strzałki wskazują jego maksima), rozkład prędkości składania w domenie czasu z nałożonymi wyinterpretowanymi horyzontami sejsmicznymi, interpretacja sejsmiki na przekroju w domenie czasu, rozkład gęstości określony na podstawie prędkości składania (dowiązanych do otworów) z nałożonymi horyzontami sejsmicznymi w domenie głębokości

7.7.2 Struktura Konary

Struktura jurajska Konary jest rozpoznana archiwalną sejsmiką 2D z ubiegłego wieku i dwoma głębokimi otworami wykonanymi w latach 1973 i 1984 (Konary IG-1 i Byczyna 1) oraz jednym płytszym, z roku 1930 (Szczebłotowo) (Fig. 7-73). Jej parametry geologiczno-złożowe przedstawia Tabela 5-7.

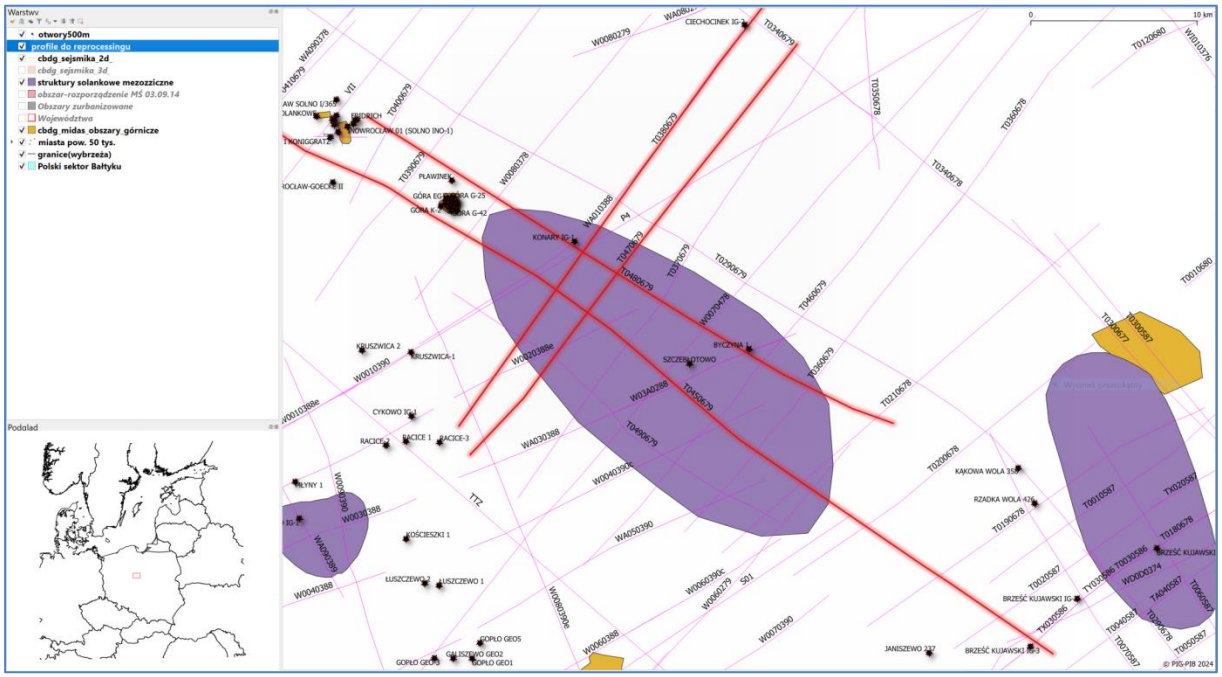


Fig. 7-73 Struktura Konary w utworach jury (Wójcicki i in., 2013) – rozpoznanie archiwalną sejsmiką (w tym 4 profile wybrane do reprocessingu) i otworami

Poduszka solna (antyklina) Konar zlokalizowana jest w przylegającym do niecki mogileńskiej gniewkowskim odcinku wału kujawskiego (Feldman-Olszewska [w:] Wójcicki i in., 2013). Na jej obszarze odwiercono dwa otwory Konary IG 1 w szczycie struktury i Byczyna 1 na jej skłonie. W dolnym i środkowym odcinku profilu jury dolnej (hetang – pliensbach) stwierdzono kilka poziomów piaskowcowych o odpowiedniej miąższości. Jeden w obrębie formacji zagajskiej (hetang), jeden w formacji skłobskiej (hetang), 4-5 w formacji ostrowieckiej (synemur i najniższy hetang) i jeden w formacji drzewickiej (górny pliensbach), której strop występuje na głębokości 1105 m w otworze Konary IG-1. Miąższość tych poziomów waha się od 31,0 m do 46,5 m. W otworze Byczyna 1 formacja drzewicka wykształcona jest całkowicie jako piaskowce i ma miąższość 82,0 m. Dla tych piaskowców uzyskano tylko jeden wynik porowatości równy 12.63% i przepuszczalności 22,71 mD. Wymienione poziomy zbiornikowe przykrywa kompleks iłowcowo-mułowcowy formacji ciechocińskiej o miąższości 97,5-129,5 m. Jego własności petrofizyczne nie były badane. Powyżej występuje poziom zbiornikowy o znacznej miąższości (98,0-205,5 m), utworzony z piaskowców formacji borucickiej (toark górny) i w niewielkim procencie aalenu dolnego, na głębokości 847 m w otworze Konary IG-1. Wyniki porowatości uzyskane dla dwóch próbek wynoszą 18,36% i 25,5%, przepuszczalności 1,78 mD i 830,08 mD. Omówiony kolektor oddzielają od następnego iłowce górnego aalenu, które ze względu na zbyt małą miąższość (20,0-33,0 m) mogą stanowić jedynie wspomagający poziom uszczelniający. Położone powyżej piaskowce bajosu dolnego tworzą cieniejący ku szczycie antykliny kolektor o miąższości 21,0-39,0 m. Najwyższy i zarazem główny poziom uszczelniający tworzą skały drobnoziarniste bajosu górnego (25,5 - 117,0 m) i batonu dolnego oraz

środkowego (65,0-98,5 m). Rozdzielone są one przez kilkunastometrowy kompleks piaskowców i heterolitów. Badania dwóch próbek iłowców bajosu górnego z wiercenia Byczyna 1 dały porowatość 6,98% i 7,25% oraz przepuszczalność 0,019 mD i 0,163 mD (Feldman-Olszewska [w:] Wójcicki i in., 2013).

Interpretacja przekrojów grawimetryczno-sejsmicznych (poziom odniesienia 0 m n.p.m.)

Zadziwiające jest podobieństwo rozkładów anomalii grawimetrycznych gradientu poziomego na profilach poprzecznych T0380679 (Fig. 7-74) i T0470679 (Fig. 7-76) do rozkładu gradientu poziomego na profilu poprzecznym 4-12-74K (Fig. 7-70) przecinającym strukturę Budziszewice-Zaosie. Charakterystyczne jest występowanie anomalii dodatnich gradientu poziomego o wysokiej amplitudzie na SW skłonie i przegubie antykliny, zapewne związanych ze strefami uskokowymi w podłożu kompleksów jury lub w ich dolnych partiach, zaś w szczycie i na SE od niego występują ujemne anomalie rezydualne, sugerujące obniżenie gęstości w obrębie kompleksów jury. Strefy ujemnych anomalii rezydualnych na obu profilach poprzecznych przecinających strukturę Konary generalnie korelują się lokalnymi obniżeniami prędkości i gęstości w obrębie utworów jury środkowej. Na profilach podłużnych T0450679 (Fig. 7-75) i T0480679 (Fig. 7-77), anomalie gradientu poziomego na ogół nie są tak ostre jak na poprzecznych co sugeruje głębsze ich założenia, a rozkłady prędkości i gęstości odzwierciedlają zapadanie kompleksów jury w kierunku na SE.

Nieregularny obraz horyzontów sejsmicznych przeliczonych do domeny głębokościowej (i zestawionych z rozkładami gęstości na profilach), zwłaszcza najgłębiej występujących, związanych jest z drobnymi niedoskonałościami opracowanych w ramach reprocessingu rozkładów prędkości składania, wykorzystanych w modelach prędkości. Generalnie konwersję czasowo-głębokościową wykonywano z myślą o jakościowym zobrazowaniu geometrii struktur, w tym ich zamknięć.

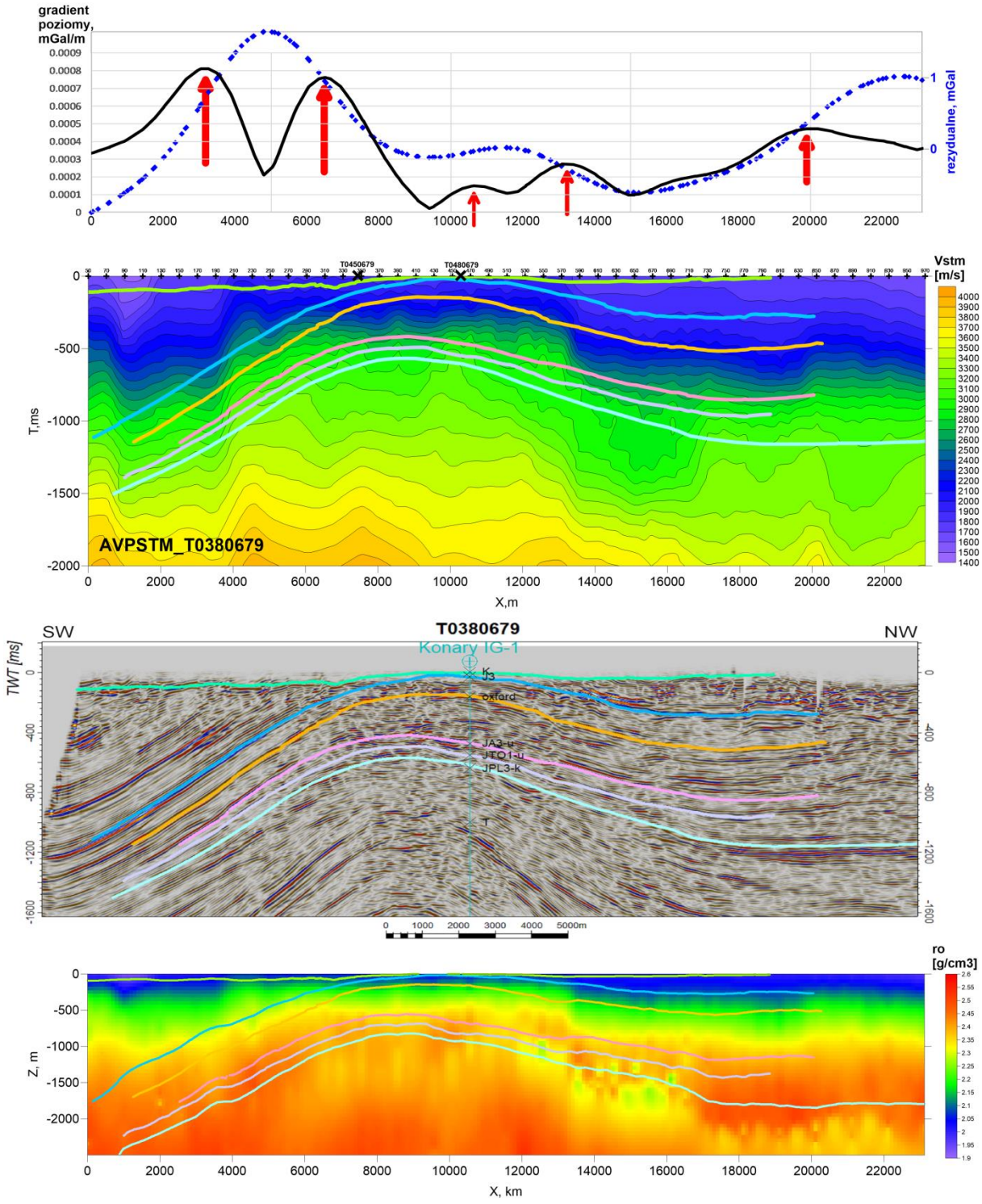


Fig. 7-74 Przekrój sejsmiczno-grawimetryczny na profilu T0380679; od góry: krzywe anomalii rezydualnych dla orientacyjnego przedziału głębokości 0,5-2 km i gradientu poziomego (strzałki wskazują jego maksima), rozkład prędkości składania w domenie czasu z nałożonymi wyinterpretowanymi horyzontami sejsmicznymi, interpretacja sejsmiki na przekroju w domenie czasu, rozkład gęstości określony na podstawie prędkości składania (dowiązanych do otworów) z nałożonymi horyzontami sejsmicznymi w domenie głębokości

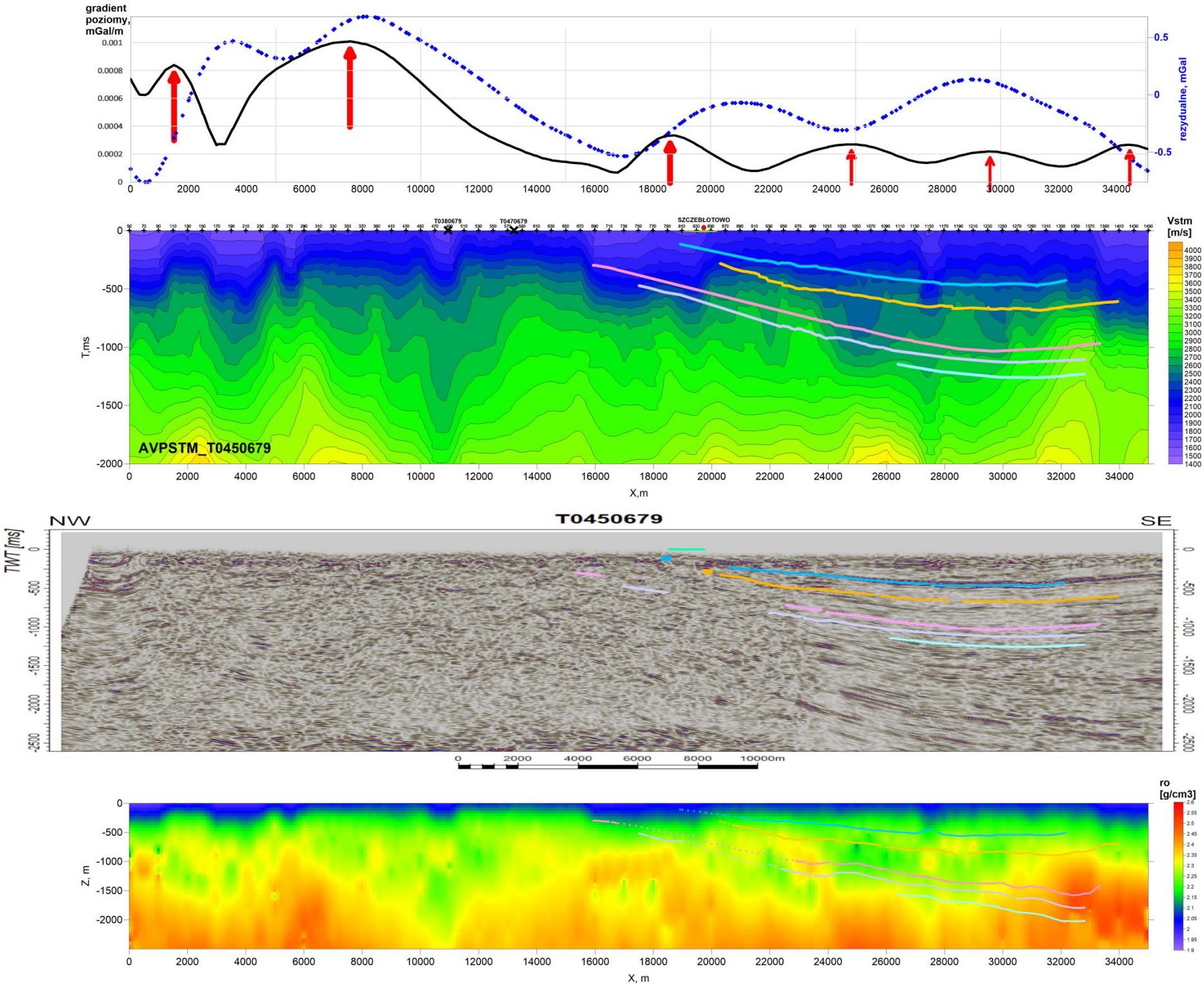


Fig. 7-75 Przekrój sejsmiczno-grawimetryczny na profilu T0450679; od góry: krzywe anomalii rezydualnych dla orientacyjnego przedziału głębokości 0,5-2 km i gradientu poziomego (strzałki wskazują jego maksima), rozkład prędkości składania w domenie czasu z nałożonymi wyinterpretowanymi horyzontami sejsmicznymi, interpretacja sejsmiki na przekroju w domenie czasu, rozkład gęstości określony na podstawie prędkości składania (dowiązanych do otworów) z nałożonymi horyzontami sejsmicznymi w domenie głębokości

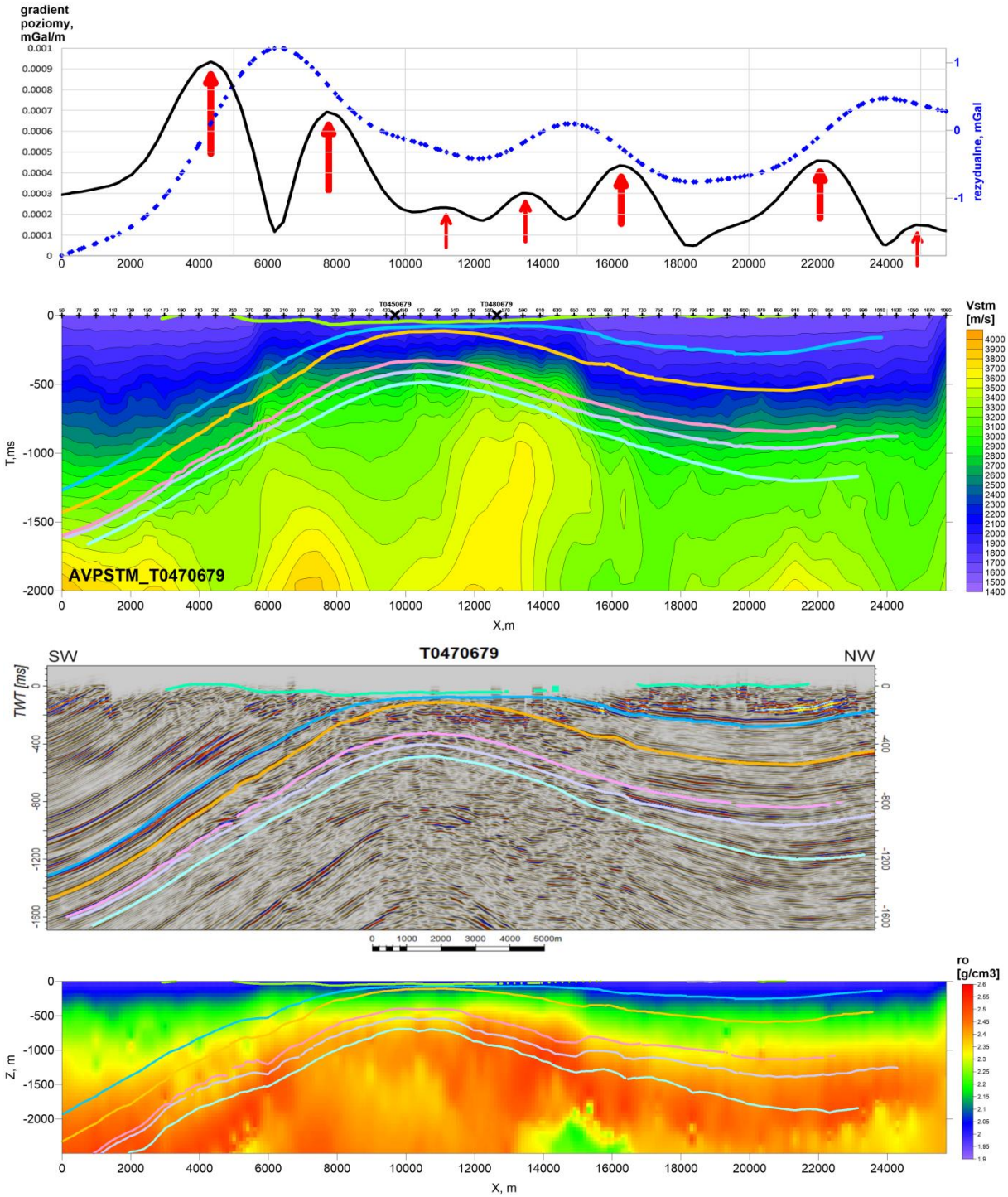


Fig. 7-76 Przekrój sejsmiczno-grawimetryczny na profilu T0470679; od góry: krzywe anomalii rezydualnych dla orientacyjnego przedziału głębokości 0,5-2 km i gradientu poziomego (strzałki wskazują jego maksima), rozkład prędkości składania w domenie czasu z nałożonymi wyinterpretowanymi horyzontami sejsmicznymi, interpretacja sejsmiki na przekroju w domenie czasu, rozkład gęstości określony na podstawie prędkości składania (dowiązanych do otworów) z nałożonymi horyzontami sejsmicznymi w domenie głębokości

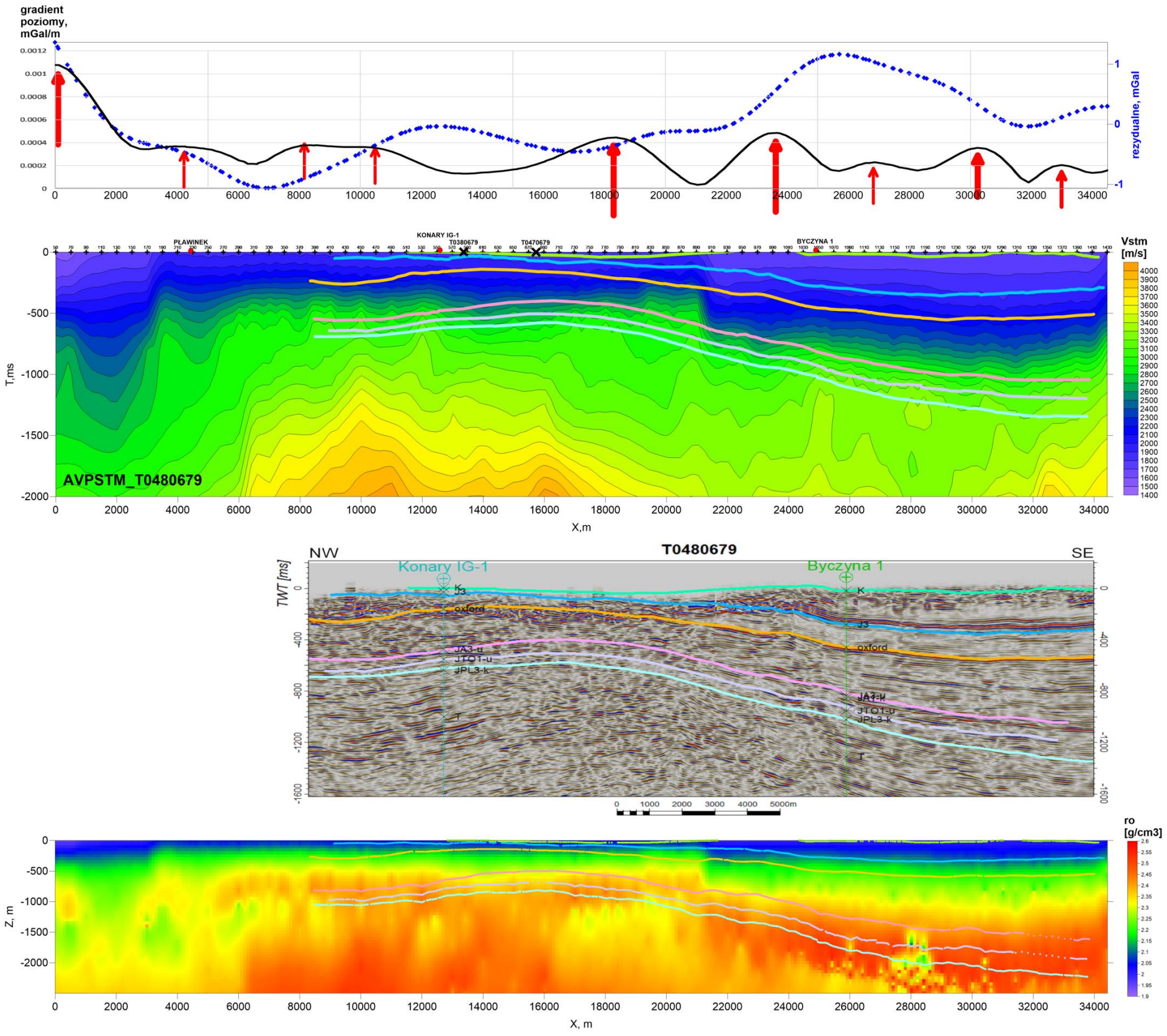


Fig. 7-77 Przekrój sejsmiczno-grawimetryczny na profilu T0480679; od góry: krzywe anomalii rezydualnych dla orientacyjnego przedziału głębokości 0,5-2 km i gradientu poziomego (strzałki wskazują jego maksima), rozkład prędkości składania w domenie czasu z nałożonymi wyinterpretowanymi horyzontami sejsmicznymi, interpretacja sejsmiki na przekroju w domenie czasu, rozkład gęstości określony na podstawie prędkości składania (dowiązanych do otworów) z nałożonymi horyzontami sejsmicznymi w domenie głębokości

7.7.3 Struktura Bielsk-Bodzanów

Kulminacja Bielska struktury kredowej Bielsk-Bodzanów rozpoznana jest archiwalną sejsmiką 2D z ubiegłego wieku i dwoma głębokimi otworami wykonanymi w latach 1966 i 1995 (Bielsk 1 i Bielsk 2) oraz kilkoma w jej sąsiedztwie, przy czym do interpretacji sejsmiki (rozdział **7.1**) wykorzystano głęboki otwór Bodzanów IG-1 z 1982 roku (Fig. 7-78). Parametry geologiczno-złożowe struktury przedstawia Tabela 5-7.

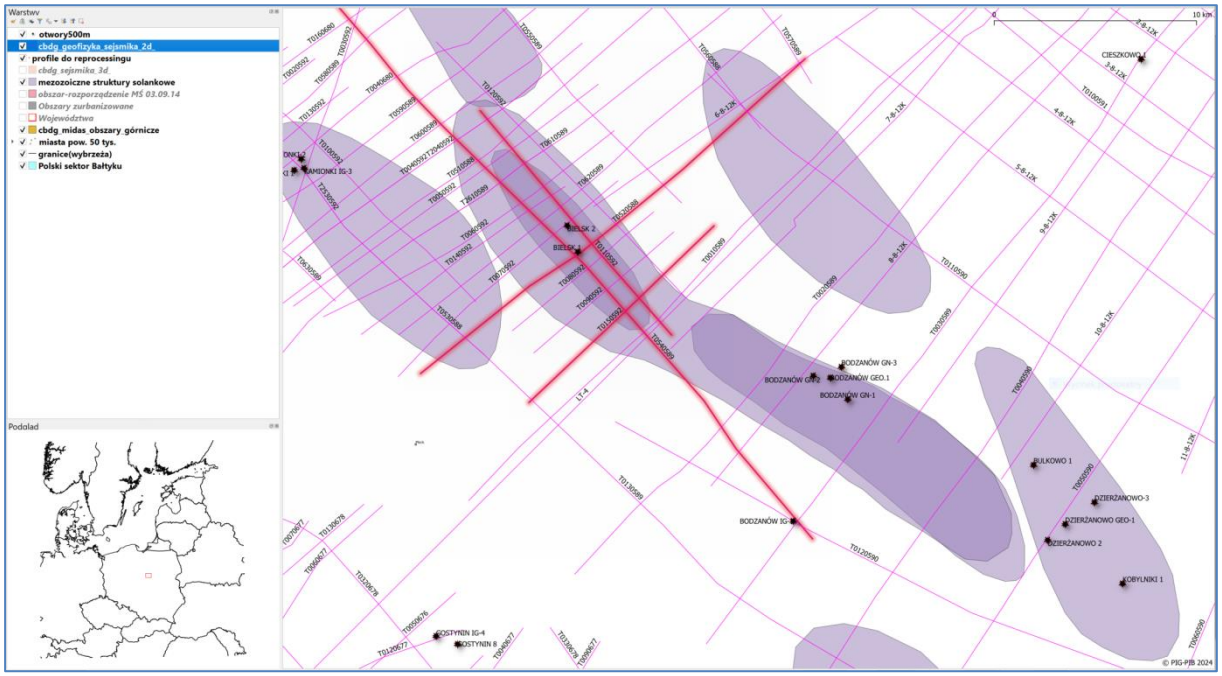


Fig. 7-78 Struktura Bielsk-Bodzanów w utworach kredy i jury (Wójcicki i in., 2013) – rozpoznanie archiwalną sejsmiką (w tym 4 profile wybrane do reprocessingu, przecinające kulminację Bielska) i otworami

W obrębie struktury kredowej kolektorem jest piaszczysta formacja mogileńska kredy dolnej (alb środkowy-barrem), o miąższości rzędu 150 m (w tym ok. 128 m piaskowców), która jest bardzo dobrym poziomem zbiornikowym ze względu na odpowiednio wysokie parametry porowatości i przepuszczalności skał (porowatość osiąga 30%, a przepuszczalność 1000 mD), występująca na głębokości 1159 m w otworze Bielsk 1. Jej uszczelnieniem jest natomiast występująca węglanowa i węglanowo-krzemionkowa sekwencja górnej kredy (rozdział **4.2**) o sumarycznej miąższości rzędu 800-900 m, przy czym kompleksy iłowców-mułowców-margli oraz opok mają miąższość rzędu 150 m, zaś większość profilu sekwencji stanowią wapienie i wapienie margliste. Przestrzeń porową tych skał charakteryzuje znaczny udział nanoporów, pomierzone przepuszczalności są najczęściej rzędu 0,1 mD (rozdział **4.5**).

W jurze środkowej i dolnej stwierdzono obecność kilku poziomów zbiornikowych przykrytych 1-4 poziomami uszczelniającymi (Feldman-Olszewska [w:] Wójcicki i in., 2013). Najwyższy poziom zbiornikowy, występujący na głębokości ponad 2300 m, zbudowany jest z dwóch połączonych kompleksów piaskowcowych, położonych w profilu w bezpośrednim następstwie: aalenu dolnego (piaskowce bardzo drobnoziarniste) oraz formacji borucickiej (toark górny; piaskowce drobnoziarniste oraz grubszych frakcji). Porowatość w obrębie tego kompleksu jest rzędu 20%, a przepuszczalność sięga 200-300 mD. Jego miąższość w rejonie kulminacji Bielska sięga 220 m. Omawiany poziom zbiornikowy uszczelniony jest od góry przez utwory drobnoziarniste (iłowce, łupki ilaste i mułowce masywne) aalenu górnego i prawdopodobnie najniższego odcinka bajosu dolnego

o miąższości 40,0-59,0 m oraz dodatkowo przez nieco mniej miąższy kompleks łupków i mułowców ilastych środkowego odcinka bajosu górnego. Poniżej kolektora aalenu dolnego i formacji borucickiej (górny toark) występuje formacja borucicka stanowiąca uszczelnienie dla głębiej występujących kolektorów dolnej jury.

Interpretacja przekrojów grawimetryczno-sejsmicznych (poziom odniesienia 100 m n.p.m.)

Na wszystkich czterech profilach przecinających kulminację Bielska (Fig. 7-79 – Fig. 7-82) struktury Bielsk-Bodzanów charakterystyczne jest występowanie relatywnie niskich (w porównaniu do tych na strukturach Budziszewice-Zaosie i Konary) anomalii gradientu poziomego. Patrząc na rozkłady prędkości, obraz i interpretację sejsmiki oraz rozkład gęstości można wysnuć wniosek, że anomalie te są związane z silnie zuskokowanymi kompleksami jurajskim. Na przekrojach poprzecznych T0150592 (Fig. 7-80) i T0520592 (Fig. 7-81) obserwuje ujemne rezydualne anomalie grawimetryczne w szczytach i przegubach struktur, gdzie widoczne są też lokalne obniżenia prędkości i gęstości w utworach jury, zaś maksima gradientu poziomego odpowiadają strefom uskokowym po obu stronach rowu dochodzącym według sejsmiki do spągu kredy. Jest to zwłaszcza widoczne na profilu T0380679. Podobnie na profilu T540589 (Fig. 7-82) obserwuje się w rejonie otworu Bielsk 1 i na SE od niego ujemną rezydualną anomalię grawimetryczną oraz lokalne obniżenie prędkości i gęstości w obrebie utworów jury. Na profilu T0110592 (Fig. 7-79) obserwuje się strefę maksimum gradientu poziomego, której nie odpowiada żaden uskok w obrazie sejsmiki w obrębie utworów jury. Zmienność (na ogół niezbyt znaczna) prędkości i gęstości w obrębie utworów kredy należy raczej wiązać ze zmianami fakcjalnymi niż tektoniką.

Nieregularny obraz horyzontów sejsmicznych przeliczonych do domeny głębokościowej (i zestawionych z rozkładami gęstości na profilach), zwłaszcza najgłębiej występujących, związanych jest z drobnymi niedoskonałościami opracowanych w ramach reprocessingu rozkładów prędkości składania, wykorzystanych w modelach prędkości. Zapewne niemały, zakłócający, wpływ miała tu skomplikowana tektonika w obrębie utworów jury. Generalnie konwersję czasowo-głębokościową wykonywano z myślą o jakościowym zobrazowaniu geometrii struktur, w tym ich zamknięć.

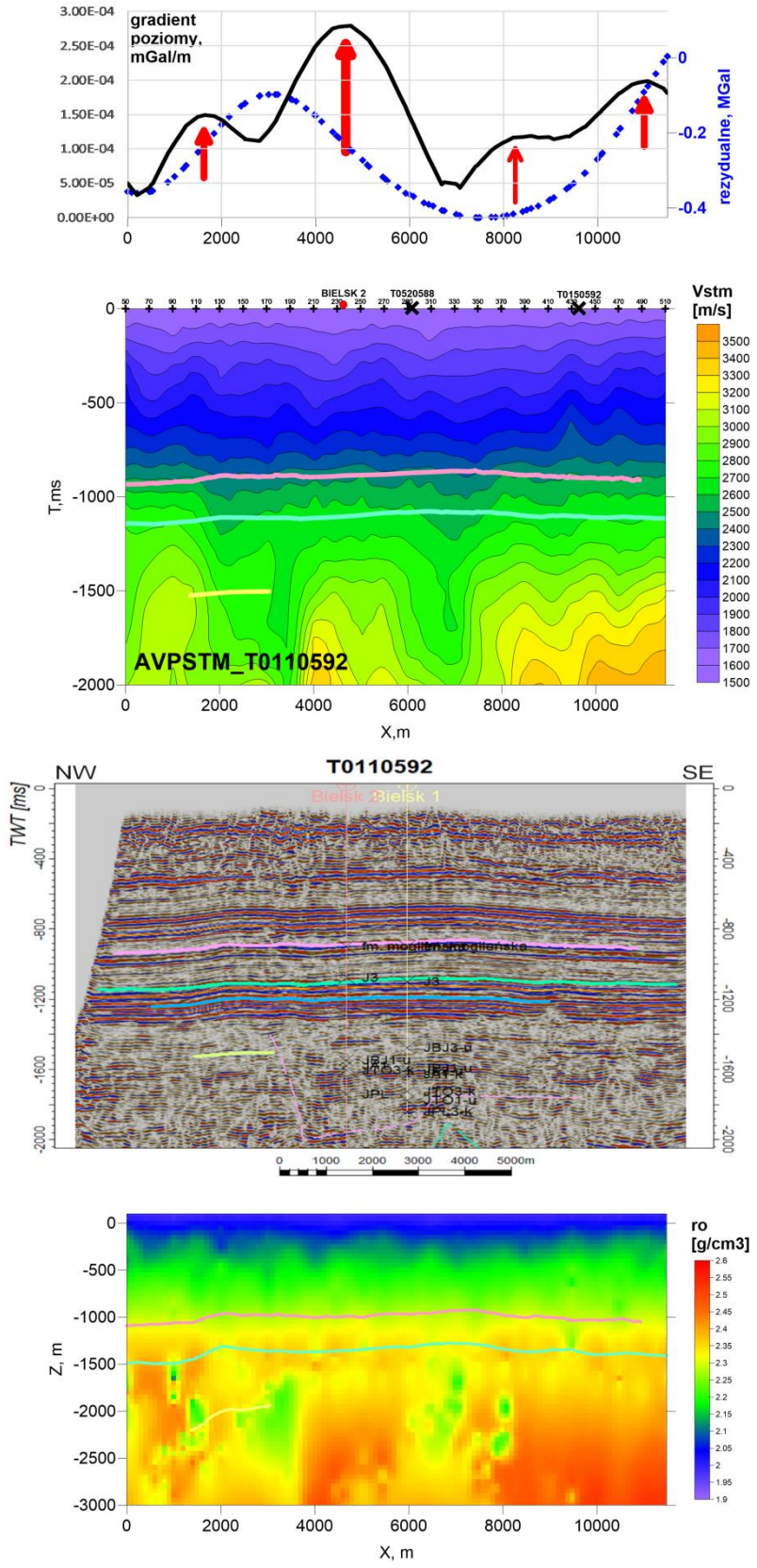


Fig. 7-79 Przekrój sejsmiczno-grawimetryczny na profilu T0110592; od góry: krzywe anomalii rezydualnych dla orientacyjnego przedziału głębokości 0,5-2 km i gradientu poziomego (strzałki wskazują jego maksima), rozkład prędkości składania w domenie czasu z nałożonymi wyinterpretowanymi horyzontami sejsmicznymi, interpretacja sejsmiki na przekroju w domenie czasu, rozkład gęstości określony na podstawie prędkości składania (dowiązanych do otworów) z nałożonymi horyzontami sejsmicznymi w domenie głębokości

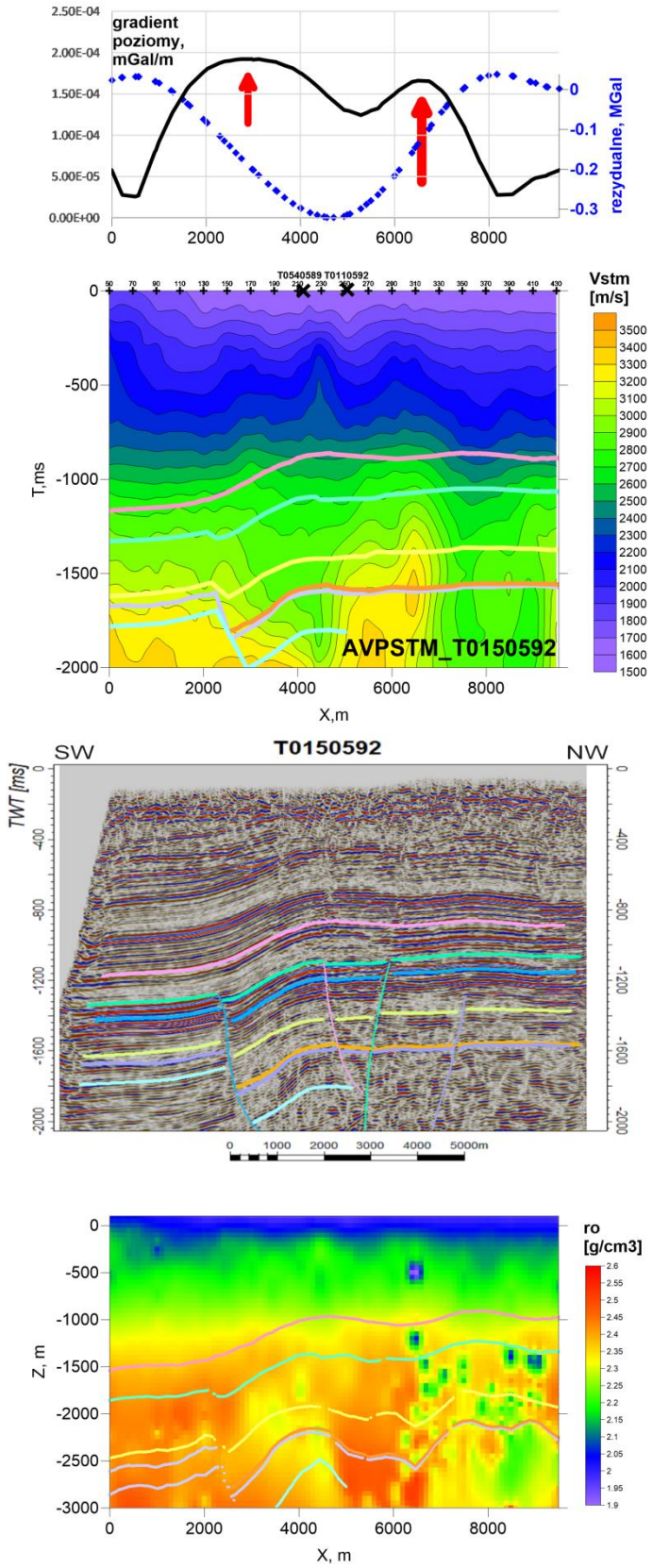


Fig. 7-80 Przekrój sejsmiczno-grawimetryczny na profilu T0150592; od góry: krzywe anomalii rezydualnych dla orientacyjnego przedziału głębokości 0,5-2 km i gradientu poziomego (strzałki wskazują jego maksima), rozkład prędkości składania w domenie czasu z nałożonymi wyinterpretowanymi horyzontami sejsmicznymi, interpretacja sejsmiki na przekroju w domenie czasu, rozkład gęstości określony na podstawie prędkości składania (dowiązanych do otworów) z nałożonymi horyzontami sejsmicznymi w domenie głębokości

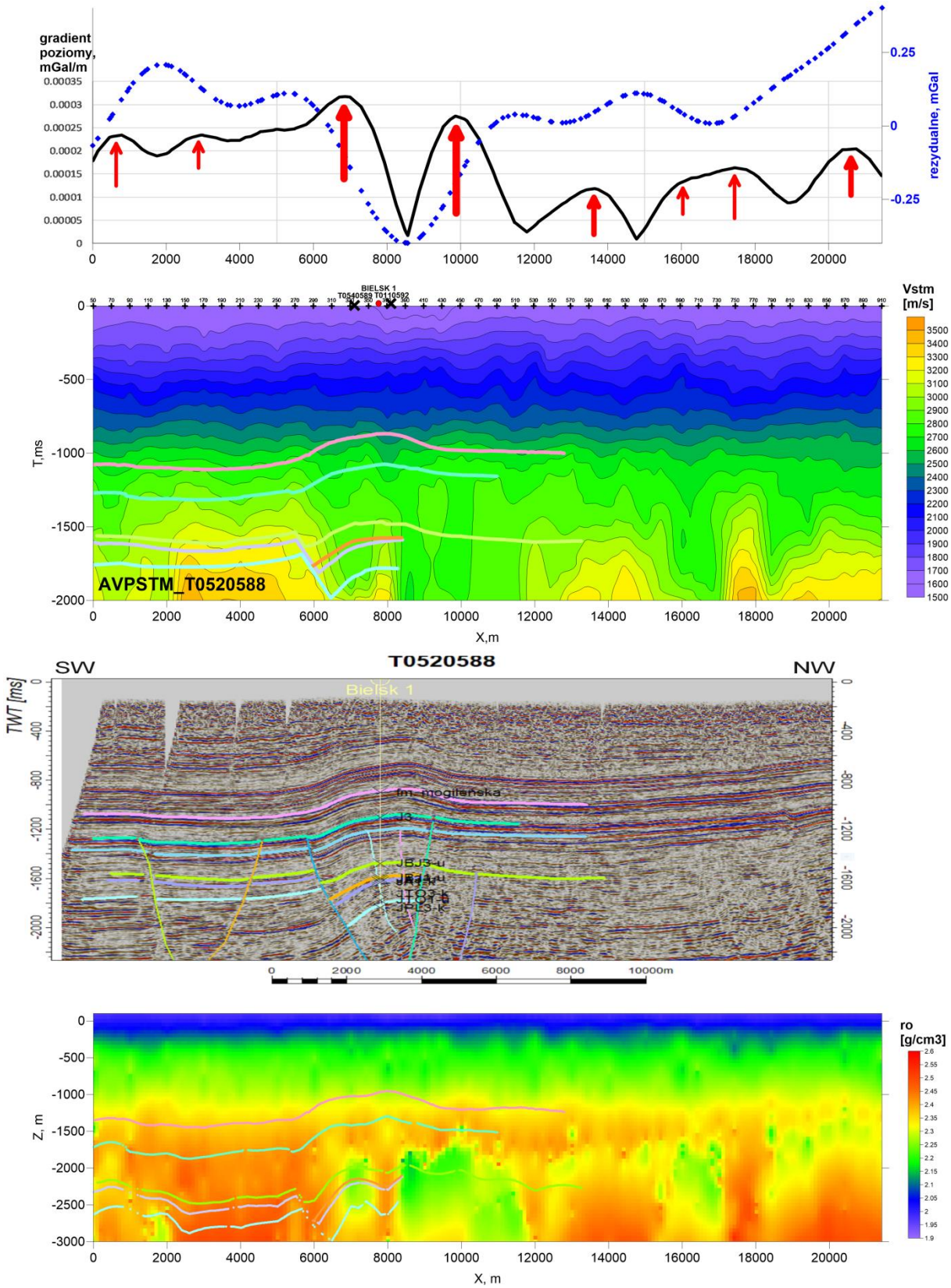


Fig. 7-81 Przekrój sejsmiczno-grawimetryczny na profilu T0520588; od góry: krzywe anomalii rezydualnych dla orientacyjnego przedziału głębokości 0,5-2 km i gradientu poziomego (strzałki wskazują jego maksima), rozkład prędkości składania w domenie czasu z nałożonymi wyinterpretowanymi horyzontami sejsmicznymi, interpretacja sejsmiki na przekroju w domenie czasu, rozkład gęstości określony na podstawie prędkości składania (dowiązanych do otworów) z nałożonymi horyzontami sejsmicznymi w domenie głębokości

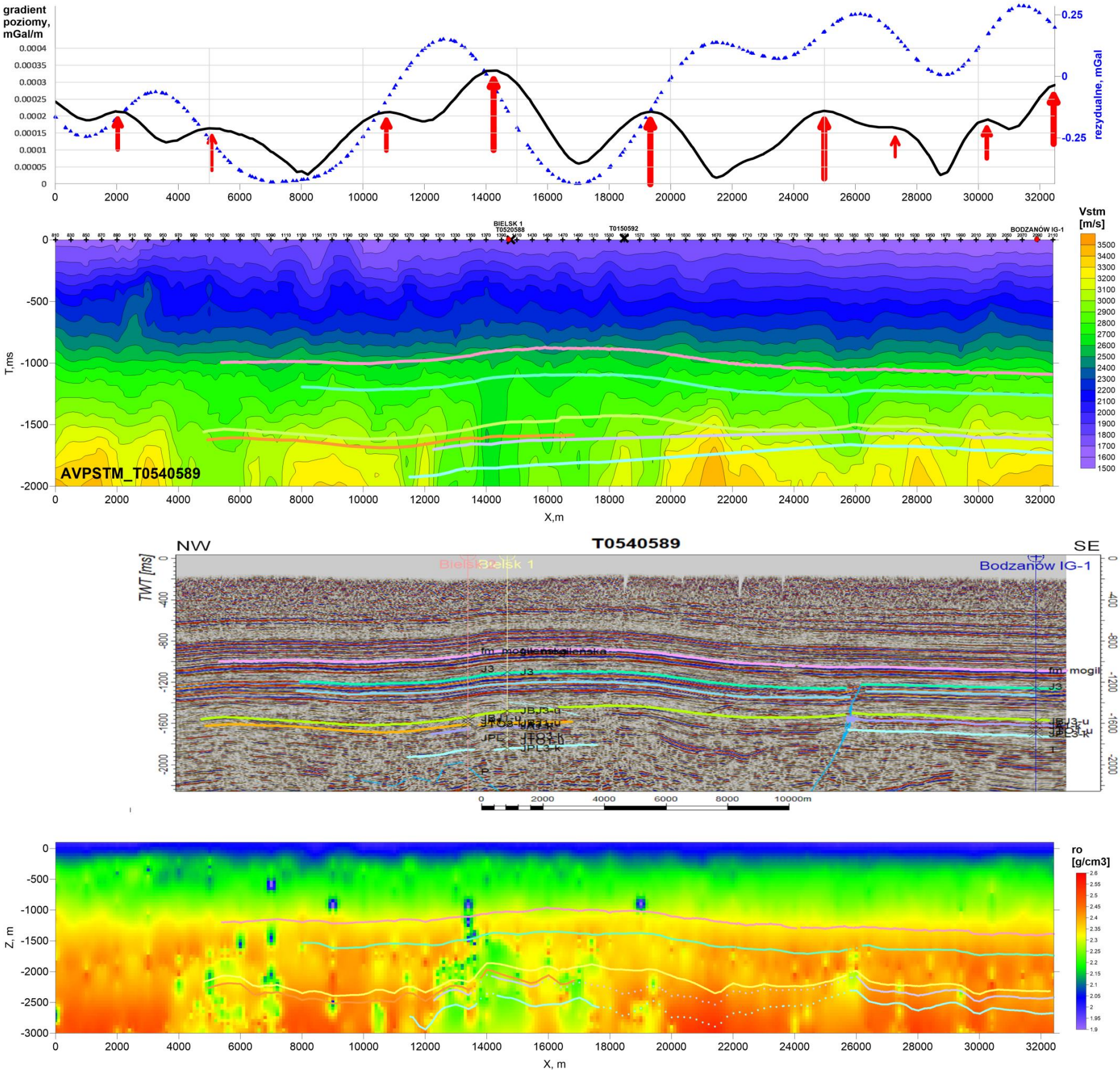


Fig. 7-82 Przekrój sejsmiczno-grawimetryczny na profilu T0540589; od góry: krzywe anomalii rezydualnych dla orientacyjnego przedziału głębokości 0,5-2 km i gradientu poziomego (strzałki wskazują jego maksima), rozkład prędkości składania w domenie czasu z nałożonymi wyinterpretowanymi horyzontami sejsmicznymi, interpretacja sejsmiki na przekroju w domenie czasu, rozkład gęstości określony na podstawie prędkości składania (dowiązanych do otworów) z nałożonymi horyzontami sejsmicznymi w domenie głębokości

7.8 Podsumowanie

(Adam Wójcicki, Sylwia Kijewska, Dominika Sieradz, Leszek, Skowroński, Olga Rosowiecka, Zdzisław Petecki, Marek Jarosiński, Kinga Bobek)

Do interpretacji geologiczno-geofizycznej pod kątem oceny przydatności jako potencjalnych magazynów/składowisk substancji wybrano trzy struktury w utworach jury (Wojszyce, dla której dostępne były stosunkowo nowe i bogate dane, oraz Konary i Budziszewice-Zaosie – dane archiwalne z ubiegłego wieku) i jedną w utworach kredy (Bielsk-Bodzanów – dane archiwalne z ubiegłego wieku).

Interpretacja danych sejsmicznych dla struktur Budziszewice-Zaosie, Konary i Bielsk-Bodzanów

Dla struktur Budziszewice-Zaosie, Konary i Bielsk-Bodzanów dokonano interpretacji zreprocesowanych w rozdziale 6 profili (po 4 dla każdej ze struktur, razem 12 profili, w tym 2 połączone na strukturze Budziszewice-Zaosie) oraz reinterpretacji danych sejsmicznych opracowanych wcześniej w ramach innych przedsięwzięć PIG-PIB/PSG (w tym przedsięwzięcia „Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO_2 wraz z ich programem monitorowania") celem wykonania korelacji na profilach i map dla kluczowych horyzontów zbiornikowych i uszczelniających dla poszczególnych struktur (rozdział 7.1). Jeśli chodzi o zreprocesowane profile to pomimo znaczącej poprawy jakości obrazu sejsmicznego nie w każdym przypadku wyniki były satysfakcjonujące. W zestawieniu z innymi dostępnymi archiwalnymi danymi sejsmicznymi z wybranych obszarów, umożliwiły jednak przeprowadzenie interpretacji strukturalnej. Interpretowane horyzonty sejsmiczne wybrano na podstawie wydzieleń otrzymanych głównie z analizy litofacjalnej w otworach pod kątem możliwości magazynowania/składowania substancji.

Do interpretacji struktury Budziszewice-Zaosie wykorzystano informacje z 6 otworów wiertniczych zlokalizowanych w obrębie struktury, dla których dostępne były również wyniki pomiarów prędkości średnich. Z tego dla jednego otworu wykonano dowiązanie danych sejsmicznych z wykorzystaniem sejsmogramu syntetycznego. Korelację wykonano dla 5 horyzontów sejsmicznych wyznaczających strop: triasu, synemuru – kolektora, pliensbachu dolnego – kolektora, aalenu dolnego – kolektora, bajosu górnego – uszczelnienia. Największą trudność napotkano przy interpretacji najpłytszego horyzontu, tj. bajosu górnego – uszczelnienia, ze względu na brak zapisu falowego, co uniemożliwia jednoznaczną ocenę zamknięcia struktury na NW. Natomiast w szczycie struktury zapis sejsmiczny ma generalnie obniżoną jakość. Dostępne profile i informacje z otworów wiertniczych pozwoliły jednak zobrazować strukturę Budziszewice-Zaosie, która jest antykliną powstałą nad poduszką solną utworów permu. W obrębie interpretowanych horyzontów nie stwierdzono widocznych uskoków. Układ refleksów w kierunku SW-NE wskazuje wyraźnie, że skrzydła antykliny zapadają w obu kierunkach tworząc zamknięcie potencjalnych kolektorów. W rejonie otworu Buków 1 i dalej na SW od osi struktury widoczne jest znaczne zmniejszenie miąższości warstw i wyklinowywanie się niektórych horyzontów sejsmicznych. Szczyt struktury wydaje się jednak stosunkowo miąższy. Na podstawie interpretacji horyzontów sejsmicznych wyliczono mapy czasowe powierzchni odpowiadających stropowi potencjalnego: kolektora aalenu dolnego, kolektora pliensbachu górnego, kolektora synemuru. Mapy obliczone dla wybranych interpretowanych horyzontów pokazują, że struktura ma wyraźnie wydłużony kształt, o rozciągłości NW-SE. Zagęszczenie izolinii oraz wzrost czasu w kierunku od osi struktury wskazują, że kolektory powinny mieć zamknięcie od strony SE.

Wyniki ekstrapolacji i trend horyzontów od strony NW, gdzie pełna interpretacja nie była możliwa (słaba jakość danych i brak obrazu falowego), wykazują, że tu również powinno być zamknięcie, ale prawdopodobnie bardzo łagodne. Kulminacja struktury widoczna na wszystkich ww. mapach znajduje się w pobliżu otworów wiertniczych Zaosie.

Na obszarze struktury Konary zlokalizowane są jedynie dwa głębokie otwory (Konary IG-1 i Byczyna 1), dla których wykonano pomiary geofizyczne. W celach pomocniczych wykorzystano również informacje z jednego płytszego otworu zlokalizowanego w jej obrębie. Na jednym z reprocesowanych profili sejsmicznych jakość obrazu nie jest satysfakcjonująca i uniemożliwia korelację horyzontów sejsmicznych – zapewne jest to spowodowane błędami w akwizycji oraz prawdopodobnie występowaniem pokładów węgla brunatnego w nadkładzie na północnym skraju struktury. Interpretację strukturalną wykonano dla horyzontów sejsmicznych odpowiadających stropowi pliensbachu górnego – kolektora, toarku dolnego – uszczelnienia, aalenu górnego – uszczelnienia. Dodatkowo skorelowano strop utworów oxfordu, jury górnej oraz walnej powierzchni niezgodności laramijskiej powstałej po wyniesieniu bruzdy śródpolskiej. Przeprowadzona interpretacja strukturalna pokazała, że w przekroju poprzecznym kształt antykliny jest asymetryczny. Horyzonty SW skrzydła struktury są bardziej strome, a miąższość warstw się zmniejsza. Największą zmianę miąższości wykazuje kolektor aalenu górnego. Korelacja horyzontów w bardziej połogim skrzydle NE wskazuje na wyraźny wzrost miąższości lub w przypadku aalenu górnego jedynie niewielkie zmiany. Horyzonty sejsmiczne wyznaczone w części SE struktury wyraźnie zapadają w przeciwieństwie do części NW, gdzie zwiększenie głębokości ma bardzo łagodny charakter. Obserwuje się brak wyraźnej ciągłości refleksów w szczytowej części struktury, co dodatkowo utrudnia ocenę jak duże mogą być wyznaczone kolektory przy tak łagodnym zapadaniu horyzontów i czy posiadają odpowiednie zamknięcie. Zakładając, że warstwy w przybliżeniu układają się współkształtnie do poduszki solnej, nad którą powstała antyklina, takie zamknięcie powinno być. Potwierdzenie jednoznacznego i pewnego zamknięcia poziomów kolektorskich zwłaszcza od strony NW wymaga dalszych badań i analizy, w tym oceny oddziaływania pobliskiego wysadu solnego Góra. Na podstawie zinterpretowanych horyzontów sejsmicznych wykonano mapy czasowe powierzchni sejsmicznych stropu: aalenu górnego – uszczelnienie, toarku dolnego – uszczelnienie, pliensbachu górnego – kolektor.

W przypadku struktury Bielsk-Bodzanów skupiono się na kulminacji Bielska, gdzie interpretację oparto na dwóch odwierconych tam otworach (Bielsk 1 i 2), wspomagano się również informacjami z otworu Bodzanów IG-1 położonego dalej na SE od tej kulminacji, poza rowem, w którym zlokalizowana jest ta struktura. Analizowana struktura jest oparta na uskokach zakotwiczonych w utworach permskich. Jak sugeruje układ interpretowanych warstw, m.in. większa miąższość warstw w obrębie rowu niż poza nim, główne uskoki były odmładzane i przynajmniej w ostatniej fazie powstawania, tj. na początku dolnej kredy, synsedymentacyjne. Struktura była następnie wyniesiona w czasie inwersji bruzdy śródpolskiej, która ukształtowała jej antyklinalny charakter. Interpretacja profili podłużnych jest obarczona bardzo dużą niejednoznacznością, gdyż uskoki biegnące wzdłuż profili bardzo często przecinają obraz sejsmiczny. W obrębie rowu można wyróżnić liczne mniejsze uskoki towarzyszące. Prawdopodobnie otwór Bielsk 1 przewierca jeden z nich co dodatkowo utrudnia dowiązanie sejsmiki do otworu i identyfikację horyzontów, zaś różnice w stratygrafii sugerują, że również pomiędzy otworami Bielsk 1 i 2 może być dyslokacja. Interpretację strukturalną wykonano dla horyzontów sejsmicznych odpowiadających stropowi pliensbachu górnego – kolektora, aalenu dolnego i toarku górnego – kolektora, bajosu dolnego i aalenu górnego – uszczelnienia, bajosu

górnego – uszczelnienia oraz stropu formacji mogileńskiej – kolektora. Dodatkowo skorelowano strop oxfordu i jury górnej. Jak wykazała interpretacja w obrębie utworów jury poza znaczną głębokością występowania, poziomy uszczelniające i kolektory są silnie zuskokowane i chociaż zrzuty nie muszą być duże mogło nastąpić przerwanie ciągłości warstw. Jedynie horyzont wyznaczający strop formacji mogileńskiej nie wykazuje przerwania przez deformacje nieciągłe. Nie obserwuje się też takich deformacji w nadkładzie uszczelniającym tej formacji (kompleks węglanowo-krzemionkowy), nie udało się też skorelować horyzontów sejsmicznych w obrębie tego kompleksu. Interpolacja powierzchni stropu formacji mogileńskiej przedstawia strukturę, której kulminacja układa się w kształt litery „L". Identyfikacja kształtu struktury w obrębie kredy wymaga lepszego rozpoznania pod kątem zamknięcia zwłaszcza od NE strony wyniesienia.

Archiwalne mapy strukturalne i zagospodarowanie terenu

Równolegle z pozyskiwaniem i interpretacją danych sejsmicznych przeanalizowano regionalne mapy geologiczne pod kątem występowania stref nieciągłości tektonicznych (rozdział 7.2). Analizy rozpoczęto od „Atlasu paleogeograficznego epikontynentalnego permu i mezozoiku w Polsce" (Dadlez i in., 1998). Generalnie można stwierdzić, że struktury jurajskie Budziszewice-Zaosie, Konary i Wojszyce występują na poduszkach soli cechsztyńskich, co nie ma miejsca w przypadku struktury kredowej (z niżej ległymi poziomami jurajskimi) Bielsk-Bodzanów, choć w głębokim podłożu tej struktury występują utwory cechsztynu. W stropie utworów cechsztynu na obszarze polskiej części basenu permskiego obserwuje się generalnie dość skomplikowaną tektonikę, z tym, że ma to miejsce w mniejszym stopniu w rejonach czterech rozpatrywanych struktur, a z tego „najspokojniej" jest w rejonie struktury Wojszyce. W utworach mezozoiku zidentyfikowano w Atlasie uskoki w brzeżnych częściach struktur Konary, Wojszyce i Bielsk-Bodzanów. Interpretacja sejsmiki prowadzona w ramach niniejszego zadania (rozdziały 7.1, 7.5) generalnie potwierdza zidentyfikowane w Atlasie nieciągłości w rejonie struktury Bielsk-Bodzanów, w przeciwieństwie do struktur Konary i Wojszyce, gdzie wspomniane uskoki najprawdopodobniej występują w podłożu kompleksów jurajskich.

Jeśli chodzi o mapy o większym stopniu szczegółowości, tzn. wykonane w ramach dokumentacji sejsmicznych to można generalnie stwierdzić, że w przypadku struktur solankowych rzadko wykonywano mapy horyzontów w obrębie interesujących nas kompleksów geologicznych, tzn. utworów kredy i jury. Poniżej scharakteryzowano najistotniejsze wyniki wybranych dokumentacji dotyczące identyfikacji stref nieciągłości tektonicznych i korelacji horyzontów mezozoicznych wykorzystane przy kompleksowej interpretacji geologiczno-geofizycznej struktur Budziszewice-Zaosie, Konary i Bielsk-Bodzanów (interpretację struktury Wojszyce oparto zasadniczo na materiałach wytworzonych w ramach projektu demo CCS PGE Bełchatów; rozdziały 7.5 i 7.6).

Na wykonanej w ramach tematu AMOCO Polska Centralna Blok-A (Łobaziewicz, 1997) mapie spągu jury na obszarze struktury Budziszewice-Zaosie zaznacza się uskok w rejonie otworu Buków 1 i dalej poza strukturą na południe od otworu Buków 2. Według interpretacji danych sejsmicznych prowadzonej dla tej struktury w rozdziale 7.1.1, uskok ten nie zaznacza się w utworach jury.

W rejonie struktury Konary w ramach tematu sejsmicznego Włocławek - Płock (Jurek i in., 1980) prześledzono jedynie na profilach sejsmicznych dwa horyzonty jurajskie – strop jury środkowej i strop jury górnej, jednakże korelacje te są widoczne jedynie fragmentarycznie na poszczególnych profilach, a obraz sejsmiczny jest mało czytelny (nie wykonano map tych horyzontów).

W rejonie struktury Bielsk-Bodzanów (zasadniczo w rejonie kulminacji Bielska, czyli NW części struktury) ramach tematu sejsmicznego Rypin-Wyszogród (Marosz i Tomaszewska, 1993) wykonano, jeśli chodzi o interesujące nas formacje geologiczne (kreda-jura) jedynie mapę stropu kredy dolnej czyli stropu kolektora – piaskowcowej formacji mogileńskiej, w wersji czasowej i głębokościowej. Na mapie nie stwierdzono żadnych uskoków w stropie kredy dolnej, co potwierdza w tym zakresie wyniki interpretacji danych sejsmicznych wykonanej dla tej struktury w rozdziale 7.1.3.

Jeśli chodzi zagospodarowanie terenu, to w obrębie obszaru Polski centralnej obejmującego analizowane struktury znajduje się szereg obszarów zurbanizowanych, lecz na obszarach rozpatrywanych 4 struktur nie występują większe skupiska osadnicze, za to występują rozmaite obszary ochrony przyrody, ale brak jest szczególnie chronionych obszarów parków narodowych, zaś obszary NATURA 2000 obejmują jedynie fragment struktury Wojszyce. Informacje te zostały wykorzystane w rozdziale 8 do przedstawienia propozycji wytycznych dla projektów robót geologicznych na przykładzie omawianych 4 struktur (rozdział 7.2).

Mapy grawimetryczne i ich interpretacja geologiczna

Pozyskano z NAG/CBDG dostępne dane grawimetryczne (rozdział 7.3) w formie katalogów anomalii siły ciężkości w redukcji Bouguera dla gęstości redukcji wynoszącej 2,25 g/cm^3. Dane te najczęściej pochodziły z lat 1960-tych lub 1970-tych i charakteryzowały się stosunkowo niskim zagęszczeniem punktów grawimetrycznych (rzędu 2 pkt/km^2). Wyjątki stanowiły tu pomiary grawimetryczne na potrzeby rozpoznania wysadów solnych i złóż węgla brunatnego, prac badawczych i geotermii oraz szczegółowe (10-12 pkt/km^2) zdjęcie dla struktury Wojszyc wykonane w ramach projektu demo CCS PGE Bełchatów w roku 2010.

Katalogi te, po scaleniu danych pochodzących z tematów grawimetrycznych dla obszarów poszczególnych struktur, posłużyły do sporządzenia gridów anomalii siły ciężkości w redukcji Bouguera, a te następnie zostały poddane transformacjom (rozdział 7.3). Anomalia siły ciężkości w redukcji Bouguera jest superpozycją przyczynków od różniących się gęstością ciał zaburzających w obrębie ośrodka geologicznego, zarówno płytkich, jak i głębokich i bardzo głębokich (Fajklewicz, 2007), czyli jej źródłem jest rozkład gęstości ośrodka geologicznego. Natomiast zadaniem dla grawimetrii w ramach niniejszego przedsięwzięcia była identyfikacja stref nieciągłości tektonicznych w obrębie górotworu, w praktyce w przedziale głębokości odpowiadającym występowaniu rozpatrywanych dla poszczególnych struktur kompleksów magazynowania/składowania oraz ich bezpośredniego nadkładu (czy też dodatkowych uszczelnień). Przyjęto do tego celu orientacyjnie przedział głębokości od około 0,5 km do 2 km. Istnieje szereg metod wydzielania z anomalii siły ciężkości przyczynków pochodzących od płytko (anomalie rezydualne) lub głęboko (anomalie regionalne) występujących ciał zaburzających. Jedną z takich metod jest filtracja częstotliwościowa z wykorzystaniem transformaty Fouriera (Fajklewicz, 2007), w wariancie filtracji pasmowej, czyli pozostawiającej przyczynki od ciał zaburzających w określonym (z dużym przybliżeniem) przedziale głębokości. Poddano gridy anomalii siły ciężkości w redukcji Bouguera (sporządzone dla obszarów wszystkich czterech struktur) tej transformacji, wykorzystując oprogramowanie GEOSOFT, otrzymując anomalie rezydualne odpowiadające (hipotetycznie) przedziałowi głębokości 0,5-2 km. Z kolei, aby wyznaczyć strefy nieciągłości tektonicznych zastosowano kolejną transformację – wyliczono (oprogramowanie GEOSOFT) ze wspomnianych anomalii rezydualnych gradient poziomy. Gradient poziomy jest miarą zmienności rozkładu gęstości

ośrodka geologicznego w poziomie (Fajklewicz, 2007), zaś jego wartości maksymalne mogą być związane z występowaniem kontaktów gęstości, uskoków, wyklinowań warstw oraz zmian facji, z którymi wiążą się zmiany gęstości ośrodka geologicznego. Stąd dla obszarów poszczególnych struktur analizowano strefy, gdzie wyraźnie zaznaczają się osie i maksima rozkładów gradientu poziomego z anomalii rezydualnych.

Na obszarze struktury Budziszewice-Zaosie zaznaczają się takie strefy w rejonie otworów Buków 1 i Buków 2, na SW skłonie struktury i na WSW od struktury. Jednakże nie znajdują one potwierdzenia w interpretacji danych sejsmicznych dla kompleksu składowania w obrębie utworów jury (rozdział 7.1.1), natomiast w dokumentacji archiwalnej (Łobaziewicz, 1997) postuluje się tam występowanie uskoków w spągu jury, a więc poniżej rozpatrywanego kompleksu składowania.

Na zachodnim skłonie struktury Konary widoczna jest stosunkowo słabo zaznaczająca się (nieco silniej na NW) strefa maksimum gradientu poziomego, zaś przy zachodnim krańcu struktury kolejna taka strefa, nieco bardziej wyrazista. Strefy te, najprawdopodobniej związane z dolnymi partiami sekwencji utworów jury, nie zostały jednoznacznie stwierdzone jako uskoki w interpretacji danych sejsmicznych dla kompleksu składowania w obrębie utworów jury (rozdział 7.1.2), natomiast strefa na zachodnim skłonie struktury jest postulowana w archiwalnej interpretacji podanej w monografii Tarkowski (red., 2010). Natomiast bardzo silne anomalie zaznaczają się na WSW od struktury, w rejonie głęboko występującego wysadu solnego Gopło (strop soli na głębokości 2412 m wg Tarkowski i Czapowski, 2018), być może związane są one z tektoniką w obrębie nadkładu mezozoicznego w rejonie wysadu.

W obrębie struktury Wojszyce widoczna jest strefa maksimum gradientu poziomego na SW od otworu Kaszewy 1 (przebiegając w kierunku z NW na SE), oraz równoległa strefa na wschód od tego otworu, na NE skłonie struktury. Mogą to być strefy uskokowe lub zmiany facjalne w obrębie najniższych partii sekwencji utworów jury lub górnego triasu skutkujące kontrastem gęstości. Na południe od struktury zaznacza się bardzo wyraźnie przebijający utwory mezozoiku wysad solny Rogóźno, gdzie serię solną nawiercono na głębokości 321-427 m p.p.t., a czapę wysadu na głębokości 55-329 m p.p.t. (Czapowski i Tarkowski, 2018). Strefy maksimów gradientu poziomego w obrębie struktury Wojszyce najprawdopodobniej związane są z głębszymi partiami sekwencji utworów jury (lub najwyższego triasu) gdyż nie zaznaczają się tak ostro i mają mniejszą amplitudę niż te w rejonie wysadu solnego Rogóźno.

Na obszarze struktury Bielsk-Bodzanów brak jest wyraźnych maksimów gradientu poziomego, które mogłyby być związane z występowaniem kontaktów gęstości, uskoków, wyklinowań warstw oraz zmian facji, z którymi wiążą się zmiany gęstości ośrodka geologicznego. Oznaczałoby to albo brak takich elementów strukturalnych w utworach kredy i najwyższej jury albo brak znaczących horyzontalnych zmian rozkładu gęstości w obrębie tych kompleksów. Interpretacja sejsmiki przedstawiona w rozdziale 7.1.3 sugeruje generalnie brak uskoków ponad spągiem kredy, co po części potwierdzałoby wyniki grawimetrii.

Ewolucja tektoniczna strefy Pabianic

Połączenie wyników analizy struktur tektonicznych z danych otworowych i interpretacji sejsmiki pozwoliło na odtworzenie ewolucji strukturalnej badanego kompleksu. Wyniki tej analizy (rozdział 7.4) posłużyły (między innymi), z kolei, do wersyfikacji interpretacji strukturalnych

kompleksu kredowego w strefie Poddębice-Strzelno, przedstawionych w rozdziale 4.3., są ponadto istotne dla oceny możliwości magazynowania/składowania substancji w obrębie wytypowanych w rozdziale 5 i analizowanych w rozdziale 7 struktur solankowych w utworach jury.

Głównym elementem strukturalnym w strefie Pabianic jest asymetryczny rów tektoniczny, od NE ograniczony przez główny uskok (GSU) o biegu NW-SE, a od strony SW, ten w istocie półrów ograniczony jest przez mniejszą strefę uskoku antytetycznego. Z interpretacji strukturalnej profilu wynika, że struktura rowu została zainicjowana w T3 i była aktywna jeszcze w J1. Kompleksy J2, J3 oraz K ponad rowem są nieco wyniesione względem otoczenia. Struktura rowu jest podobna do inicjującego wysad Kłodawy (lecz bez wysadu), zaś strefa tektoniczna rowu Pabianic kontynuuje się ku NW, gdzie jest ona ugięta sigmoidalnie i trafia w wysad Kłodawy. Jest to zatem jedna z głównych stref tektonicznych basenu polskiego. W profilu otworu Pabianice-1 wyodrębniono główną strefę uskokową (GSU) wygasającą w stropowej części J1, zaś powyżej, na odcinku profilu sejsmicznego ponad rowem, antyklinalne ugięcie kompleksu J2-K2 o genezie związanej z inwersją laramijską.

Dane otworowe wskazują, że większość struktur ekstensyjnych znajduje się w skrzydle spągowym GSU, która podczas formowania rowu tektonicznego w okresie od T3 do J1 była najprawdopodobniej uskokiem normalnym lub transtensyjnym. Obecność żył kwarcowych wiąże się z rozpuszczaniem kwarcu i jego precypitacją, co z kolei było przyczyną lityfikacji piaskowców i powstania w nich struktur kruchych, najprawdopodobniej w kredzie (reaktywacja GSU). Na starsze struktury ekstensyjne nakładają się struktury kompresyjne. Współczesna aktywność GSU sugeruje jednak, że możliwa była również reaktywacja tej strefy w neogenie. Jednakże szczelność potencjalnych kolektorów J1 pod przykryciem uszczelnień J1 w strefie Pabianic nie ulega wątpliwości.

Jak wskazuje orientacja struktur breakouts (BB), w obrębie skrzydeł tego uskoku kierunki największego współczesnego naprężenia poziomego (S_{Hmax}) są odmienne – NNW-SSE w skrzydle stropowym i NW-SE w skrzydle spągowym, czyli w kierunku zgodnym z przebiegiem GSU.

Przesuwcza aktywność uskoku Pabianic-Kłodawy sugeruje, że również uskoki strefy Poddębic o podobnym biegu - NW-SE, mogą być współcześnie reaktywowane. To może mieć znaczenie dla szczelności antykliny Poddębic analizowanej w rozdziale 4.3 oraz innych struktur mezozoicznych zlokalizowanych na tym kierunku strukturalnym.

<u>Analiza strukturalna i geomechaniczna otworu Kaszewy-1 pod kątem przydatności antykliny Wojszyc do składowania CO_2 (ew. magazynowania innych substancji)</u>

Badania tektoniczne (rozdział 7.5) zostały przeprowadzone w celu: (1) dopełnienia interpretacji karotaży wiertniczych (otwór Kaszewy 1) poprzez wskazanie charakteru geofizycznie rejestrowanych struktur; (2) wykorzystania ewolucji strukturalnej dla weryfikacji koncepcji budowy struktury Wojszyc; (3) wskazania struktur tektonicznych mogących stanowić dodatkową przestrzeń szczelinową w obrębie kolektora oraz (4) wskazania czy nie stanowią zagrożenia dla rozerwania ciągłości uszczelnień.

Wykonano profilowanie strukturalne na rdzeniu z otworu Kaszewy-1, który został pobrany z głębokości 1074,2-2050,4 m (jura dolna – najwyższy trias). Profilowanie rdzenia wiertniczego uzupełniono danymi geofizyki wiertniczej, w tym głównie skanera mikrooporności owego (XRMI)

z interwału głębokości 1053 m do 2000 m. Wykorzystano wyniki profilowania całości rdzenia przeprowadzonego w 2010 r., które zweryfikowano dla wybranych odcinków (łącznie 135 m). Analiza kierunków współczesnych naprężeń została wykonana na podstawie rozpoznanych w obrazie XRMI struktur typu breakouts (BB) tworzących wgłębienia w ścianie otworu oraz pęknięć ekstensyjnych ściany otworu indukowanych ciśnieniem płuczki (DITF – Drilling Induced Tensile Fractures). Przeanalizowano również spękania tektoniczne otwierane ciśnieniem płuczki (DENF). Profilowanie wielkości współczesnych naprężeń wykonano na postawie danych z dipolowej sondy akustycznej, skalibrowanych danymi laboratoryjnymi. Do oceny wielkości naprężeń wykorzystano, obok ww. informacji z XRMI także archiwalne dane na temat parametrów mechanicznych oraz ciśnień porowych i otworowych.

Model geomechaniczny 1D, obejmujący kierunki i wielkości współczesnych naprężeń tektonicznych, wykonano na postawie dopasowywania uzyskanych wyników modelowanych struktur zniszczeniowych do tych widocznych w obrazie XRMI oraz do wielkości gradientów naprężeń uzyskanych w wyniku testów hydraulicznych (leak-off test). Porównano go z modelem archiwalnym wykonanym przez SLB w ramach projektu demo CCS PGE Bełchatów. Kierunek największego naprężenia poziomego (SH_{max}) został wyznaczony na podstawie orientacji BB, które są prostopadłe do S_{Hmax} oraz DITF, które są równoległe do S_{Hmax} (kierunki zbieżne). Przedmiotem modelowań były długości struktur BB i DITF (pomierzone i obliczone), oraz dopasowanie S_{hmin} do wyników testów szczelinowania hydraulicznego. Wyniki sugerują współczesne doginanie jurajskiej antykliny Wojszyc w kierunku prostopadłym do jej osi.

W otworze Kaszewy 1 stwierdzono drobne uskoki normalne w stropie triasu, a poniżej, w stropie kajpru, strefę uskoku przesuwczego o charakterze kruchym. W otworze stwierdzono spękania o charakterze tensyjnym i ścięciowym bez przemieszczenia, a także spękania ze śladami przemieszczenia w postaci luster tektonicznych bez rys i z rysami ślizgowymi. W obrębie kolektorów J1 spękania mają najczęściej upady pomiędzy 55° - 70° i kierunki zapadania systematycznie ku SW. W sąsiedztwie interwałów z zagęszczeniem luster tektonicznych, w obrębie piaskowców występują również żyły strome z przewagą wypełnienia kwarcowego. Mineralizacja węglanowa zaznaczyła się zwłaszcza w piaskowcach i mułowcach pliensbachu, gdzie występują żyły i kawerny o największej aperturze i ze szczotami mineralizacji. Zagęszczenie spękań skorelowane jest z litologią. Jest ich mianowicie najwięcej w piaskowcach i niektórych mułowcach, a są nieliczne lub nie występują w łupkach ilastych. W przedziale głębokości 1070 – 1220 m (najniższy aalen – toark górny) spękania występują we wszystkich typach litologicznych, a najliczniej w mułowcach. W interwale 1220 – 1300 m (najniższy toark – przystropowa część pliensbachu), mimo obecności pakietów piaskowców spękania nie występują. Największe zagęszczenie spękań występuje w długim interwale 1300 – 1740 m (pliensbach – hettang górny), który w większości składa się z kilku do kilkunastu metrów przewarstwień piaskowców, mułowców i iłowców (w tym najbardziej w stropie tego interwału, tzn. w piaskowcach pliensbachu).

Struktura antyklinalna Wojszyc rozwijała się wieloetapowo, na krawędzi bruzdy śródpolskiej, będącej centrum subsydencji permo-mezozoicznego basenu polskiego. Pierwszy etap aktywności tektonicznej można wyróżnić w pstrym piaskowcu, w którym na SW od osi antykliny powstał uskok normalny o upadzie ku SW, który mógł być również aktywny podczas sedymentacji młodszych jednostek triasu, jeszcze przed powstaniem antykliny. Ten etap był jednoczesny z powstaniem uskoku inicjującego rozwój „rowu Krośniewic" (i wysadu Kłodawy). Powstanie antykliny Wojszyc nastąpiło podczas

sedymentacji retyku (w efekcie kompresyjnego fałdowania). Po fazie erozji przegubu antykliny, sedymentacja została wznowiona jeszcze w najwyższym retyku. Podczas sedymentacji dolnej jury – do pliensbachu włącznie – wzrosła miąższość w obu skrzydłach antykliny. Po pliensbachu nastąpiło odtworzenie centrum subsydencji bruzdy śródpolskiej ze skłonem zbiornika pod SW skrzydłem antykliny Wojszyc. W osi antykliny na powierzchnię podkenozoiczną wychodzą wapienie oksfordu. Wapienie te wraz z całą antykliną wyniesione zostały na skutek inwersji basenu polskiego, w efekcie której granica wału śródpolskiego znalazła się w przegubie antykliny Wojszyc, a ograniczająca ją od NE synklina stanowi część niecki brzeżnej. Podczas tej fazy inwersji przegub antykliny Wojszyc został wyniesiony o co najmniej 1500 m względem synkliny od strony NE, co stanowi strome lateralne zamknięcie struktury zbiornikowej. Od strony SW zamknięcie struktury jest płytkie ze względu na większe podniesienie tego skrzydła antykliny niż jej przegubu w fazie inwersji basenu.

W obrazie sejsmicznym, w przegubie antykliny Wojszyc interpretowany jest uskok, powstały w pstrym piaskowcu, generalnie równoległy do osi struktury. Na sekcjach sejsmicznych widzimy, że uskok ten kontynuuje się w kierunku NW, gdzie jego zrzut jest coraz większy. Przedłużenie tego uskoku ku górze trafia w otwór Kaszewy-1 blisko stropu triasu. W przegubie antykliny gwałtownie spada jakość obrazowania sejsmicznego, dlatego niemożliwe jest prześledzenie kontynuacji tego uskoku i uskoków potomnych w obrębie jury. Dotychczasowe analizy wskazują, że w obrębie struktury Wojszyc zachodzić może istotna lateralna anizotropia prędkości fali sejsmicznej (obniżenie w kierunku prostopadłym do osi struktury). Archiwalny model grawimetryczny pokazuje, że ponad przegubem antykliny w obrębie jury środkowej i górnej występuje strefa obniżonej gęstości (po SW stronie antykliny nieco wyższej z uwagi na wpływ kompakcji). Najprawdopodobniej przyczyną anomalii jest gęsty zespół otwartych spękań w obrębie J3 i J2. Analiza mapy rezydualnych anomalii grawimetrycznych sugeruje, że powierzchnia stropu jury górnej urzeźbiona jest w postaci, układających się w pasy wzdłuż osi antykliny, skałek twardego i gęstego wapienia skalistego, przykrytych osadami węgli brunatnych i iłów miocenu o wyjątkowo małej gęstości. O występowaniu tego rodzaju zjawisk krasowych świadczy trudny do opanowania zanik płuczki wiertniczej w tym interwale głębokościowym wraz z gwałtownie spadającą jakością obrazowania sejsmicznego. Stąd, aby w przyszłości osiągnąć dobrej jakości obrazowanie sejsmiczne należy wykluczyć tę strefę ze wzbudzania i rejestracji fali. Jest to istotne dla stwierdzenia czy przesuwcza strefa uskokowa w przegubie struktury, sięgająca stropu kajpru i propagująca się poprzez drobne uskoki normalne do stropu triasu, propaguje się także w obrębie jury (i czy ma także związek ze skałkami w stropie jury).

W obrębie struktury Wojszyce potencjalne główne kolektory znajdują się w obrębie J1, a uszczelnienia w obrębie J2 oraz najwyższej J1 (formacja ciechocińska). Z punktu widzenia bezpieczeństwa składowania/magazynowania substancji bardzo ważna jest integralność tych kompleksów uszczelniających. Jeśli chodzi o spękania penetratywne to według przeprowadzonych analiz nie powinny stanowić problemu w obrębie ilastych uszczelnień J2 i J1, nawet jeżeli tam występują, to powinny być mniej liczne i nie mieć ciągłości pionowej. Możliwe jest też, że ze względu na podwyższoną zawartość minerałów ilastych sprzyjających pełzaniu łupków, struktury kruche w ogóle się w uszczelnieniach nie wykształciły lub są w pełni zasklepione. Zatem pozostaje pytanie o możliwość rozszczelnienia uszczelnień jury przez uskoki. Możliwe jest, że w obrębie antykliny Wojszyc uskoki o znikomym zrzucie tną cały kompleks jurajski, lecz najprawdopodobniej nie są to uskoki aktywne, stanowiące drogi migracji dla płynów złożowych. Z kolei badania naprężeń w otworze Kaszewy-1 pokazały, że współczesne naprężenie tektoniczne S_{Hmax} w osi struktury Wojszyc ma taką samą orientację (NW-SE), co nie sprzyja reaktywacji przesuwczej uskoków o tym samym

biegu, a wnioski z testów szczelinowania hydraulicznego sugerują, że reaktywacja uskoków normalnych jest raczej wykluczona. Natomiast możliwość występowania otwartych szczelin w obrębie kolektorów J1 może być korzystna, gdyż może podnosić wydajność zatłaczania do kolektora, zwłaszcza przy wykorzystaniu otworów krzywionych/poziomych. Najlepsze ku temu warunki występują w kolektorze pliensbachu górnego.

W celu bardziej szczegółowego rozpoznania struktury niezbędne jest odwiercenie otworu w szczycie struktury (kilka km na SE od otworu Kaszewy 1), do stropu pliensbachu. W otworze konieczne byłoby, poza wykonaniem karotaży standardowych, również wykonanie karotaży sondy akustycznej dipolowej i skanera XRMI, a w obrębie uszczelnień J2-J1 po strop kolektora pliensbachu – testów szczelinowania hydraulicznego. Badania te powinny być uzupełnione analizami laboratoryjnymi parametrów geomechanicznych i petrofizycznych na kilkunastu próbach skał. To pozwoli na pełną charakterystykę strukturalną, geomechaniczną i hydrauliczną uszczelnień. Powinno zostać wykonane zdjęcie 3D/3C, z analizą anizotropii w obrębie poszczególnych formacji litostratygraficznych, zaprojektowane tak aby ominąć „horyzont skałkowy" w obrębie wychodni wapieni oksfordu powierzchni podkenozoicznej. Wyniki badań sejsmicznych należy zintegrować z modelami parametrycznymi oraz wynikami karotażu i testów złożowych.

Przekroje sejsmiczno-grawimetryczne przez strukturę Wojszyce

W ramach projektu demo CCS PGE Bełchatów wykonano na obszarze struktury sejsmikę wysokorozdzielczą 2D wzdłuż 8 profili sejsmicznych (rozdział 7.6) o łącznej długości 225 km (zdjęcie sejsmiczne Wojszyce 2D – Musiatowicz i Zubrzycka 2010), otwór badawczy Kaszewy 1 (Posyniak i Rosa, 2009), a także szczegółowe zdjęcie grawimetryczne o zagęszczeniu punktów pomiarowych 10-12 pkt/km2 (Ostrowski i in., 2010; rozdziały 7.3 i 7.5).

Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy brał udział w tym projekcie demo CCS, wspomagając PGE Bełchatów w komponencie składowania (co obejmowało m.in. opracowanie projektów robót geologicznych, nadzór na pracami polowymi, zagadnienia komunikacji i akceptacji społecznej oraz udział w opracowaniu i interpretacji wyników, tzn. przekrojów, map i modeli geologiczno-geofizycznych; Szynkaruk, 2011). Przy interpretacji zdjęcia sejsmicznego Wojszyce 2D wykorzystano ponadto wyniki interpretacji sejsmiki z wcześniej wykonanych prac w rejonie struktury oraz dane z otworu Kaszewy 1 i otworów archiwalnych zlokalizowanych w sąsiedztwie struktury Wykonane zostały korelacje kluczowych horyzontów sejsmicznych, dla których sporządzono następnie mapy czasowe i głębokościowe, wykorzystane do konstrukcji modeli 3D.

W ramach tych prac sformułowano następujące wnioski dla zdjęcia sejsmicznego Wojszyce 2D: (1) zasadniczym problemem interpretacyjnym była zróżnicowana jakość obrazu sejsmicznego; (2) ogólnie jakość danych sejsmicznych jest dobra (wysoka rozdzielczość pionowa, dobra ciągłość refleksów); (3) wyjątek stanowi strefa przegubowa badanej antykliny, gdzie obserwujemy znaczący spadek jakości obrazu sejsmicznego, szczególnie dla utworów górno- i środkowojurajskich; (4) w obrębie jury dolnej oraz triasu szerokość strefy charakteryzującej się słabą jakością obrazu sejsmicznego jest mniejsza (niż w J3 i J2), za wyjątkiem profilu podłużnego (PIG016310), który w całości charakteryzuje się bardzo słabą jakością danych; (5) wyinterpretowane uskoki mają rozciągłość NW-SE i deformują osady cechsztyńskie oraz górnotriasowe do stropu kajpru – brak jest wyraźnych przesłanek świadczących o kontynuacji uskoków w najwyższą partię triasu oraz jurę; (6) ze względu na niską jakość obrazu sejsmicznego w obrębie utworów jurajskich w przegubowej

strefie antykliny Wojszyce nie można wykluczyć istnienia niewielkich uskoków normalnych; (7) zamknięcie struktury od strony SE ma niewielką amplitudę co w połączeniu z niską jakością danych sejsmicznych, szczególnie na mniejszych głębokościach (środkowa i górna jura), zwiększa ryzyko popełnienia błędu w interpretacji; (8) słaba jakość obrazu sejsmicznego w centralnej części struktury Wojszyce obniża pewność oraz jednoznaczność interpretacji w tej strefie.

Na wszystkich profilach sejsmicznych interpretowano horyzonty od stropu jury środkowej do spągu cechsztynu, przy czym z punktu widzenia niniejszego przedsięwzięcia najistotniejsze są: strop jury górnej (śledzona tylko na NE skrzydle struktury), strop jury środkowej (czyli spąg jury górnej), strop bajosu górnego – kolektor (cienki), strop aalenu dolnego – kolektor (aalen dolny i góny toark stanowią w zasadzie jeden kolektor), strop pliensbachu górnego – kolektor, oraz strop triasu górnego czyli spąg jury i ewentualnie T3-niezg. Ostatnia granica to niezgodność kątowa występująca poniżej stropu kajpru, która związana jest z zasadniczą fazą wzrostu cechsztyńskiej poduszki solnej znajdującej się w podłożu antykliny Wojszyce. Z tą fazą aktywności związany jest również rozwój strefy uskokowej, zlokalizowanej w kulminacji struktury Wojszyce, w sąsiedztwie otworu Kaszewy. Brak jest wyraźnych przesłanek (w obrazie sejsmicznym) świadczących o kontynuacji tego uskoku w najwyższą partię triasu oraz jurę.

Przekroje sejsmiczne zestawiono na 4 profilach z krzywymi anomalii siły ciężkości w redukcji Bouguera oraz gradientem pionowym wyliczonym z anomalii Bouguera. Gradient pionowy jest miarą zmienności rozkładu gęstości w górotworze w kierunku pionowym (Fajklewicz, 2007). Strzałkami zaznaczono na krzywych gradientu pionowego strefy, gdzie najprawdopodobniej występują lokalne zmiany gęstości – zwiększenie lub zmniejszenie. Ponieważ szerokość tych anomalii jest generalnie dość mała, najprawdopodobniej związane są one z najpłycej występującymi utworami jury. Wydaje się to być zgodne z sugestią z rozdziału 7.5.7 na temat występowania, w szczególności na osi struktury, skomplikowanej rzeźby stropu jury górnej, tzn. krasowych ostańców wapiennych o wysokiej gęstości przedzielonych zagłębieniami wypełnionymi osadami węgli brunatnych i iłów miocenu o niskiej gęstości. Charakterystyczne jest przy tym występowanie ujemnej anomalii grawimetrycznej w redukcji Bouguera w kulminacji struktury, tzn. w przegubie antykliny. W rozdziale 7.5.7 postawiono hipotezę, że przyczyną tej anomalii mogą być gęste spękania w utworach jury górnej i środkowej.

Przekroje sejsmiczno-grawimetryczne przez struktury Budziszewice-Zaosie, Konary i Bielsk-Bodzanów

W rozdziale 7.7 dokonano kompleksowej interpretacji danych sejsmicznych i grawimetrycznych dla trzech struktur rozpoznanych archiwalnymi danymi sejsmicznymi z ubiegłego wieku (Budziszewice-Zaosie, Konary i Bielsk), dla których podano też krótką charakterystykę geologiczno-złożową. Zestawiono interpretację zreprocesowanych przekrojów sejsmicznych dla tych trzech struktur (po 4 profile dla każdej struktury, w tym dwa połączone w jeden w przypadku struktury Budziszewice-Zaosie) z krzywymi anomalii rezydualnych siły ciężkości i gradientu poziomego.

Jeśli chodzi o dane grawimetryczne to wykorzystano gridy anomalii rezydualnych opracowane w rozdziale 7.3 – anomalie rezydualne odnoszące się do szacunkowego przedziału głębokości występowania rozpatrywanych dla poszczególnych struktur kompleksów magazynowania/składowania oraz ich bezpośredniego nadkładu (czy też dodatkowych uszczelnień), czyli orientacyjnie 0,5-2 km oraz gridy obliczonego z tych anomalii gradientu poziomego. Na poszczególnych profilach zaznaczono maksima gradientu, które mogą być związane

z występowaniem kontaktów gęstości, uskoków, wyklinowań warstw oraz zmian facji, z którymi wiążą się zmiany gęstości ośrodka geologicznego. W przypadku struktur jurajskich Budziszewice-Zaosie i Konary charakterystyczne są występujące w obrazie anomalii rezydualnych anomalie ujemne w przegubach struktur, korelujące się ze strefami o gorszej jakości obrazu sejsmicznego, zaś maksima gradientu poziomego ze strefami tektonicznymi w obrębie podłoża lub spągu utworów jury. Co ciekawe, obserwuje się też anomalie ujemne na profilach przecinających występującą w rowie strukturę antyklinalną Bielsk-Bodzanów (kulminacja Bielska) w strefie przegubu tej struktury (na profilach poprzecznych), gdzie nie zaznacza się strefa obniżonej jakości obrazu sejsmicznego.

Ponadto, wykorzystano do interpretacji kompleksowej rozkłady prędkości składania opracowane przez podwykonawcę w ramach reprocessingu 12 profili sejsmicznych dla omawianych trzech struktur, skalibrowane prędkościami sejsmicznymi z otworów, które zestawiono z przekrojami sejsmicznymi i krzywymi anomalii grawimetrycznych. Prędkości składania przeliczono na prędkości interwałowe wzorem Dixa, a z tych z kolei wyliczono gęstości ośrodka geologicznego wzorem Gardnera. Modele gęstościowe ośrodka geologicznego zestawiono z przeliczonymi do domeny głębokościowej (w oparciu o ww. prędkości składania) horyzontami sejsmicznymi, otrzymując modele strukturalno-gęstościowe, czyli grawimetryczne.

8. Przygotowanie wytycznych do opracowania projektów robót geologicznych dla lokalizacji kawern w oraz rozpoznania wybranych struktur solankowych

W niniejszym rozdziale przedyskutowano zagadnienia w zakresie wytycznych na potrzeby opracowania projektów robót geologicznych, dotyczących w szczególności uzupełniających badań geologicznych i geofizycznych potrzebnych do szczegółowego rozpoznania potencjalnych magazynów i składowisk substancji, czyli, w naszym przypadku nośników energii takich jak wodór, mieszaniny wodoru i gazu, gaz ziemny oraz sprężone powietrze, a także dwutlenek węgla.

Zagadnienia te były poruszane m.in. w rozdziale **7 Tomu II** (patrz też rozdział 3 niniejszego sprawozdania) jeśli chodzi o rozpoznawanie obszarów perspektywicznych do lokowania kawern w pokładzie najstarszej soli cechsztyńskiej w rejonie wyniesienia Łeby, gdzie w podłożu pokładu soli postuluje się występowanie skomplikowanego systemu wąskich poligonalnych grzbietów anhydrytowych ograniczających panwie solne o rozmiarach najczęściej rzędu 1-2 km, w obrębie których mogą być korzystne warunki do magazynowania (w szczególności rozpatrywano magazynowanie wodoru).

Natomiast o potrzebie wykonania prac rozpoznawczych niezbędnych do lepszego rozpoznania struktur solankowych (dla których rozpatrywano składowanie dwutlenku węgla oraz magazynowanie mieszanin wodoru i gazu ziemnego, gazu ziemnego i ewentualnie sprężonego powietrza) wspomniano ogólnie w rozdziale **7.1** niniejszego sprawozdania przy dyskusji wyników interpretacji danych sejsmicznych dla rozpoznanych archiwalną sejsmiką z ubiegłego wieku struktur Budziszewice-Zaosie, Konary i Bielsk-Bodzanów (kulminacja Bielska). W przypadku rozpoznanej w ramach projektu demo CCS PGE Bełchatów wysokorozdzielczą sejsmiką 2D, otworem badawczym Kaszewy 1 oraz szczegółowym zdjęciem grawimetrycznym (prace polowe i interpretacja ich wyników wykonane w latach 2009-2011) w rozdziale **7.5.7** sformułowano bardziej szczegółowe zalecenia na temat dalszych prac jakie należałoby wykonać dla lepszego rozpoznania struktury, w tym na potrzeby oceny bezpieczeństwa składowania/magazynowania substancji.

W rozdziale **8.1** przedstawiono natomiast w sposób syntetyczny problematykę uregulowań prawnych dotyczących opracowywania projektów robót geologicznych (prg) na poszukiwanie i rozpoznawanie struktur geologicznych – potencjalnych składowisk i magazynów rozpatrywanych w ramach niniejszego przedsięwzięcia substancji. W szczególności dotyczy to zapisów obowiązującego Prawa geologicznego i górniczego oraz odnośnych rozporządzeń, miejsca prg w procesie koncesyjnym i wykorzystania jego wyników – wyniki prg dostarczają informacji wykorzystywanych do sporządzenia dokumentacji niezbędnej do ubiegania się o koncesję na składowanie/magazynowanie substancji.

W rozdziale **8.2** omówiono przykład projektu w zakresie magazynowania wodoru w kawernach w pokładach soli, najbardziej zbliżonego do problematyki poruszanej w niniejszym przedsięwzięciu. Projekt ten, funkcjonujący w Wielkiej Brytanii dzięki adaptacji kawern służących wcześniej do magazynowania gazu miejskiego i gazu ziemnego (wybudowanych jeszcze w połowie ubiegłego wieku), natomiast w tym samym rejonie rozważane jest wykorzystanie głębiej występujących pokładów soli cechsztyńskich i związane z tym prace rozpoznawcze. Informacje te wykorzystano na potrzeby propozycji badań geologicznych i geofizycznych dla wytypowanych obszarów

perspektywicznych w rejonie wyniesienia Łeby. Jeśli chodzi o magazynowanie i składowanie substancji w strukturach solankowych to omówiono trzy projekty (we Francji, Niemczech i Czechach) dotyczące magazynowania mieszanin wodoru i gazu ziemnego (z domieszkami), gdzie zostały wybudowane w latach 1950-tych i 1960-tych magazyny gazu miejskiego, adaptowane później na magazyny gazu, przy czym zwrócono uwagę na projekt w Niemczech (Ketzin), gdzie w tej samej lokalizacji powstał projekt pilotażowego zatłaczania dwutlenku węgla i na bazie jego doświadczeń rozważa się tam teraz magazynowanie wodoru. Ponadto omówiono sześć projektów na świecie w zakresie podziemnego składowania dwutlenku węgla na skalę przemysłową (projekty CCS, czyli obejmujące wychwyt, transport i składowanie dwutlenku węgla), w strukturach solankowych na lądzie. Z tego cztery projekty to aktualnie funkcjonujące (w Kanadzie, USA i Australii), dla których dostępne są bogate informacje w zakresie rozpoznania warunków geologicznych i stanu początkowego ośrodka geologicznego w przypadku wykorzystywanych tam struktur solankowych. Natomiast dwa zakończone (w USA i Algierii) wykorzystywały do składowania CO_2 poziomy solankowe występujące pod złożami węglowodorów. W przypadku tych czterech dużych projektów aktualnie funkcjonujących, podobnie jak w przypadku projektu pilotażowego w Ketzin, były dostępne mniej lub bardziej szczegółowe informacje na temat badań geologiczno-geofizycznych wykonanych na potrzeby rozpoznania (a następnie monitoringu) struktur geologicznych wykorzystywanych do składowania CO_2, przydatne do opracowania wytycznych dla rozpoznania rozpatrywanych w ramach niniejszego przedsięwzięcia obiektów.

Następnie w rozdziale **8.3** omówiono zagadnienia związane z rozpoznaniem obszarów perspektywicznych do lokowania kawern w pokładzie najstarszej soli cechsztyńskiej w rejonie wyniesienia Łeby. Scharakteryzowano przy tym wyczerpująco prace wykonane w ramach niniejszego przedsięwzięcia w zakresie wstępnego udokumentowania proponowanych do rozpoznania obiektów, których wyniki i/lub metodyka mogą być przydatne przy sporządzaniu prg w przedmiotowym zakresie oraz zaproponowano, w oparciu o nie i informacje z przykładowego projektu z Wielkiej Brytanii, obejmującego magazynowanie wodoru w kawernach w pokładach soli cechsztyńskich, orientacyjny zakres badań geologiczno-geofizycznych (i ich szacunkowe koszty) na potrzeby szczegółowego rozpoznania wytypowanych (lub analogicznych) obszarów perspektywicznych dla lokowania kawern do magazynowania wodoru.

W rozdziale **8.4** omówiono zagadnienia związane z rozpoznaniem wytypowanych mezozoicznych struktur solankowych zlokalizowanych w centralnej części Niżu Polskiego. Scharakteryzowano przy tym bardzo wyczerpująco prace wykonane w ramach niniejszego przedsięwzięcia w zakresie wstępnego udokumentowania proponowanych do rozpoznania obiektów, których wyniki i/lub metodyka mogą być przydatne przy sporządzaniu prg w przedmiotowym zakresie. Zaproponowano, w oparciu o zawarte tam wnioski i sugestie oraz informacje z przykładowych projektów z Niemiec, Kanady, USA, Australii, obejmujących składowanie dwutlenku węgla w strukturach solankowych na lądzie, orientacyjny zakres badań geologiczno-geofizycznych (i ich szacunkowe koszty) na potrzeby szczegółowego rozpoznania wytypowanych (lub analogicznych) struktur solankowych w centralnej części Niżu Polskiego, na potrzeby składowania dwutlenku węgla (ew. magazynowania mieszanin gazu ziemnego i wodoru).

8.1 Podstawy prawne

(Adam Wójcicki)

Zagadnienia rozpoznawania, na podstawie projektów robót geologicznych, potencjalnych magazynów i składowisk substancji reguluje zasadniczo Ustawa z dnia 9 czerwca 2011 r. Prawo geologiczne i górnicze (Dz. U. 2023 poz. 633 z późn. zm.; dalej ustawa PGG) oraz szereg odnoszących się do tej problematyki aktów wykonawczych – rozporządzeń. Zgodnie z ustawą PGG rozpoznawanie struktur geologicznych w związku z planowaną działalnością w zakresie podziemnego bezzbiornikowego magazynowania substancji i podziemnego składowania dwutlenku węgla nie wymaga koncesji, odbywa się jedynie na podstawie projektu robót geologicznych.

Projekt robót geologicznych jest dokumentem (opracowaniem geologicznym), który stanowi podstawę wykonania prac i robót geologicznych. Zawiera cel zamierzonych robót geologicznych, sposób ich osiągnięcia, rodzaj dokumentacji geologicznej, która powstanie w efekcie wykonania robót, harmonogram robót, przestrzeń objętą robotami oraz przedsięwzięcia konieczne z uwagi na ochronę środowiska (Majer i Sokołowska, red., 2023).

Podstawę prawną opracowania projektu robót geologicznych stanowi:

– Ustawa z dnia 9 czerwca 2011 r. Prawo geologiczne i górnicze (art. 79 ust. 1, ust. 2);

– Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20 grudnia 2011 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących projektów robót geologicznych, w tym robót, których wykonywanie wymaga uzyskania koncesji (Dz. U. 2023 poz. 155; dalej: rozporządzenie PRG).

Projekt robót geologicznych jest sporządzany zawsze, gdy są planowane roboty geologiczne. Projekt robót geologicznych dotyczący rozpoznawania struktur geologicznych – potencjalnych magazynów i składowisk substancji w związku z planowaną działalnością w zakresie podziemnego bezzbiornikowego magazynowania substancji takich jak wodór, mieszaniny wodoru i gazu ziemnego, i gaz ziemny i (zapewne, ustawa PGG tego nie precyzuje ale też nie zabrania) sprężone powietrze oraz podziemnego składowania dwutlenku węgla podlega procedurze administracyjnej w zakresie wydania decyzji zatwierdzającej przez ministra właściwego ds. środowiska.

Zawartość projektu robót geologicznych określona jest w rozporządzeniu PRG. W rozporządzeniu nie rozróżniono zawartości projektu robót geologicznych w zależności od celu. Bardzo istotne jest to, aby zawartość merytoryczna projektu robót geologicznych była adekwatna do celu jaki ma spełnić dokumentacja geologiczno-inżynierska oraz dokumentacja hydrogeologiczna, tzn., aby zaprojektowane badania pozwoliły udokumentować i ocenić warunki geologiczno-inżynierskie i hydrogeologiczne planowanego obiektu podziemnego (Tabela 71 w Majer i Sokołowska, red., 2023).

Zgodnie z art. 88 ustawy PGG wyniki prac geologicznych, wraz z ich interpretacją, określeniem stopnia osiągnięcia zamierzonego celu wraz z uzasadnieniem, przedstawia się w dokumentacji geologicznej. W przypadku planowanej działalności w zakresie podziemnego bezzbiornikowego magazynowania rozpatrywanych substancji oraz podziemnego składowania dwutlenku węgla wyniki prac rozpoznawczych przedstawia się w ramach następujących dokumentacji: dokumentacji geologiczno-inżynierskiej (art. 91 ustawy PGiG), dokumentacji hydrogeologicznej

(art. 90 ustawy PGiG), a także dokumentacji innych (art. 92 ustawy PGiG) – dotyczy to w szczególności wykonywania i likwidacji otworów wiertniczych oraz badań geofizycznych i określa to szczegółowo rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 23 grudnia 2020 r. w sprawie innych dokumentacji geologicznych (Dz.U. 2020 poz. 449). W przypadku planów wykorzystania do magazynowania lub składowania substancji sczerpanych złóż węglowodorów dochodzi jeszcze zagadnienie dokumentacji geologiczno-inwestycyjnej złoża węglowodorów (art. 89a ustawy PGG), lecz problematyka ta nie mieści się w zakresie niniejszego sprawozdania.

Przy wykonywaniu otworów wiertniczych o głębokości ponad 1000 m na obszarach ochrony przyrody i obszarach ochrony wód użytkowych, oraz otworów o głębokości po nad 100 m przy rozpoznawaniu kompleksu podziemnego składowania dwutlenku węgla w każdym przypadku, wymagana jest przed złożeniem odnośnego projektu robót geologicznych decyzja o środowiskowych uwarunkowaniach (rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 10 września 2019 r. w sprawie przedsięwzięć mogących znacząco oddziaływać na środowisko, Dz.U. 2019 poz. 1839). Z wierceniem otworów na obszarze górniczym i o głębokości ponad 100 m poza obszarem górniczym wiąże się obowiązek sporządzania planu ruchu zakładu górniczego (art. 105 ustawy PGG; rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 8 grudnia 2017 r. w sprawie planów ruchu zakładów górniczych, Dz.U. 2017 poz. 2293).

Ponadto, zgodnie z art. 127a ust. 4 ustawy PGG realizowane na podstawie PRG prace dotyczące rozpoznawania kompleksu podziemnego składowania dwutlenku węgla mogą być prowadzone jedynie na obszarach, na których dopuszcza się lokalizowanie kompleksu podziemnego składowania dwutlenku węgla zgodnie z aktualnym rozporządzeniem w tym przedmiocie. Obowiązujące rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 3 września 2014 r. w sprawie obszarów, na których dopuszcza się lokalizowanie kompleksu podziemnego składowania dwutlenku węgla (Dz.U. 2014 poz. 1272) wskazuje jedynie jeden taki obszar w NE części polskiej strefy ekonomicznej Bałtyku, lecz trwają prace w Ministerstwie Klimatu i Środowiska nad nowelizacją tego rozporządzenia w zakresie umożliwienia lokalizowania kompleksu podziemnego składowania dwutlenku na obszarach lądowych.

Dokumentacja geologiczno-inżynierska oraz dokumentacja hydrogeologiczna są wymagane zarówno do wniosku o udzielenie koncesji na podziemne bezzbiornikowe magazynowanie substancji jak i do wniosku o udzielenie koncesji na podziemne składowanie dwutlenku węgla.

Zawartość dokumentacji geologiczno-inżynierskiej oraz dokumentacji hydrogeologicznej sporządzanych w celu określenia warunków geologiczno-inżynierskich oraz warunków hydrogeologicznych na potrzeby podziemnego bezzbiornikowego magazynowania substancji i podziemnego składowania dwutlenku węgla określa (ogólnie) ustawa PGG (w tym art. 91 ust. 2 i art. 90 ust. 2) oraz (szczegółowo) rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 18 listopada 2016 r. w sprawie dokumentacji hydrogeologicznej i dokumentacji geologiczno-inżynierskiej (Dz.U. 2016 poz. 2033). Generalnie można stwierdzić, że jeśli chodzi o udokumentowanie warunków geologiczno-inżynierskich i hydrogeologicznych to wyraźnie ostrzejsze wymogi są stawiane w przypadku prac dotyczących planowanego podziemnego składowania dwutlenku węgla. Na przykład wymagane jest w tym przypadku sporządzenie dokładnego trójwymiarowego geologicznego modelu górotworu dla podziemnego składowiska dwutlenku węgla i kompleksu składowania, nadkładu i obszarów połączonych hydraulicznie oraz płynów złożowych, który jest następnie wykorzystywany i aktualizowany na potrzeby monitorowania

zachowania zatłoczonego dwutlenku węgla w trakcie funkcjonowania składowiska, w okresie jego zamknięcia i po przekazaniu odpowiedzialności organowi koncesyjnemu. Sporządzenie oraz aktualizacja takiego modelu wymaga wykonania (i powtarzania co pewien czas) wysokorozdzielczej sejsmiki.

8.2 Przykłady przedsięwzięć w zakresie rozpoznawania obszarów lokalizacji kawern solnych i struktur solankowych na świecie

(Adam Wójcicki)

8.2.1 Struktury solne

Jeśli chodzi o struktury solne to historycznie do ich poszukiwań i wstępnego rozpoznawania, w szczególności wysadów solnych wykorzystywano już około stu lat temu grawimetrię i sejsmikę refrakcyjną (Fajklewicz, 2007; Reynolds, 2011). Gradienty pomierzonych anomalii siły ciężkości (grawimetrycznych) pozwalają na stosunkowo dobre wstępne wykartowanie wysadów soli cechsztyńskich, gdyż gęstość soli jest zdecydowanie niższa od gęstości budujących nadkład mezozoicznych skał klastycznych i węglanowych. Natomiast gęstość anhydrytu jest wyraźnie wyższa od gęstości nadkładu mezozoicznego. Jednakże w przypadku pokładów soli, czyli (teoretycznie) poziomo warstwowanego ośrodka geologicznego grawimetria bywa nieprzydatna, chyba, że rzeźba powierzchni stropu soli i/lub anhydrytów bywa urozmaicona – wtedy wpływ rzeźby powierzchni jest możliwy do prześledzenia w obrazie anomalii rezydualnych siły ciężkości, co z kolei może być przesłanką dla zaprojektowania bardziej szczegółowych prac geofizycznych i ewentualnie lokalizacji nowych otworów. Natomiast podstawą do szczegółowego rozpoznania struktur solnych są, podobnie jak w przypadku poszukiwania i rozpoznawania złóż węglowodorów i innych surowców, metody sejsmiczne, najlepiej w wariancie sejsmiki powierzchniowej 3D (Reynolds, 2011), czasami też, w przypadku wysadów solnych, prześwietlania sejsmiczne.

Według informacji zebranych w rozdziale **1.1** (Tabela 1-3 i Fig. 1-2) do budowy kawern do magazynowania wodoru wykorzystuje się prawie wyłącznie wysady solne. Tylko w jednym przypadku, w projekcie Teesside w Wielkiej Brytanii magazynuje się od 1972 roku wodór w kawernach w pokładach soli, co być może przykładem najbliższym analizowanym w ramach niniejszego przedsięwzięcia scenariuszom magazynowania wodoru w pokładzie cechsztyńskiej soli najstarszej na obszarze wyniesienia Łeby. Rozważana jest rozbudowa tego magazynu oraz budowa innych, o generalnie podobnych warunkach geologicznych, w NW części Anglii (prace studialne – Murray i in., 2016; oraz publikacja Williams i in., 2022). Ponadto na obszarze środkowej Anglii są perspektywiczne pokłady soli w obrębie sekwencji Mercia Mudstone Group (kajper). Funkcjonujący od 1972 roku magazyn Teesside wykorzystuje wybudowane wcześniej do innych celów kawerny w obrębie stosunkowo płytko występującej i niezbyt miąższej (maksymalnie ok. 45 m czystej soli) formacji Boulby Halite (Z3; kawerny na głębokości 380 m). W regionie tym prowadzono od połowy XX wieku magazynowanie gazu miejskiego (40-60% H_2) i gazu ziemnego. Rozpoznawano pokłady soli sejsmiką 2D (w połowie XX wieku nie było jeszcze sejsmiki 3D) i otworami. W obrębie cechsztynu perspektywiczna w rejonie Teesside jest ponadto głębiej występująca (ok. 1400 m p.p.t), miąższa (ok. 150 m w głównym pokładzie soli) i dotychczas niezagospodarowana formacja Fordon Evaporite Fm. (Z2). W przypadku szczegółowego rozpoznania lokalizacji kawern w tym rejonie, w szczególności głębiej występującej formacji soli cechsztyńskiej (Murray i in., 2016; Williams i in., 2022) zalecane byłoby wykonanie sejsmiki 3D oraz odwiercenie nowych otworów, w tym celem poboru prób do badań parametrów geomechanicznych soli. Największą pozycją kosztów byłoby tu wykonanie sejsmiki 3D. Orientacyjny koszt sejsmiki 3D na lądzie (informacje z Internetu) w przeliczeniu na złotówki to, przyjmując obszar badań 100 km^2, kwota rzędu 10 mln zł, zaś odwiercenie otworu badawczego z pobraniem rdzeni to koszt kilkakrotnie mniejszy (w zależności od głębokości).

8.2.2 Struktury solankowe

Generalnie można stwierdzić, że do rozpoznania struktur solankowych na potrzeby składowania dwutlenku węgla (czy też magazynowania gazu ziemnego) stosuje się generalnie analogiczne badania geofizyczne jak w przypadku poszukiwań naftowych (Chadwick i in., 2008).

W rozdziale **1.1** (Tabela 1-3 i Fig. 1-2) zinwentaryzowano trzy projekty, gdzie prowadzono magazynowanie mieszanin wodoru i gazu ziemnego (z domieszkami) w strukturach solankowych. Są to magazyny Beynes (Francja), Ketzin (Niemcy) i Lobodice (Czechy) w piaskowcach jury i (w ostatnim przypadku) miocenu. Zasadniczo są to wybudowane w latach 1950-tych i 1960-tych magazyny gazu miejskiego, zaadaptowane później na magazyny gazu ziemnego (Sambo i in., 2022; Zivar i in., 2021). W zależności od procesu przemysłowego w jakim jest wytwarzany (najczęściej z przeróbki węgla kamiennego), gaz miejski zawiera głównie wodór i metan, oraz domieszki dwutlenku węgla i (nieznaczną) tlenku węgla. Gdy gaz miejski był zastępowany przez „czystsze" paliwo jakim był gaz ziemny, podziemne magazyny gazu miejskiego były zwykle adaptowane do magazynowania gazu ziemnego. Przed budową tych magazynów rozpoznano przeznaczone dla nie struktury geologiczne analogicznie jak przy rozpoznawaniu struktur perspektywicznych dla występowania złóż węglowodorów (Reynolds, 2011), tzn. sejsmiką 2D (sejsmiki 3D jeszcze wtedy nie było), a następnie otworami. Nie udało się znaleźć informacji na temat szczegółowego zakresu badań struktur geologicznych w przypadku tych magazynów, ale ponieważ prace te wykonywano w połowie ubiegłego wieku (i wykorzystywano wyniki wcześniejszych badań), to, z uwagi na postęp technologiczny jaki nastąpił od tego czasu, i tak mają one teraz jedynie znaczenie historyczne.

Pewnym wyjątkiem i bardzo interesującym przykładem jest tu magazyn w Ketzin (Niemcy, k. Poczdamu), gdzie magazynowano najpierw gaz miejski a następnie gaz ziemny w aquiferze dolnojurajskim, do 2000 roku (Sambo i in., 2022; Zivar i in., 2021). Następnie (lata 2008-2013) zatłaczano tam dwutlenek węgla do niżej położonego kolektora górnotriasowego, piaskowca trzcinowego (formacja Stuttgart) w sumarycznej ilości 67 000 ton, a więc był to projekt pilotażowy (Lüth i in., 2017). Podstawową metodą geofizyczną w zakresie szczegółowego rozpoznania miejsca składowania była wykonana przed rozpoczęciem zatłaczania CO_2, w 2005 roku, wysokorozdzielcza sejsmika 3D – zastosowano wielkość binu 12 x 12 m z uwagi na wielkość badanego obszaru (12 km^2) i przewidywaną relatywnie niewielką ilość zatłaczanego dwutlenku węgla, dostosowując jednocześnie inne parametry tak aby optymalnie zobrazować kolektor piaskowca trzcinowego występujący na głębokości ok. 650 m, zaś przedmiotem obrazowania był przedział głębokości do ok. 1000 m (Juhlin i in., 2007; Giese i in., 2009). Lokalizacja ta była wcześniej rozpoznana archiwalną sejsmiką 2D o jakości i rozdzielczości niewystarczającej dla postawionego zadania geologicznego. Omawiane zdjęcie sejsmiczne 3D było jednocześnie wykorzystywane jako punkt odniesienia dla monitoringu zatłoczonego CO_2, zgodnie z wymogami Dyrektywy 2009/31/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie geologicznego składowania dwutlenku węgla, tzn. sejsmika 3D była powtarzana co kilka lat w trakcie i po zakończeniu zatłaczania. Wykorzystano je ponadto do zobrazowania pozostałości gazu magazynowanego wcześniej w nadkładzie, w kolektorze dolnojurajskim. Obok sejsmiki 3D do rozpoznania składowiska posłużyły cztery nowe otwory nawiercające kompleks składowania, względnie jego nadkład, wykonane do celów zatłaczania i monitoringu CO_2 (Lüth i in., 2017; Wipki i in., 2016). Sejsmikę 3D uzupełniono o pomiary sejsmiczne w otworach (VSP), ze źródłem wzdłuż profili na powierzchni (MSP) oraz

międzyotworową tomografię sejsmiczną. Prowadzono też w otworach monitoring tomografii elektrooporowej (ERT), obok pomiarów temperatury i ciśnienia oraz badań szczelności otworów, a także monitoring gazów rozpuszczonych w solance, w tym występowania dodawanych do strumienia CO_2 markerów (Giese i in., 2009; Wipki i in., 2016). Ponadto prowadzono powierzchniowy monitoring geochemiczny powietrza glebowego na obszarze 2 km^2 wokół otworu zatłaczającego, w tym także po zakończeniu zatłaczania i zlikwidowaniu otworów – zatłaczającego i monitoringowych oraz monitoring interferometrii satelitarnej ruchów pionowych gruntu (Wipki i in., 2016). Z kolei obecnie rozważa się w tej lokalizacji, na bazie doświadczeń projektu pilotażowego zatłaczania dwutlenku węgla, magazynowanie wodoru, do czego mogłyby być wykorzystany kolektor piaskowców retu (formacja Exter), dobrze uszczelniony u góry i u dołu, występujący ponad warstwą piaskowca trzcinowego, gdzie składowany jest CO_2 i poniżej kolektora dolnojurajskiego, gdzie niegdyś magazynowano gaz miejski, potem gaz ziemny (Döpp i in., 2023).

Natomiast Tabela 1-4 i Fig. 1-3 w rozdziale **1.1** przedstawiają projekty w zakresie podziemnego składowania dwutlenku węgla na skalę przemysłową, realizowane w ramach projektów CCS (wychwyt, transport i składowanie dwutlenku węgla), gdzie w sześciu przypadkach wykorzystuje się (lub wykorzystywano w przypadku projektów już zakończonych) do składowania CO_2 struktury solankowe na lądzie. Są to cztery projekty aktualnie funkcjonujące: Boundary Dam 3 Carbon Capture and Storage (a właściwie jego podprojekt Aquistore) (Kanada), Gorgon Carbon Dioxide Injection (Australia), Illinois Industrial Carbon Capture and Storage (USA) i Quest (Kanada). Ponadto można tu wymienić dwa projekty zakończone o podobnej skali: Cranfield (USA) i In Salah (Algieria), gdzie zatłaczano dwutlenek węgla do poziomów solankowych podścielających odpowiednio złoża ropy naftowej i gazu ziemnego. Projekty te scharakteryzowano w raportach z kolejnych etapów realizowanego przez PIG-PIB dla Ministerstwa Klimatu i Środowiska przedsięwzięcia „Zadanie KAPSCO2: monitorowanie statusu projektów CCS" (KAPSCO2, 2022). Można zauważyć, że w przypadku projektów aktualnie funkcjonujących szczegółowe rozpoznanie miejsc składowania służyło jednocześnie jako punktu odniesienia dla monitoringu w trakcie zatłaczania dwutlenku (oraz planowanych dalszych etapów życia projektów – po zamknięciu składowiska i po przekazaniu odpowiedzialności za składowisko przez operatora organowi koncesyjnemu), czyli stanowi podstawę monitoringu stanu początkowego, zwanego też monitoringiem zerowym (ang. *baseline*). Obowiązujące w Ameryce Północnej i Australii, gdzie zlokalizowane są te cztery projekty, generalne wymogi w tym przedmiocie są analogiczne do tych krajach UE, EOG i w Wielkiej Brytanii.

W świetle dostępnych informacji, mniej lub bardziej szczegółowych (KAPSCO2, 2022) można stwierdzić, że zakres programów szczegółowego rozpoznania/monitoringu zerowego dla omawianych czterech projektów składowania CO_2 w skali przemysłowej (Aquistore w ramach Boundary Dam, Kanada; Gorgon, Australia; Illinois, USA i Quest, Kanada) jest w znacznym stopniu podobny do zakresu projektu pilotażowego Ketzin (Niemcy), podstawową różnicą jest natomiast skala projektu (zatłaczanie rzędu miliona ton CO_2/rok i więcej wobec kilkunastu tysięcy ton rocznie). Projekty zakończone (Cranfield, USA; In Salah, Algieria) wykorzystywały do składowania dwutlenku węgla struktury rozpoznane wcześniej (przy poszukiwaniu i zagospodarowaniu złóż węglowodorów), poziomy solankowe poniżej sczerpanymi złożami węglowodorów.

W projekcie Aquistore (Kanada) dwutlenek węgla jest składowany w kolektorze kambryjsko-ordowickim (piaskowce formacji Deadwood i Winnipeg) na głębokości ok. 3400 m. Prace rozpoczęto od analiz dostępnych materiałów archiwalnych (stosunkowo bogatych, gdyż jest to obszar

poszukiwań naftowych), reinterpretacji archiwalnej sejsmiki 2D i analiz laboratoryjnych na próbkach rdzeni oraz opracowania wstępnego modelu geologiczno-geofizycznego kompleksu składowania, co pozwoliło zaprojektować zdjęcie sejsmiczne 3D na obszarze ok. 30 km^2, obejmującym planowaną lokalizację otworu zatłaczającego, wykonane w 2012 roku (Rostron i in., 2014). Pozostawiono po tym geofony na głębokości 20 m w sieci 2,5 x 2,5 km, tworząc infrastrukturę do przyszłego stałego monitoringu sejsmicznego. Na podstawie wyników interpretacji 3D zlokalizowano i odwiercono w tym samym roku otwór (docelowo zatłaczający) o głębokości 3400 m, gdzie wykonano bogaty zestaw badań geofizyki wiertniczej, testów złożowych i opróbowań horyzontów złożowych, a także pobrano rdzenie z kolektora i uszczelnienia, oraz drugi otwór, monitoringowy o tej samej głębokości. Sejsmikę 3D uzupełniono następnie o międzyotworową tomografię sejsmiczną i pomiary sejsmiczne w otworach (VSP). Prowadzono powierzchniowy monitoring geochemiczny powietrza glebowego w sąsiedztwie otworu zatłaczającego, a także monitoring płytko występujących wód podziemnych w istniejących i odwierconych do tego celu płytkich otworach (do głębokości ok. 42 m).

Projekt Gorgon (Australia) obejmuje składowanie CO_2 na obszarze wyspy Barrow (stan Australia Zachodnia), na głębokości ok. 2000 m w górnojurajskich piaskowcach formacji Dupuy. Analizę bogatych archiwalnych materiałów geologiczno-geofizycznych z poszukiwań naftowych (jest to obszar, gdzie występują złoża węglowodorów) w tym rejonie uzupełniono o dane z otworu badawczego odwierconego w 2006 roku, gdzie przeanalizowano pod kątem parametrów złożowych wyniki badań otrzymane z geofizyki wiertniczej i wyniki analiz laboratoryjnych i testów w warunkach złożowych na próbkach rdzeni pobranych z kompleksu składowania i jego bezpośredniego nadkładu. Na podstawie tych danych opracowano wstępne modele statyczne i dynamiczne oraz zaprojektowano infrastrukturę składowiska. W 2009 roku wykonano zdjęcie sejsmiczne 3D na obszarze blisko 100 km^2, którego wyniki wykorzystano na potrzeby rozpoznania kompleksu składowania, monitoringu zerowego, do uszczegółowienia i weryfikacji modeli statycznych i dynamicznych oraz do finalnej lokalizacji otworów zatłaczających i monitoringowych (Trupp i in., 2013).

Projekt Illinois (USA) bazuje na doświadczeniach i jest do pewnego stopnia kontynuacją dużego, już zakończonego projektu pilotażowego Illinois Basin Decatur Project (w zasadzie był to projekt przedkomercyjny w niedużej skali), gdzie w ciągu 3 lat (2011-2014) zatłoczono ok. 1 mln ton CO_2 do górnokambryjskich piaskowców formacji Mount Simon Sandstone występujących na głębokości ok. 2100 m (KAPSCO2, 2022). Rozpoznanie kompleksu składowania rozpoczęto w tym rejonie od opartych na materiałach archiwalnych regionalnych badaniach Basenu Illinois w latach 2003-2005, następnie w roku 2007 wykonano sejsmikę 2D dla rozpoznania tektoniki w obrębie kompleksu (dwa profile). W roku 2009 wykonano otwór badawczy (docelowo zatłaczający), z bogatym zestawem badań geofizyki wiertniczej i pobraniem rdzeni z przedziału głębokości kompleksu składowania do analiz i testów (Finley i in., 2013). Sejsmikę 3D wykonano w 2010 roku i uzupełniono następnie o pomiary sejsmiczne w otworach (VSP), których wykonano w sumie sześć (dwa zatłaczające, w tym jeden wymieniony wyżej i cztery monitoringowe). Realizowano też szeroki zakres monitoringu otworowego i powierzchniowego. Zakres i metodyka rozpoznania i monitoringu składowiska są w znacznym stopniu podobne do tych w projekcie Ketzin w Niemczech (Streibel i in., 2014), jako różnicę można podać brak tomografii między-otworowej, elektroporowej i sejsmicznej, stosowanych w projekcie Ketzin. Projekt Illinois (Industrial Carbon Capture and Storage) obejmuje składowanie dwutlenku węgla w tym samym kolektorze, w pobliskiej lokalizacji (zasadniczo rozpoznanej wcześniejszymi badaniami), na skalę ok. trzykrotnie większą (tzn. ok. 1 mln ton rocznie)

i zastosowano w nim analogiczne techniki monitoringu wraz z oceną ewentualnych zagrożeń dla wód użytkowych w związku z zatłaczaniem dwutlenku węgla (KAPSCO2, 2022).

W projekcie Quest (Kanada) dwutlenek węgla jest zatłaczany do kambryjskiego piaskowca formacji Basal Cambrian Sands, na głębokości około 2000 m. Rozpoznanie kompleksu składowania rozpoczęto w 2008 roku od analizy i reinterpretacji archiwalnych danych geologiczno-geofizycznych, które następnie uzupełniono wynikami badań z dwóch nowych otworów badawczych (geofizyki wiertniczej, analiz i testów na próbach rdzeni). W 2010 roku wykonano wysokorozdzielcze zdjęcie aeromagnetyczne (ponieważ kompleks składowania zalega bezpośrednio na podłożu prekambryjskim, odzwierciedlając jego rzeźbę) i w tym samym roku wykonano też sejsmikę 3D i kolejny otwór, w którym wykonano testy zatłaczania wody (Spence, 2010). Przed rozpoczęciem zatłaczania (2015 rok) wykonano w otworach monitoring stanu początkowego VSP (w tym ze źródłem wzdłuż profili na powierzchni), którego wyniki zostały zintegrowane z wynikami sejsmiki 3D (Rock i in., 2017). Ponadto prowadzono monitoring mikrosejsmiczny w jednym otworze, profilowanie pulsacyjne neutronowe w dwóch otworach obserwacyjnych, powierzchniowy monitoring geochemiczny powietrza glebowego, a także składu wód użytkowych w istniejących i odwierconych w ramach projektu płytkich otworach (do 200 m).

Generalnie można powiedzieć, że w projektach CCS obejmujących składowanie dwutlenku węgla w strukturach solankowych na lądzie stosuje się do rozpoznania potencjalnych składowisk/monitoringu ich stanu początkowego mniej lub bardziej podobny zestaw badań geologiczno-geofizycznych. Głównymi pozycjami kosztów są w tym przypadku nowoczesna sejsmika 3D, zwłaszcza w wersji z budową stałej infrastruktury monitoringu (czyli z regularnym powtarzaniem pomiarów w tym samym miejscu i konfiguracji, na co też używa się terminu sejsmika 4D) oraz, co istotne, wykonanie otworów badawczych z zestawem konwencjonalnych i niekonwencjonalnych badań geofizyki wiertniczej oraz poborem rdzeni. Jak wspomniano w poprzednim rozdziale orientacyjny koszt sejsmiki 3D w przeliczeniu na złotówki to, przyjmując obszar badań 100 km^2, kwota rzędu 10 mln zł. Nie uwzględnia to budowy stałej infrastruktury monitoringu (sejsmika 3D), ani też oczywiście powtarzania pomiarów w ramach monitoringu składowiska. Natomiast całkowity koszt otworu badawczego nawiercającego kompleks składowania może wynieść (informacje z Internetu), w zależności od głębokości i zestawu badań geofizyki wiertniczej, testów i opróbowań horyzontów złożowych oraz zakresu rdzeniowania, 10-30 mln zł (koszty otworów w Polsce mogą być jeszcze wyższe z uwagi na relatywnie niewielki rynek). Przyjmując, że w fazie rozpoznawczej/określenia stanu początkowego potencjalnego składowiska obok wykonania sejsmiki 3D wiercimy dwa otwory badawcze (wykorzystane później jako zatłaczający i monitoringowy, do których dojdą kolejne na etapie budowy składowiska) to otrzymujemy szacunkową kwotę 50 mln zł, do której należy doliczyć ok. 10% na inne badania stanu początkowego (VSP, międzyotworowe, powierzchniowe geochemiczne, składu użytkowych wód podziemnych z ew. wierceniem płytkich otworów, satelitarne, etc.), czyli razem mamy ok. 55 mln zł.

8.3 Rozpoznanie wytypowanych obszarów lokalizacji kawern solnych

(Adam Wójcicki na podstawie rozdziałów 6-17 Tomu II, redagowanego przez Martę Adamuszek)

Poniżej scharakteryzowano prace wykonane w ramach niniejszego przedsięwzięcia w zakresie wstępnego udokumentowania proponowanych do rozpoznania obiektów, których wyniki i/lub metodyka mogą być przydatne przy sporządzaniu prg w przedmiotowym zakresie.

Charakterystyka geologiczna utworów cechsztynu, w tym perspektywicznego dla magazynowania substancji pokładu najstarszej soli kamiennej, w obrębie wyniesienia Łeby została przedstawiona w rozdziale **6 Tomu II** (patrz też rozdziały 2 i 3 niniejszego sprawozdania). W rozdziale **7 Tomu II** przedstawiono analizy występowania w podłożu pokładu soli skomplikowanego systemu wąskich poligonalnych grzbietów anhydrytowych ograniczających panwie solne o rozmiarach rzędu 1-2 km, gdzie mogą być korzystne warunki do lokowania kawern (a nie w obrębie grzbietów, gdzie pokład soli może nawet zanikać).

Na obszarze NE części wyniesienia Łeby zostały wyznaczone (w oparciu o mapy miąższości pokładu soli sporządzone na podstawie danych otworowych, interpretacji danych sejsmicznych 2D oraz dostępnych informacji na temat parametrów soli kamiennej i kawern, a także o ocenę potencjału magazynowego i dostępności terenu), cztery obszary najbardziej perspektywiczne pod kątem lokowania kawern (rozdziały **8-10 Tomu II**).

Modele strukturalne i otrzymane z nich miąższości pokładu soli najstarszej (Na1) na obszarze wyniesienia Łeby i wybranej do dalszych analiz NE części tego obszaru, opracowane w oparciu o interpretację danych otworowych i sejsmiki zostały scharakteryzowane w rozdziale **8 Tomu II**. Wybór i ranking obszarów najbardziej perspektywicznych oparto na wykonanej w rozdziale **9 Tomu II** ocenie potencjału magazynowego, gdzie obok parametrów pokładu soli (w tym miąższości pokładu soli i własności soli) uwzględnia się także parametry geometryczne i operacyjne kawern. Przy wyznaczaniu tych obszarów uwzględniono ponadto zagospodarowanie terenu (w tym zabudowę), formy ochrony przyrody wyższego rzędu (parki narodowe wraz z otulinami, parki krajobrazowe bez otulin, rezerwaty przyrody wraz z otulinami oraz obszary Natura 2000 oraz pas nadbrzeżny) i możliwe konflikty interesów (lokalizacja inwestycji, np. elektrowni atomowej). W rozdziale **10 tomu II** scharakteryzowano 4 wybrane obszary: A - basen Jastrzębiej Góry, B - basen Władysławowa, C - basen Zdrady oraz D - basen Lisewa (Fig. 8-1).

W **rozdziale 11 Tomu II** przedstawiono parametry geomechaniczne odnoszące się do pokładu soli w obrębie wytypowanych obszarów najbardziej perspektywicznych pod kątem lokowania kawern, w oparciu o dostępne dane z tego rejonu oraz informacje dotyczące analogicznych pokładów soli w Polsce, Europie i na świecie. W rozdziale **12 Tomu II** przedyskutowano parametry operacyjne kawern jakie miałyby powstać w obrębie wytypowanych obszarów najbardziej perspektywicznych.

Natomiast w rozdziale **13 Tomu II** zostały scharakteryzowane warunki hydrogeologiczne na obszarze wyniesienia Łeby, tzn. występowanie użytkowych wód podziemnych (Jednolite Części Wód Podziemnych, Główne Zbiorniki Wód Podziemnych) oraz poszczególnych pięter wodonośnych występujących na rozpatrywanym obszarze, na potrzeby oceny ewentualnych zagrożeń dla użytkowych poziomów wodonośnych w związku z budową i eksploatacją kawern magazynowych w rozpatrywanym rejonie. Z kolei na potrzeby oceny jakości izolacji poziomów wodonośnych

charakteryzujących się znaczącą mineralizacją (i oceny ewentualnych zagrożeń dla wód użytkowych) opracowano w rozdziale **14 Tomu II** charakterystykę hydrogeochemiczną występujących w rejonie wyniesienia Łeby pięter wodonośnych, gdzie występują wody podziemne charakteryzujące się znaczącą mineralizacją, tzn. w obrębie utworów mezozoiku oraz paleozoiku (pod solami cechsztyńskimi).

W rozdziale **15 Tomu II** przedstawiono modele numeryczne, uwzględniające naprężenia w obrębie modelu kawerny i otworu, które zostały następnie wykorzystane do badań stabilności i szczelności kawern solnych, a w rozdziale **16 Tomu II** wyniki modelowania numerycznego stabilności i szczelności kawern solnych zlokalizowanych w wybranych (4) otworach w obrębie każdego z czterech wytypowanych obszarów perspektywicznych, dla których wcześniej opracowano modele strukturalno-parametryczne. W modelach dla każdej lokalizacji przyjęto, że kawerna zlokalizowana jest w pokładzie soli, którą przykrywa miąższa warstwa nadkładu. Zostały uwzględnione w modelach parametry geomechaniczne soli i operacyjne kawern. Przeanalizowano wyniki modelowań pod kątem wpływu parametrów geometrycznych, geomechanicznych i operacyjnych na tempa deformacji wokół kawern oraz naprężeń efektywnych, które stanowią kluczowe narzędzie do oceny stabilności i szczelności kawern.

W rozdziale **17**, obejmującym krótkie podsumowanie wykonanych prac dotyczących problematyki magazynowania substancji (w szczególności wodoru) w kawernach w pokładach soli cechsztyńskich, opracowano (wykorzystując m.in. wyniki ww. modelowań i ich interpretacji) wskazówki dotyczące wyboru lokalizacji pod budowę podziemnych magazynów w obrębie wytypowanych obszarów w rejonie wyniesienia Łeby. Wskazówki te obejmowały rekomendowane kryteria dotyczące głębokości występowania i miąższości pokładu soli, występowania i miąższości przewarstwień w jego obrębie, obecności uskoków i struktur tektonicznych oraz stopnia zanieczyszczenia soli (domieszek). Ponadto zarekomendowano wybór i ranking lokalizacji w oparciu o ocenę potencjału magazynowego, gdzie obok parametrów pokładu soli uwzględnia się także parametry geometryczne i operacyjne kawern, jak również ocenę dostępności terenu (zagospodarowanie terenu, formy ochrony przyrody i możliwe konflikty interesów).

Dzięki temu, inwestorzy i decydenci mogą dokonać wyboru lokalizacji, która najlepiej spełnia zarówno kryteria geologiczne, jak i operacyjne, maksymalizując efektywność i rentowność inwestycji, uwzględniając powyższe informacje a następnie wykonane przez nich dalsze badania i analizy w zakresie wykonalności i oceny bezpieczeństwa projektowanego magazynu. Przedstawiono ponadto propozycje prac geologiczno-geofizycznych mających na celu lokalizację kawern w obrębie wytypowanych obszarów w rejonie wyniesienia Łeby.

8.3.1 Propozycje uzupełniających badań geologicznych i geofizycznych

Istotnym wkładem do interpretacji miąższości soli Na1 są, wspomniane wyżej, analizy występowania w podłożu pokładu soli skomplikowanego systemu wąskich poligonalnych grzbietów anhydrytowych (wyższego i niższego rzędu) ograniczających panwie solne o rozmiarach rzędu 1-2 km (rozdział **7 Tomu II** – *Andrzej Głuszyński, Marek Jarosiński, Marcin Dąbrowski, Tadeusz Peryt*). Z uwagi na wymaganą miąższość pokładu soli i stabilność budowanych kawern jedynie w obrębie tych panwi mogą być korzystne warunki do lokowania kawern (a nie w obrębie grzbietów, gdzie pokład soli może nawet zanikać). Analizy te wykonano w oparciu o interpretację zdjęcia sejsmicznego 3D Opalino-Lubocino zlokalizowanego w strefie na południe od wytypowanych obszarów perspektywicznych.

Wskazano w rozpatrywanym rejonie NE części wyniesienia Łeby, obejmującym cztery obszary najbardziej perspektywiczne pod kątem lokowania kawern (Fig. 8-1), na możliwość występowania takich struktur w obszarach poza zdjęciem sejsmicznym 3D, w oparciu o interpretację rezydualnych anomalii grawimetrycznych i profili sejsmicznych.

Wnioski te (i do pewnego stopnia doświadczenia z omawianego w rozdziale 8.2.1 projektu Teesside w Wielkiej Brytanii i dalszych przedsięwzięć tam planowanych) były podstawą dla przedstawienia propozycji badań geofizycznych i geologicznych przedstawionych poniżej.

Proponuje się wykonanie w pierwszej kolejności szczegółowego zdjęcia grawimetrycznego o zagęszczeniu punktów 10-12 pkt/km^2 na zaznaczonym na Fig. 8-1 obszarze badań, o powierzchni ok. 117 km^2. Z uwagi na nieinwazyjny, a więc nie mający wpływu na środowisko, charakter badań grawimetrycznych nie powinno być większych problemów z wejściem na obszary parków krajobrazowych i obszary NATURA 2000. Dostępne dane grawimetryczne na tym obszarze są wynikami pomiarów z różnych okresów (od początku lat 1970-tych do początku lat 2000-tych), o różnym stopniu szczegółowości i różnej dokładności pomiaru (Baza CBDG PIG-PIB). Generalnie stopień zagęszczenia pomiarów dla tych archiwalnych półszczegółowych zdjęć grawimetrycznych jest kilkakrotnie niższy niż proponowane 10-12 pkt/km^2. W przypadku zdjęcia grawimetrycznego o zagęszczeniu 10-12 pkt/km^2 odległość między punktami pomiarowymi byłaby nie mniejsza niż 300 m. Z uwagi na wspomniane wyżej rozmiary będących przedmiotem rozpoznania panwii solnych rzędu 1-2 km (oraz jeszcze mniejsze grzbietów anhydrytowych wyższego i niższego rzędu) takie zagęszczenie pomiarów byłoby optymalne (a archiwalnych pomiarów – niewystarczające) dla późniejszej interpretacji anomalii rezydualnych na potrzeby optymalnego zaprojektowania zdjęć sejsmicznych 3D w rozpatrywanych obszarach A, B, C i D na Fig. 8-1.

Natomiast sejsmika 3D powinna być w takim przypadku wykonana w obrębie obszarów A, B, C, D. Na tym etapie trudno jeszcze podać ich dokładną lokalizację, gdyż będzie ona określona na podstawie interpretacji zdjęcia grawimetrycznego. Szacunkowo, najprawdopodobniej będą to strefy o powierzchni rzędu 10-30 km^2, w zależności od obszaru (czyli w sumie ok. 80 km^2). Metodyka akwizycji powinna zostać ukierunkowana na rozpoznanie utworów cechsztynu, w szczególności interesującego z punktu widzenia zadania geologicznego przedziału głębokości występowania pokładu soli najstarszej i anhydrytu dolnego (szacunkowo 600-1000 m p.p.t).

Z badań sejsmicznych 3D będą wyłączone obszary zabudowane, natomiast można stwierdzić na podstawie dotychczasowej praktyki (np. dostępnych w Internecie decyzji organu koncesyjnego na tego rodzaju prace geofizyczne), że badania na obszarach NATURA 2000 i parków krajobrazowych

będą wymagały decyzji o środowiskowych uwarunkowaniach i zgody właściwych organów. Najprawdopodobniej będzie także wymagane sporządzenie raportu o oddziaływaniu na środowisko zgodnie z art. 66 ustawy z dnia 3 października 2008 r. o udostępnianiu informacji o środowisku i jego ochronie, udziale społeczeństwa w ochronie środowiska oraz o ocenach oddziaływania na środowisko (Dz.U. 2023 poz. 1094). W związku z powyższym, w zależności od obszaru, inwestor może otrzymać taką zgodę lub nie. W szczególności można zauważyć (Fig. 8-1), że obszar A znajduje się niemal w całości na terenie parku krajobrazowego i sąsiaduje z obszarami NATURA 2000 oraz rezerwatami przyrody.

Ponadto wydaje się konieczne przeprowadzenie większej ilości badań mechanicznych na próbach soli z otworów w rejonie wyniesienia Łeby, gdzie znajdują się wytypowane obszary, zwłaszcza prób pełzania. Istotnym faktem jest, aby zwrócić uwagę na obecność zanieczyszczeń w obrębie soli, a także wielkości kryształów. W związku z tym badania mechaniczne powinny być wsparte szczegółowymi badaniami petrograficznymi i mikrostrukturalnymi. Można przy tym wykorzystać rdzenie archiwalne z otworów odwierconych na tych obszarach. Jednakże, ponieważ celem prac sejsmicznych 3D jest wybór lokalizacji kawern, zaś wskazane w rozdziale **16 Tomu II** otwory zostały wybrane wstępnie i raczej nie zostaną zaadaptowane do budowy kawern (według Bazy CBDG PIG-PIB są to otwory wykonane pod koniec lat 1960-tych, dawno zlikwidowane), należałoby rozważyć w każdym z wytypowanych obszarów najbardziej perspektywicznych dla lokowania kawern, odwiercenie otworu badawczego przewiercającego kompleks soli najstarszej (czyli do ok. 900 m p.p.t.) wraz z pobraniem rdzeni z tego kompleksu. Otwór taki mógłby być ewentualnie później zaadaptowany na potrzeby budowy kawerny.

Biorąc to wszystko pod uwagę można określić orientacyjne koszty prac rozpoznawczych dla obszarów przedstawionych na Fig. 8.1 (na podstawie informacji z Internetu):

- grawimetria wraz z wstępną interpretacją – ok. 0,5 mln zł (117 km^2; przyjęto orientacyjnie 400 zł/pkt);
- sejsmika 3D – ok. 8 mln zł (80 km^2; przyjęto orientacyjnie 0,1 mln zł/km^2);
- nowe otwory – ok. 4 mln zł (4 otwory do głębokości ok. 900 m, rdzeniowane oraz analizy laboratoryjne na próbkach rdzeni.

Daje to w sumie 12,5 mln zł, do tego należy doliczyć szacunkowo 10% na reinterpretację materiałów archiwalnych i analizy laboratoryjne archiwalnych próbek rdzeni (a wcześniej pozyskanie niezbędnych informacji i próbek od Skarbu Państwa) oraz interpretację kompleksową całości – razem 13,75 mln zł.

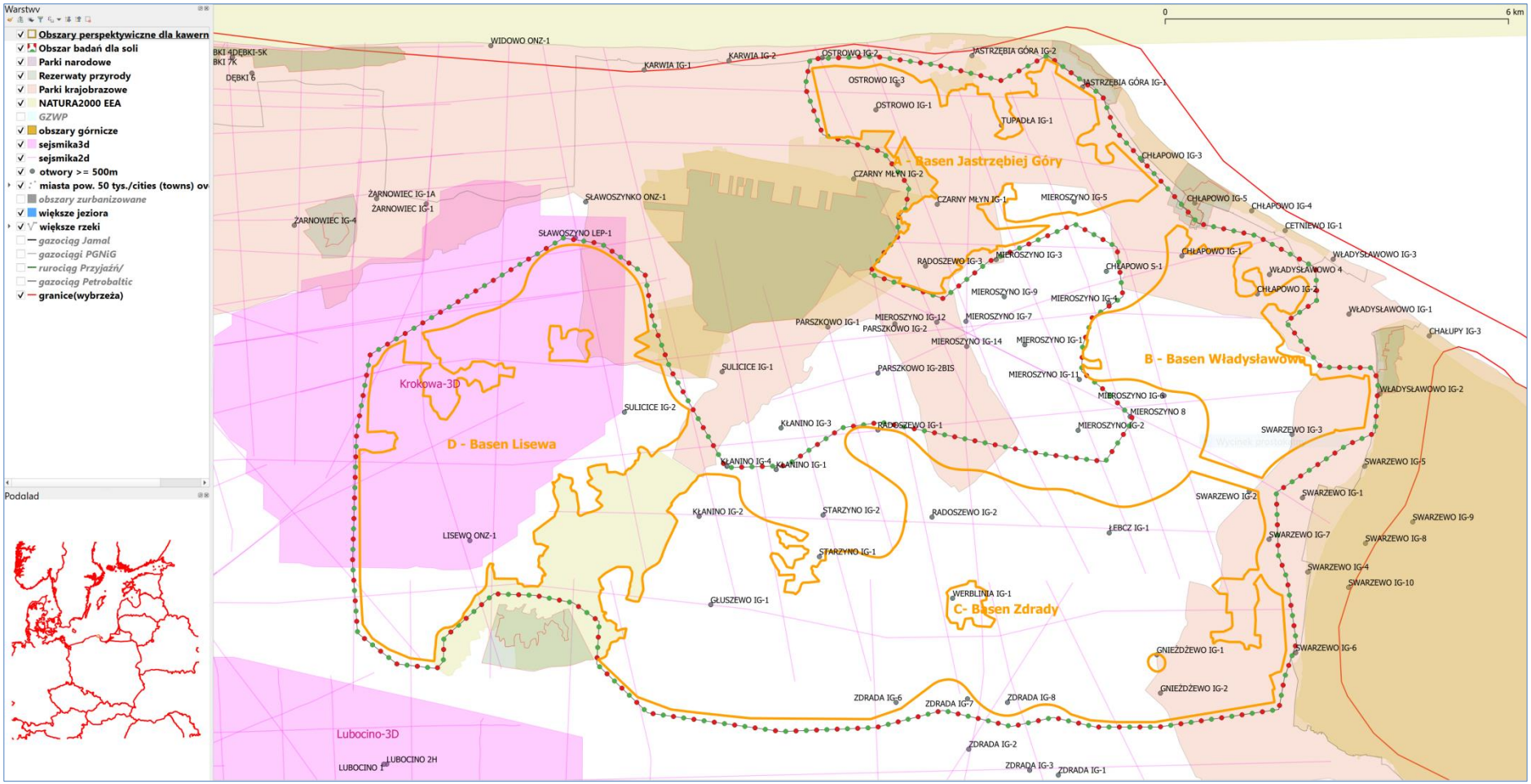


Fig. 8-1 Orientacyjny obszar badań dla pokładów soli obejmujący obszary perspektywiczne dla lokalizacji kawern

8.4 Rozpoznanie wytypowanych struktur solankowych

Poniżej scharakteryzowano prace wykonane w ramach niniejszego przedsięwzięcia w zakresie wstępnego udokumentowania proponowanych do rozpoznania obiektów, których wyniki i/lub metodyka mogą być przydatne przy sporządzaniu prg w przedmiotowym zakresie.

W rozdziale **1.1** omówiono magazyny i składowiska substancji w strukturach geologicznych w Polsce, w tym funkcjonujące i planowane, względnie zarzucone – aktualnie nie prowadzi się w naszym kraju magazynowania i składowania w strukturach solankowych, planowano taką działalność w dwóch strukturach solankowych (Marianowo – magazyn gazu, Wojszyce – składowisko dwutlenku węgla), ale nie doszło to do skutku.

Natomiast na świecie magazynuje się gaz ziemny w kilkudziesięciu takich strukturach, w kilku magazynowano gaz miejski, w którego składzie największy udział miał zwykle wodór (obok metanu, domieszki dwutlenku węgla i bardzo niewielkiej, tlenku węgla). Z kolei dwutlenek węgla składuje się na dużą skalę (milionów ton) w czterech takich strukturach na lądzie, w Kanadzie, USA i Australii (oraz w dwóch projektach norweskich w poziomach solankowych pod dnem morza), a niegdyś też składowano w dwóch projektach na lądzie w poziomach solankowych występujących pod złożami węglowodorów (Algieria, USA).

Ponadto zinwentaryzowano i przeanalizowano w rozdziale **1.1** najważniejsze opracowania archiwalne dotyczące rozpoznania i typowania struktur solankowych na potrzeby składowania dwutlenku węgla i magazynowania gazu ziemnego oraz innych substancji na obszarze naszego kraju (projekty robót geologicznych, dokumentacje geologiczne, dokumentacje i opracowania otworowe, raporty PIG-PIB i in.).

Informacje te posłużyły między innymi do zdefiniowania obszaru badań w Polsce centralnej, gdzie występuje regionalne uszczelnienie węglanowo-krzemionkowe ponad strukturami solankowymi w utworach dolnej kredy oraz do związanego z tym wyboru 11 otworów rdzeniowanych do dalszych badań (rozdział **4**).

W szczególności przenalizowano i w miarę możliwości zaktualizowano informacje zawarte w opracowaniu „Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO_2 wraz z ich programem monitorowania” (2008-2012/13; Wójcicki i in., 2013) dotyczące struktur w utworach jury i kredy, które mogłyby być odpowiednie do magazynowania/składowania substancji. Zinwentaryzowano i przeanalizowano ponadto informacje geologiczno-geofizyczne wytworzone w ramach projektu demo CCS PGE Bełchatów.

W rozdziale **1.2** zestawiono podstawowe informacje na temat własności rozpatrywanych substancji, tzn. będących przedmiotem magazynowania wodoru, gazu ziemnego i sprężonego powietrza oraz będącego przedmiotem składowania dwutlenku węgla, a także głównych wyzwań związanych z ich magazynowaniem/składowaniem.

W rozdziale **4** analizowano węglanową i węglanowo-krzemionkową sekwencję górnej kredy (łącznie z albem górnym) w centralnej Polsce w otworach wiertniczych na obszarze niecki mogileńsko-uniejowskiej i niecki brzeżnej (płockiej), stanowiącą regionalne uszczelnienie dla struktur solankowych występujących na tym obszarze.

Wykonano, celem określenia jakości i integralności uszczelnienia, profilowania litologiczne, sedymentologiczne, strukturalne i parametrów fizycznych fragmentów rdzeni z otworów oraz nowe badania laboratoryjne na próbkach skał: petrograficzne, petrofizyczne i XRD. Opracowano charakterystykę własności petrofizycznych i chemicznych skał w profilu kredy górnej, w tym zawartości węglanu wapnia i minerałów ilastych oraz oceniono możliwości tektonicznego rozszczelnienia kompleksu uszczelniającego K2 w poszczególnych rejonach rozpatrywanego obszaru (z czym wiążą się też prace wykonane w rozdziale **7.4**).

Przeanalizowano rozkłady porowatości i przepuszczalności dla poszczególnych typów skał budujących rozpatrywany kompleks – skały krzemionkowe, w mniejszym stopniu wapienie, charakteryzują się wyraźną dominacją nanoporów w przestrzeni porowej, co może wskazywać na dobre własności uszczelniające, zwłaszcza, jeśli w danym rejonie brak jest stref uskokowych lub spękań rozszczelniających cały kompleks K2.

Sugeruje się, że reaktywność dwutlenku węgla rozpuszczonego w solance (kwas węglowy) mogłaby być problemem dla integralności uszczelnienia, ale nie da się tego stwierdzić jednoznacznie, gdyż w grę wchodzą tu takie czynniki jak jego miąższość, obecność uskoków i spękań oraz inne reakcje, związane z wytrącaniem związków chemicznych.

Natomiast w rozdziale **5.1** zestawiono tabelarycznie, na podstawie dostępnych publikacji i opracowań archiwalnych, kryteria wyboru struktur solankowych jako potencjalnych podziemnych magazynów gazu ziemnego, wodoru oraz mieszanin wodoru i gazu ziemnego, a także magazynów sprężonego powietrza oraz składowisk dwutlenku węgla. Są to kryteria złożowe charakteryzujące przydatność struktury jako potencjalnego magazynu/składowiska rozpatrywanej substancji, obejmujące parametry geometryczne (i pojemność), parametry kolektora i parametry uszczelnienia. Podano kryteria optymalne, charakteryzujące najbardziej pożądane własności rozpatrywanych struktur oraz kryteria graniczne, których niespełnienie zasadniczo dyskwalifikuje rozpatrywane struktury z dalszych rozważań. Przeanalizowano podobieństwa i różnice w zakresie kryteriów złożowych odnoszących się do poszczególnych substancji – przyjęto w rezultacie jako bazowe kryteria dla dwutlenku węgla. Wskazano przy tym, że w przypadku struktur solankowych ich stopień rozpoznania może okazać się niewystarczający do wiarygodnego określenia, w oparciu o dostępne informacje, czy spełnione jest dane kryterium.

W rozdziale **5.2** przedstawiono kryteria rankingu, które obejmują parametry złożowe z ww. kryteriów wyboru, a także zagadnienia dostępności danych, wykonalności magazynowania/składowania oraz związanych z tym ewentualnych zagrożeń i konfliktów interesów w zakresie wykorzystania górotworu. Kryteria obejmowały więc problematykę dostępności danych geologiczno-geofizycznych i parametrów kolektorów, zagadnienia związane z bezpieczeństwem składowania oraz pojemności magazynowania/składowania, a także problematykę infrastruktury przesyłowej i odbiorczej dla danej substancji, możliwych zagrożeń dla użytkowych poziomów wodonośnych oraz konfliktów interesów związanych z występowaniem w obszarów ochrony przyrody, obszarów górniczych kopalin, a także lokalizacji zakładów geotermalnych.

W rozdziale **5.3** wykonano, w oparciu o dostępne informacje, zebrane i/lub opracowane ramach niniejszego przedsięwzięcia oraz ww. kryteria, charakterystykę i ranking 47 zinwentaryzowanych mezozoicznych struktur solankowych. W rezultacie wybrano do dalszych analiz trzy struktury w utworach jury (Wojszyce – stosunkowo nowe i bogate dane – oraz Konary i Budziszewice-Zaosie –

dane archiwalne z ubiegłego wieku) i jedną w utworach kredy (Bielsk-Bodzanów – dane archiwalne z ubiegłego wieku).

W rozdziale **5.4** przeanalizowano dla obszaru Polski centralnej (obejmującego też wytypowane cztery struktury solankowe) warunki hydrogeologiczne w nadkładzie potencjalnego kompleksu magazynowania/składowania (w tym występowanie użytkowych wód podziemnych i ewentualne zagrożenia związane z ascenzją wód słonych), parametry hydrogeochemiczne kolektorów – poziomów wodonośnych solankowych (w tym do oceny na ile może dochodzić do wymiany płynów pomiędzy tymi kolektorami, a wyżej występującymi aquiferami) oraz rozkłady mineralizacji i ciśnień piezometrycznych zależnie od głębokości występowania wód i zbiornika. Prace te wykonano w oparciu o wcześniejsze opracowania, dostępne publikacje, dokumentacje otworowe i bazy danych PIG-PIB. Dokonano na podstawie wszystkich tych informacji oceny szczelności kompleksu składowania dla wytypowanych czterech struktur.

W rozdziale **6** scharakteryzowano wyniki wykonanego w ramach prac kooperacyjnych, zaawansowanego reprocessingu archiwalnych profili sejsmicznych 2D, usytuowanych na obszarze trzech struktur rozpoznanych archiwalnymi danymi z ubiegłego wieku: Budziszewice-Zaosie, Bielsk-Bodzanów (kulminacja Bielska) i Konary. Były to profile o niedostatecznej jakości obrazu sejsmicznego, wytypowane do reprocessingu celem lepszego rozpoznania rozpatrywanych struktur (po 4 na strukturę). Pomimo problemów (w zależności od struktury i profilu sejsmicznego) z jakością danych, ich nieregularnością, krotnością profilowania, zakłóceniami oraz niekompletną geometrią danych sejsmicznych, uzyskany w wyniku reprocessingu obraz pokazuje wyraźną poprawę jakości wszystkich profili sejsmicznych w stosunku do danych archiwalnych, szczególnie w płytszych częściach sekcji.

Rozdział **7** obejmuje kompleksową interpretację rozpatrywanych struktur.

W rozdziale **7.1** dokonano interpretacji zreprocesowanych w rozdziale **6** profili sejsmicznych oraz reinterpretacji opracowanych wcześniej w ramach innych przedsięwzięć PIG-PIB/PSG danych sejsmicznych celem wykonania korelacji na profilach i map dla kluczowych horyzontów zbiornikowych i uszczelniających dla poszczególnych struktur. Jeśli chodzi o zreprocesowane profile to pomimo znaczącej poprawy jakości obrazu sejsmicznego nie w każdym przypadku wyniki były satysfakcjonujące.

W przypadku struktury Budziszewice-Zaosie wykorzystano informacje z 6 otworów wiertniczych zlokalizowanych w obrębie struktury, a korelację wykonano dla 5 horyzontów sejsmicznych – od stropu triasu po horyzont bajosu górnego – uszczelnienia. Największą trudność napotkano przy interpretacji najpłytszego horyzontu, ze względu na brak zapisu falowego, co uniemożliwia też jednoznaczną ocenę zamknięcia struktury na NW w obrębie utworów jury. Drugi problem napotkano w szczycie struktury, gdzie zapis sejsmiczny ma generalnie obniżoną jakość w obrębie utworów jury. Nie stwierdzono występowania uskoków tnących kompleksy jury.

Do interpretacji struktury Konary wykorzystano informacje z 2 głębokich otworów oraz pomocnicze z trzeciego, płytkiego, a korelację wykonano dla 6 horyzontów sejsmicznych – od powierzchni niezgodności laramijskiej po strop pliensbachu. Na jednym z reprocesowanych profili jakość obrazu uniemożliwia jakąkolwiek interpretację w jego przeważającej części – zapewne jest to spowodowane błędami w akwizycji oraz prawdopodobnie występowaniem pokładów węgla brunatnego

w nadkładzie. Na profilach obserwuje się brak wyraźnej ciągłości refleksów w szczytowej części struktury, co dodatkowo utrudnia ocenę jak miąższe mogą być wyznaczone kolektory przy tak łagodnym zapadaniu horyzontów i czy posiadają odpowiednie zamknięcie. Potwierdzenie jednoznacznego i pewnego zamknięcia poziomów kolektorskich zwłaszcza od strony NW wymaga dalszych badań i analizy, w tym oceny oddziaływania pobliskiego wysadu solnego Góra.

W przypadku struktury Bielsk-Bodzanów skupiono się na kulminacji Bielska, gdzie interpretację oparto na dwóch odwierconych tam otworach, wspomagano się również informacjami z otworu położonego dalej na SE od tej kulminacji, poza rowem, w którym zlokalizowana jest ta struktura. Korelację wykonano dla 7 horyzontów sejsmicznych – od stropu formacji mogileńskiej (dolna kreda) po strop pliensbachu. Problemem była interpretacja profili podłużnych, gdyż przecinają one uskoki o podobnym kierunku, zaś jeden z otworów, na którym oparto interpretację najprawdopodobniej zlokalizowany jest na uskoku. Brak jest profili podłużnych tuż poza strukturą, które łączyłyby linie poprzeczne i pozwalały na wiarygodne odwzorowanie strefy rowu. Jak wykazała interpretacja w obrębie utworów jury poza znaczną głębokością występowania, poziomy uszczelniające i kolektory są silnie zuskokowane, natomiast nie obserwuje się uskoków w stropie formacji mogileńskiej i jej nadkładzie. Identyfikacja kształtu struktury w obrębie kredy wymaga lepszego rozpoznania pod kątem zamknięcia zwłaszcza od NE strony wyniesienia.

W rozdziale **7.2** przeanalizowano regionalne mapy geologiczne pod kątem występowania stref nieciągłości tektonicznych („Atlas paleogeograficznego epikontynentalnego permu i mezozoiku w Polsce" – Dadlez i in., 1998). W utworach mezozoiku zidentyfikowano w Atlasie uskoki w brzeżnych częściach struktur Konary, Wojszyce i Bielsk-Bodzanów. Interpretacja sejsmiki prowadzona w ramach niniejszego przedsięwzięcia (rozdziały **7.1**, **7.5**) generalnie potwierdza zidentyfikowane w Atlasie nieciągłości w rejonie struktury Bielsk-Bodzanów, sugeruje natomiast, że w przypadku struktur Konary i Wojszyce wspomniane uskoki najprawdopodobniej występują w podłożu kompleksów jurajskich.

Jeśli chodzi o mapy o większym stopniu szczegółowości, tzn. wykonane w ramach dokumentacji sejsmicznych to na mapie spągu jury na obszarze struktury Budziszewice-Zaosie (Łobaziewicz, 1997) zaznacza się uskok w rejonie otworu Buków 1 i dalej poza strukturą na południe od otworu Buków 2, w przypadku struktury Konary brak jest archiwalnych map horyzontów jurajskich, zaś w rejonie struktury Bielsk-Bodzanów (zasadniczo w rejonie kulminacji Bielska, czyli NW części struktury) na mapie stropu kredy dolnej (Marosz i Tomaszewska, 1993) nie stwierdzono żadnych uskoków, co potwierdza wyniki interpretacji danych sejsmicznych (rozdział **7.1.3**).

Interpretację struktury Wojszyce oparto zasadniczo na materiałach wytworzonych w ramach projektu demo CCS PGE Bełchatów (rozdziały **7.5** i **7.6**), stąd nie analizowano w jej przypadku starszych map archiwalnych. Ponadto przeanalizowano występowanie na obszarach rozpatrywanych struktur większych skupisk osadniczych i obszarów ochrony przyrody, co zostało następnie uwzględnione poniżej (rozdział **8.4.2**) przy wskazywaniu obszarów do uzupełniających badań geologiczno-geofizycznych.

W rozdziale **7.3** sporządzono na bazie dostępnych danych grawimetrycznych z rejonów czterech rozpatrywanych struktur gridy anomalii siły ciężkości w redukcji Bouguera, które następnie poddano transformacjom. Transformacje te miały na celu identyfikację stref nieciągłości tektonicznych w obrębie górotworu, w przedziale głębokości odpowiadającym występowaniu rozpatrywanych dla

poszczególnych struktur kompleksów magazynowania/składowania oraz ich bezpośredniego nadkładu (czy też dodatkowych uszczelnień). Przyjęto orientacyjnie przedział głębokości od 0,5 km do 2 km. Wybrano transformację metodą filtracji częstotliwościowej z wykorzystaniem transformaty Fouriera (Fajklewicz, 2007), w wariancie filtracji pasmowej (anomalie rezydualne), czyli pozostawiającej przyczynki od ciał zaburzających w określonym (z dużym przybliżeniem) przedziale głębokości i zastosowano ją dla gridów obejmujących obszary poszczególnych struktur. Aby wyznaczyć strefy nieciągłości tektonicznych zastosowano kolejną transformację – wyliczono ze wspomnianych anomalii rezydualnych gradient poziomy, jest miarą zmienności rozkładu gęstości ośrodka geologicznego w poziomie (Fajklewicz, 2007), zaś jego wartości maksymalne mogą być związane z występowaniem kontaktów gęstości, uskoków, wyklinowań warstw oraz zmian facji, z którymi wiążą się zmiany gęstości ośrodka geologicznego. Stąd dla obszarów poszczególnych struktur analizowano strefy, gdzie wyraźnie zaznaczają się osie i maksima rozkładów gradientu poziomego z anomalii rezydualnych.

Na obszarze struktury Budziszewice-Zaosie zaznaczają się takie strefy w rejonie otworów Buków 1 i Buków 2, na SW skłonie struktury i na WSW od struktury, najprawdopodobniej związane z podłożem kompleksów jurajskich (w świetle wyników rozdziału **7.1.1** i informacji zgromadzonych w rozdziale **7.2**).

Na zachodnim skłonie struktury Konary widoczna jest stosunkowo słabo zaznaczająca się (nieco silniej na NW) strefa maksimum gradientu poziomego, zaś przy zachodnim krańcu struktury kolejna taka strefa, nieco bardziej wyrazista – najprawdopodobniej związane są one z dolnymi partiami sekwencji utworów jury i ich podłoża (pierwsza strefa sugerowana jest w archiwalnej interpretacji w monografii Tarkowski, red., 2010). Bardzo silne anomalie zaznaczają się na WSW od struktury, w rejonie głęboko występującego wysadu solnego Gopło.

W obrębie struktury Wojszyce widoczna jest strefa maksimum gradientu poziomego na SW od otworu Kaszewy 1 (przebiegając w kierunku z NW na SE), oraz równoległa strefa na wschód od tego otworu, na NE skłonie struktury. Mogą to być strefy uskokowe lub zmiany facjalne w obrębie głębszych partii utworów jury lub górnego triasu skutkujące kontrastem gęstości. Na południe od struktury zaznacza się bardzo wyraźnie przebijający utwory mezozoiku wysad solny Rogóźno.

Na obszarze struktury Bielsk-Bodzanów brak jest wyraźnych maksimów gradientu poziomego, które mogłyby być związane ze względnie płytkim występowaniem kontaktów gęstości, uskoków, wyklinowań warstw oraz zmian facji, z którymi wiążą się zmiany gęstości ośrodka geologicznego – jest to zgodne interpretacją sejsmiki (rozdział **7.1.3**) jeśli chodzi o utwory kredy.

W rozdziale **7.4** analizowano, w oparciu o materiały z projektu demo CCS PGE Bełchatów (dane z otworu Pabianice 1 i interpretacja danych sejsmicznych), uzupełnione wynikami profilowań rdzenia z otworu Pabianice 1 i modelowania geomechanicznego 1D, strefę tektoniczną Pabianic. Jak wspomniano wyżej, wyniki te mają znaczenie dla regionalnej analizy integralności uszczelnienia kredowego (rozdział **4**).

Rozdziały **7.5** i **7.6** obejmują kompleksową interpretację danych geologiczno-geofizycznych dla struktury Wojszyce, w oparciu o materiały z projektu demo CCS PGE Bełchatów.

W rozdziale **7.5** wykonano profilowanie strukturalne na rdzeniu z otworu Kaszewy-1 (jura dolna – najwyższy trias), które uzupełniono danymi geofizyki wiertniczej, w tym głównie skanera mikrooporności owego (XRMI), a także informacjami na temat parametrów mechanicznych oraz ciśnień porowych i otworowych, określając w wyniku interpretacji kierunki współczesnych naprężeń i sporządzając model geomechaniczny 1D. Otrzymane wyniki sugerują współczesne doginanie jurajskiej antykliny Wojszyc w kierunku prostopadłym do jej osi.

W otworze Kaszewy 1 stwierdzono drobne uskoki normalne w stropie triasu, a poniżej, w stropie kajpru, strefę uskoku przesuwczego o charakterze kruchym. W obrębie kolektora Jaa1-Jto3 (najniższy aalen – toark górny) stwierdzono występowanie spękań we wszystkich typach litologicznych, natomiast nie stwierdzono ich w obrębie niżej ległego kompleksu obejmującego dolny toark i najwyższy pliensbach, stanowiącego uszczelnienie (formacja ciechocińska) dla kolektora górnego pliensbachu.

Struktura antyklinalna Wojszyc rozwijała się wieloetapowo, na krawędzi bruzdy śródpolskiej, będącej centrum subsydencji permo-mezozoicznego basenu polskiego. Obejmowało to powstanie w pstrym piaskowcu na SW od dzisiejszej osi antykliny uskoku normalnego o upadzie ku SW, następnie sedymentację i powstanie antykliny w efekcie kompresyjnego fałdowania w retyku, sedymentację i subsydencję w jurze dolnej oraz dalszą sedymentację po jurę górną (obecnie najmłodszymi skałami w obrębie antykliny są wapienie oksfordu). Antyklina została wyniesiona na skutek laramijskiej inwersji basenu polskiego (schyłek kredy/początek paleogenu), w efekcie której granica wału śródpolskiego znalazła się w przegubie antykliny Wojszyc, a ograniczająca ją od NE synklina stanowi część niecki brzeżnej.

W obrębie triasu widoczny jest w obrazie sejsmicznym na profilu poprzecznym do osi antykliny Wojszyc, w sąsiedztwie otworu Kaszewy 1, uskok biegnący na SW od tej osi. W przegubie antykliny gwałtownie spada jakość obrazowania sejsmicznego, stąd niemożliwe było stwierdzenie czy uskok ten kontynuuje się w obrębie utworów jury. Dotychczasowe analizy wskazują, że w obrębie struktury Wojszyc zachodzić może istotna lateralna anizotropia prędkości fali sejsmicznej (obniżenie w kierunku prostopadłym do osi struktury). Archiwalny model grawimetryczny pokazuje, że ponad przegubem antykliny w obrębie jury środkowej i górnej występuje strefa obniżonej gęstości, której możliwym wytłumaczeniem jest występowanie gęstego zespołu otwartych spękań w obrębie J3 i J2. Analiza mapy rezydualnych anomalii grawimetrycznych sugeruje, że powierzchnia stropu jury górnej urzeźbiona jest w postaci, układających się w pasy wzdłuż osi antykliny, skałek twardego i gęstego wapienia skalistego, przykrytych osadami węgli brunatnych i iłów miocenu o wyjątkowo małej gęstości, co może potwierdzać trudny do opanowania zanik płuczki wiertniczej w tym interwale głębokościowym wraz z gwałtownie spadającą jakością obrazowania sejsmicznego. Stąd, aby w przyszłości osiągnąć dobrej jakości obrazowanie sejsmiczne należy wykluczyć tę strefę ze wzbudzania i rejestracji fali.

Z punktu widzenia bezpieczeństwa składowania/magazynowania substancji bardzo ważna jest integralność kompleksów uszczelniających występujących w obrębie J2 i najwyższej J1 (formacja ciechocińska), co było przedmiotem wnikliwych analiz. Stwierdzono, że spękania penetratywne nie powinny stanowić problemu w obrębie ilastych uszczelnień J2 i J1, nawet jeżeli tam występują, to powinny być mniej liczne i nie mieć ciągłości pionowej. Możliwe jest też, że ze względu na podwyższoną zawartość minerałów ilastych sprzyjających pełzaniu łupków, struktury kruche w ogóle

się w uszczelnieniach nie wykształciły lub są w pełni zasklepione. Możliwe jest, że w obrębie antykliny Wojszyc uskoki o znikomym zrzucie tną cały kompleks jurajski, lecz najprawdopodobniej nie są to uskoki aktywne, stanowiące drogi migracji dla płynów złożowych (co wynika z ww. badań orientacji współczesnych naprężeń tektonicznych i wniosków z testów szczelinowania hydraulicznego). Natomiast możliwość występowania otwartych szczelin w obrębie kolektorów J1 może być korzystna, gdyż może podnosić wydajność zatłaczania do kolektora, zwłaszcza przy wykorzystaniu otworów krzywionych/poziomych. Najlepsze ku temu warunki występują w kolektorze pliensbachu górnego.

W celu bardziej szczegółowego rozpoznania struktury zaproponowano odwiercenie otworu w szczycie struktury (kilka km na SE od otworu Kaszewy 1) celem szczegółowego rozpoznania kompleksów uszczelniających pomiarami geofizyki wiertniczej i testami szczelinowania hydraulicznego, wraz pobraniem rdzeni na potrzeby wykonania analiz laboratoryjnych parametrów geomechanicznych i petrofizycznych na próbach skał. Zaproponowano też wykonanie sejsmiki 3D/3C o parametrach umożliwiających szczegółowe rozpoznanie kompleksu składowania (w tym eliminację zakłóceń od „horyzontu skałkowego" w stropie górnej jury) oraz integrację wszystkich omawianych danych i wyników analiz. Sugestie te wykorzystano w podanej poniżej propozycji uzupełniających badań geologiczno-geofizycznych dla rozpatrywanych struktur.

W rozdziale **7.6** przeanalizowano materiały wytworzone w ramach projektu demo CCS PGE Bełchatów (tzn. wyniki interpretacji danych sejsmicznych, informacje z otworu Kaszewy 1 i ich interpretacja, dane grawimetryczne i wyniki ich interpretacji), gdzie Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy brał udział, wspomagając PGE Bełchatów w komponencie składowania (co obejmowało m.in. opracowanie projektów robót geologicznych, nadzór na pracami polowymi, zagadnienia komunikacji i akceptacji społecznej oraz udział w opracowaniu i interpretacji wyników, tzn. przekrojów, map i modeli geologiczno-geofizycznych; Szynkaruk, 2011). Zwrócono przy tym uwagę na znaczący spadek jakości obrazu sejsmicznego, szczególnie dla utworów górno- i środkowojurajskich w strefie przegubu antykliny Wojszyc (na profilu podłużnym przebiegającym przez jej przegub blisko osi jakość obrazu jest niska na prawie całym jego odcinku). Korelowane były horyzonty od stropu jury środkowej do spągu cechsztynu, przy czym z punktu widzenia zadania geologicznego najistotniejsze są horyzonty jurajskie wraz ze stropem triasu górnego oraz horyzont niezgodności kątowej występującej poniżej stropu kajpru. Warte uwagi jest też występowanie uskoków o kierunku NW-SE nieprzekraczających (w obrazie sejsmicznym) stropu kajpru oraz niewielka amplituda zamknięcia struktury strony SE, co budzi obawy, jeśli chodzi o efektywność pułapkowania struktury (i wymagałoby nowych badań sejsmicznych).

Wybrano przekroje sejsmiczne na 4 profilach, zestawione z krzywymi anomalii siły ciężkości w redukcji Bouguera oraz gradientem pionowym wyliczonym z anomalii Bouguera. Gradient pionowy jest miarą zmienności rozkładu gęstości w górotworze w kierunku pionowym (Fajklewicz, 2007), zaś jego anomalie dodatnie lub ujemne związane są lokalnymi zmianami gęstości – odpowiednio zwiększeniem lub zmniejszeniem. Zaznaczone na krzywych gradientu pionowego na poszczególnych profilach anomalie o niewielkiej szerokości i amplitudzie najprawdopodobniej związane są one z najpłycej występującymi utworami jury. Wydaje się to być zgodne z sugestią z rozdziału **7.5** na temat występowania, w szczególności na osi struktury, skomplikowanej rzeźby stropu jury górnej, tzn. krasowych ostańców wapiennych o wysokiej gęstości przedzielonych zagłębieniami wypełnionymi osadami węgli brunatnych i iłów miocenu o niskiej gęstości. Charakterystyczne jest przy tym występowanie ujemnej anomalii grawimetrycznej w redukcji Bouguera w przegubie

i kulminacji antykliny, co do której w rozdziale **7.5** postawiono hipotezę, że przyczyną jej mogą być gęste spękania w utworach jury górnej i środkowej.

W rozdziale **7.7** dokonano kompleksowej interpretacji danych sejsmicznych i grawimetrycznych dla trzech struktur rozpoznanych archiwalnymi danymi sejsmicznymi z ubiegłego wieku (Budziszewice-Zaosie, Konary i Bielsk), dla których podano też krótką charakterystykę geologiczno-złożową. Zestawiono interpretację zreprocesowanych przekrojów sejsmicznych dla tych trzech struktur (po 4 profile dla każdej struktury, w tym dwa połączone w jeden w przypadku struktury Budziszewice-Zaosie) z krzywymi anomalii rezydualnych siły ciężkości i gradientu poziomego.

Jeśli chodzi o dane grawimetryczne to wykorzystano gridy anomalii rezydualnych opracowane w rozdziale **7.3** – anomalie rezydualne odnoszące się do szacunkowego przedziału głębokości występowania rozpatrywanych dla poszczególnych struktur kompleksów magazynowania/składowania oraz ich bezpośredniego nadkładu (czy też dodatkowych uszczelnień), czyli orientacyjnie 0,5-2 km oraz gridy obliczonego z tych anomalii gradientu poziomego. Na poszczególnych profilach zaznaczono maksima gradientu, które mogą być związane z występowaniem kontaktów gęstości, uskoków, wyklinowań warstw oraz zmian facji, z którymi wiążą się zmiany gęstości ośrodka geologicznego. W przypadku struktur jurajskich Budziszewice-Zaosie i Konary charakterystyczne są występujące w obrazie anomalii rezydualnych anomalie ujemne w przegubach struktur, korelujące się ze strefami o gorszej jakości obrazu sejsmicznego zaś maksima gradientu poziomego ze strefami tektonicznymi w obrębie podłoża lub spągu utworów jury. Co ciekawe, obserwuje się też anomalie ujemne na profilach przecinających występującą w rowie strukturę antyklinalną Bielsk-Bodzanów (kulminacja Bielska) w strefie przegubu tej struktury (na profilach poprzecznych), gdzie nie zaznacza się strefa obniżonej jakości obrazu sejsmicznego.

Ponadto, wykorzystano do interpretacji kompleksowej rozkłady prędkości składania opracowane przez podwykonawcę w ramach reprocessingu 12 profili sejsmicznych dla omawianych trzech struktur, skalibrowane prędkościami sejsmicznymi z otworów, które zestawiono z przekrojami sejsmicznymi i krzywymi anomalii grawimetrycznych. Prędkości składania przeliczono na prędkości interwałowe wzorem Dixa, a z tych z kolei wyliczono gęstości ośrodka geologicznego wzorem Gardnera. Modele gęstościowe ośrodka geologicznego zestawiono z przeliczonymi do domeny głębokościowej (w oparciu o ww. prędkości składania) horyzontami sejsmicznymi, otrzymując modele strukturalno-gęstościowe, czyli grawimetryczne.

8.4.2 Propozycje uzupełniających badań geologicznych i geofizycznych

W przedstawionej powyżej charakterystyce prace wykonane w ramach niniejszego przedsięwzięcia w zakresie wstępnego udokumentowania proponowanych do rozpoznania obiektów (potencjalnych składowisk dwutlenku węgla, ewentualnie magazynów substancji takich jak mieszaniny gazu ziemnego i wodoru), których wyniki i/lub metodyka mogą być w rozmaitym zakresie przydatne przy sporządzaniu prg w przedmiotowym zakresie, wspomniano w kilku miejscach o potrzebie wykonania prac geofizycznych i geologicznych niezbędnych do uzyskania odpowiedzi na szereg postawionych tam pytań.

W przypadku struktur rozpoznanych archiwalną sejsmiką z ubiegłego wieku (Budziszewice-Zaosie, Konary, Bielsk-Bodzanów) tych pytań było stosunkowo niewiele, jak to przedstawiono poniżej.

1. W przypadku struktury Budziszewice-Zaosie problemem była niepewność co do zamknięcia struktury od NW oraz słaba jakość zapisu sejsmicznego w szczycie struktury.
2. Podobnie na strukturze Konary obserwuje się słabą jakość zapisu sejsmicznego w szczycie struktury i potwierdzenie wymaga (podłużne) zamknięcie struktury, zwłaszcza od strony NW – w tym rejonie niezbędna byłaby ponadto ocena oddziaływania na geometrię warstw kompleksu składowania pobliskiego wysadu solnego Góra.
3. Brak jest profili podłużnych tuż poza strukturą Bielsk-Bodzanów (kulminacja Bielska), które łączyłyby linie poprzeczne i pozwalały na wiarygodne odwzorowanie strefy rowu, a ponadto identyfikacja kształtu struktury w obrębie kredy wymaga lepszego rozpoznania pod kątem zamknięcia zwłaszcza od NE strony wyniesienia.

Dla struktury Wojszyce stwierdzono również słabą jakość obrazu sejsmicznego w przegubie i szczycie struktury oraz wątpliwości czy istnieje zamknięcie struktury od strony SE wystarczające dla efektywnego pułapkowania w przypadku ewentualnego zatłaczania do kolektorów dolnojurajskich dwutlenku węgla, czy też innych substancji. Natomiast w oparciu o wyniki interpretacji i analiz informacji geologicznej wytworzonej w ramach projektu PGE zasugerowano (rozdział **7.5.7**) szereg nowych prac geologicznych i geofizycznych w obrębie tej struktury.

1. Wykonanie otworu o głębokości co najmniej 1000 m w szczycie struktury, 3-4 km na SE od otworu Kaszewy-1, rdzeniowanego od stropu oksfordu do stropu pliensbachu. Obok wykonania standardowych badań geofizyki wiertniczej należałoby wykonać profilowania sondy akustycznej dipolowej i skanera XRMI. W obrębie uszczelnień i w stropie kolektora powinny zostać przeprowadzone testy szczelinowania hydraulicznego, w interwałach: bez spękań, ze spękaniami oraz ze strefą uskokową – w sumie ok. 8 testów. Dla scharakteryzowania głównych typów litologicznych z interwałów szczelinowanych należałoby wykonać kilkanaście laboratoryjnych testów mechanicznych i petrofizycznych.
2. Wykonanie zdjęcia 3D/3C, z analizą anizotropii w obrębie poszczególnych formacji litostratygraficznych. Projekt powinien zostać tak zaprojektowany, aby sygnał sejsmiczny z punktu wzbudzania do odbiornika w miarę możliwości omijał „horyzont skałkowy" w obrębie wychodni wapieni oksfordu na powierzchni podkenozoicznej. Należy znaleźć kompromis pomiędzy precyzją obrazowania, a jakością korelacji horyzontów, gdyż sygnał sejsmiczny o podwyższonej częstotliwości jest bardziej podatny na zaburzenia. W konstrukcji modelu strukturalnego i geomechanicznego struktury Wojszyc należy uwzględnić anizotropię prędkości fali P. Wyniki badań sejsmicznych należy zintegrować z modelami geomechanicznymi i gęstościowymi oraz wynikami geofizyki wiertniczej i testów złożowych.

Wnioski te oraz doświadczenia z opisanych szczegółowo w rozdziale **8.2.2** projektów w zakresie podziemnego składowania dwutlenku węgla na lądzie (Ketzin, Aquistore, Gorgon, Illinois, Quest), wykorzystujących struktury o mniej lub bardziej podobnych warunkach geologicznych do obiektów rozpatrywanych w ramach niniejszego przedsięwzięcia (które z kolei są mniej lub bardziej typowymi przykładami struktur mezozoicznych na obszarze Niżu Polskiego) były podstawą dla przedstawienia propozycji badań geofizycznych i geologicznych przedstawionych poniżej.

Jak wspomniano wyżej, struktury Budziszewice-Zaosie, Konary, Bielsk-Bodzanów są przykładami struktur rozpoznanych archiwalną sejsmiką z ubiegłego wieku, generalnie słabej jakości, nieadekwatnych dla postawionego zadania geologicznego parametrach rejestracji i często niedostatecznym pokryciu, niewystarczającym do wiarygodnego odwzorowania struktury. W przeciwieństwie do nich struktura Wojszyce jest rozpoznana wysokorozdzielczą sejsmiką 2D, otworem, w którym zbadano parametry geomechaniczne kompleksu składowania i szczegółowym zdjęciem grawimetrycznym.

Stąd proponuje się wykonanie w pierwszym etapie dla struktur Budziszewice-Zaosie, Konary, Bielsk-Bodzanów uzupełniających badań geologiczno-geofizycznych umożliwiających ich rozpoznanie w stopniu porównywalnym do osiągniętego dla struktury Wojszyce. Na Fig. 8-2, Fig. 8-3 i Fig. 8-5 przedstawiono orientacyjne obszary badań dla struktur Budziszewice-Zaosie (powierzchnia około 366 km^2), Konary (ok. 391 km^2) i Bielsk-Bodzanów (rejon kulminacji Bielska – ok. 367 km^2).

W obrębie tych obszarów proponuje się wykonanie wysokorozdzielczej sejsmiki 2D – 6-9 profili w sumarycznym wymiarze ok. 200 km dla każdej, które pozwolą na bardziej wiarygodne odwzorowanie geometrii struktury, w tym uchwycenie zamknięć antyklin czy też rozpoznanie tektoniki w bezpośrednim sąsiedztwie struktury (profile mogą wychodzić poza obszary Fig. 8-2, Fig. 8-3 i Fig. 8-5, powinny za to umożliwić sporządzenie modeli w ich obrębie). Parametry akwizycji sejsmiki 2D należy tak dobrać, aby uniknąć pogorszenia jakości obrazu sejsmicznego w szczytach i przegubach struktur antyklinalnych, gdzie stwierdzono obniżone gęstości w najwyższych partiach kompleksów jury. Dotyczy to w szczególności struktur Budziszewice-Zaosie i Konary, w mniejszym stopniu Bielsk-Bodzanów, gdzie w archiwalnej sejsmice nie obserwuje się tego, pomimo, że przegub antykliny charakteryzuje się też obniżoną gęstością według interpretacji danych grawimetrycznych. Proponuje się ponadto wykonanie na wskazanych obszarach szczegółowego zdjęcia grawimetrycznego o zagęszczeniu pomiarów 10-12 km^2 na potrzeby kompleksowej interpretacji geologiczno-geofizycznej i zaprojektowania zdjęcia sejsmicznego 3D. W szczycie każdej ze struktur należałoby wykonać po jednym otworze przewiercającym cały kompleks składowania (czyli do głębokości minimum 1000-1500 m, w zależności od struktury) i pobrać rdzenie z uszczelnień i kolektorów do analiz laboratoryjnych, w tym geomechanicznych i petrofizycznych. W otworach należy wykonać analogiczne badania jak w otworze Kaszewy 1, z tym, że dla kompleksów uszczelniających i kolektorów powinny zostać wykonane profilowania sondy akustycznej dipolowej i skanera XRMI, a także przynajmniej 8 testów szczelinowania hydraulicznego.

W związku z powyższym orientacyjny koszt pierwszego etapu badań mezozoicznej struktury solankowej rozpoznanej archiwalną sejsmiką z ubiegłego wieku wyniesie (na podstawie informacji z Internetu):

- sejsmika 2D – ok. 4 mln zł (200 km; przyjęto 20 tys. zł/km);

- grawimetria – ok. 1,6-1,7 mln zł (366-391 km^2; przyjęto koszt punktu pomiarowego 400 zł);

- otwór badawczy – ok. 15-20 mln zł, wraz z geofizyką otworową, pobraniem, rdzeni, testami szczelinowania i analizami laboratoryjnymi;

Do tego należałoby doliczyć 10% na reinterpretację danych archiwalnych (a wcześniej ich pozyskanie od Skarbu Państwa), analizy laboratoryjne na archiwalnych próbkach rdzeni (a wcześniej ich pozyskanie od Skarbu Państwa), interpretację kompleksową nowych i archiwalnych danych.

Razem dla pierwszego etapu otrzymujemy więc orientacyjnie ok. 22,7-28,3 mln zł.

Drugi etap rozpoznania takiej struktury objął by badania analogiczne do tych zaproponowanych w przypadku struktury Wojszyce (Fig. 8-4) oraz stosowanych na etapie charakterystyki potencjalnego składowiska/monitoringu stanu początkowego ośrodka geologicznego w projektach Ketzin, Aquistore, Gorgon, Illinois, Quest – jak poniżej:

- sejsmika 3D – ok. 8 mln zł (80 km^2; przyjęto orientacyjnie 0,1 mln zł/km^2);

- drugi otwór badawczy w przegubie struktury, 2-4 km od pierwszego, zakres analogiczny, czyli ok. 15-20 mln zł;

Ponadto należałoby doliczyć 15% na monitoring stanu początkowego: VSP, płynów złożowych, ciśnienia i temperatury w otworach, międzyotworowy (tomografii sejsmicznej i elektroporowej), powierzchniowy geochemiczny i hydrogeologiczny podziemnych wód użytkowych (istniejące i nowe płytkie otwory, nawiercające wszystkie użytkowe poziomy wodonośne, tzn. JCWP i GZWP) oraz interpretację kompleksową danych z obu etapów obejmującą stworzenie szczegółowego modelu geologicznego kompleksu składowania/magazynowania i jego nadkładu.

Stąd dla drugiego etapu otrzymujemy w sumie orientacyjnie ok. 26,5-32,2 mln zł.

Nie obejmuje to budowy sieci stałego monitoringu dla sejsmiki 4D i innych badań, ani infrastruktury związanej z zagospodarowaniem składowiska/magazynu (budowanych po uzyskaniu koncesji na składowanie/magazynowanie).

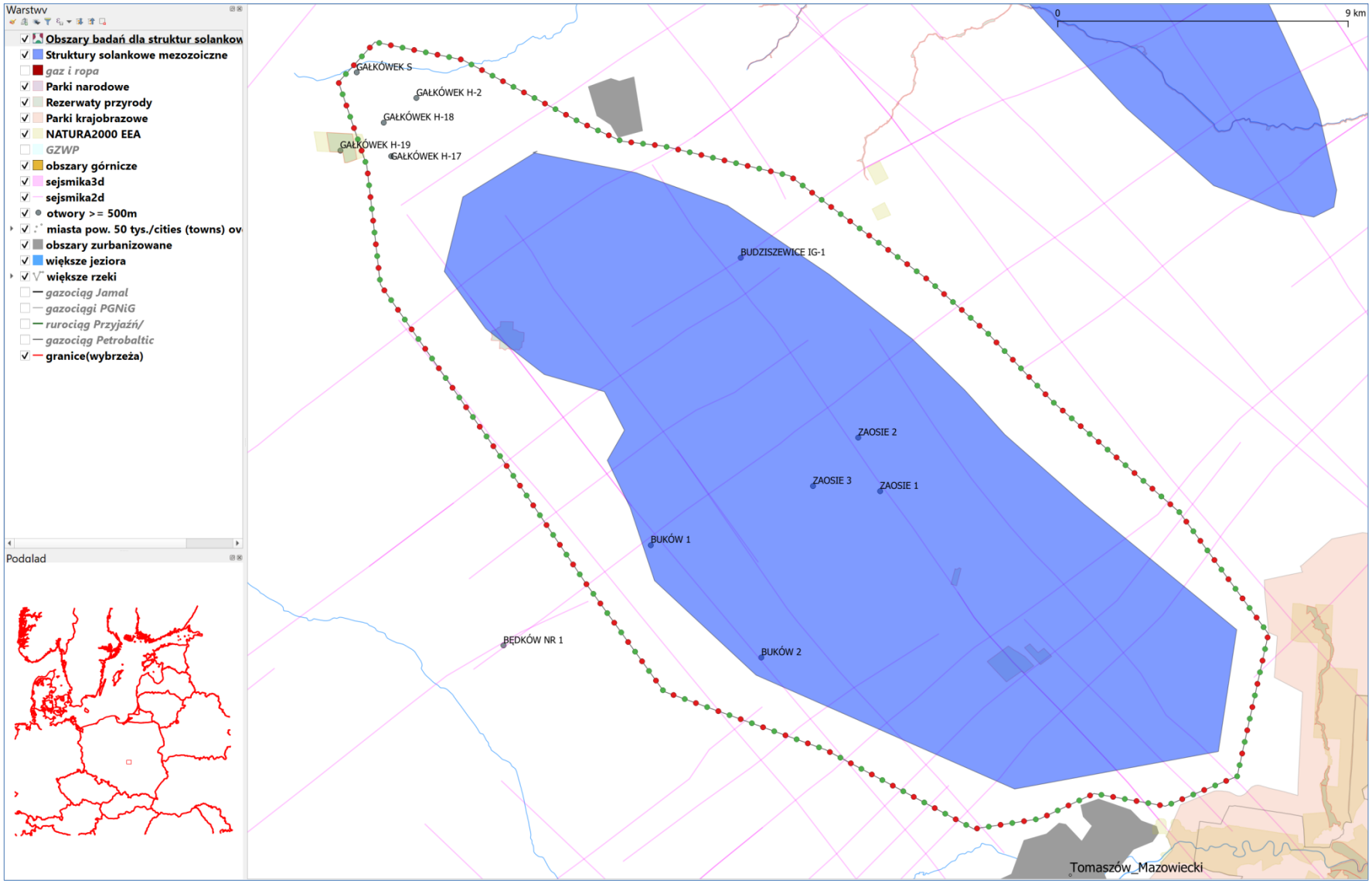


Fig. 8-2 Orientacyjny obszar badań dla struktury Budziszewice-Zaosie w utworach jury

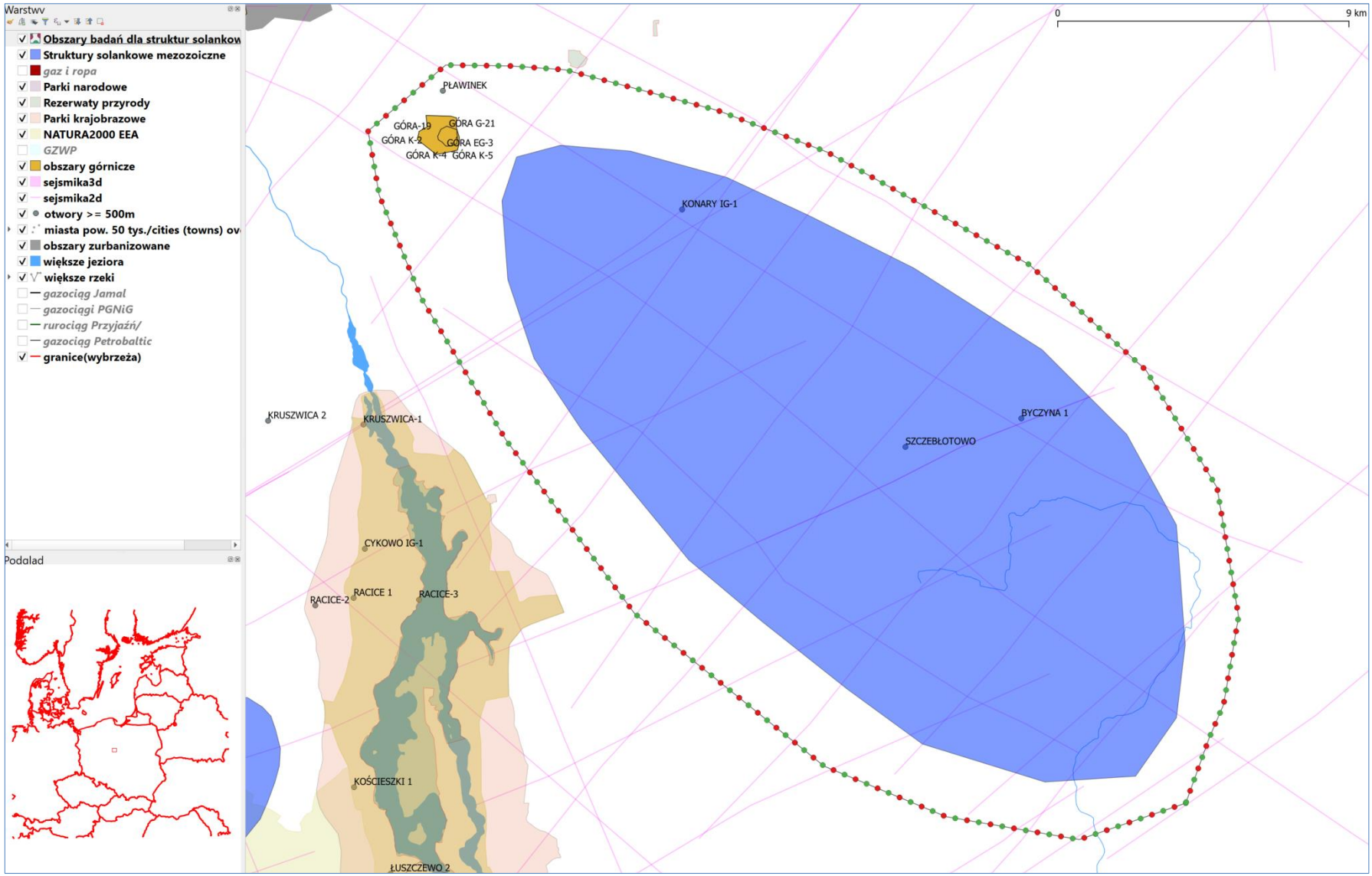


Fig. 8-3 Orientacyjny obszar badań dla struktury Konary w utworach jury

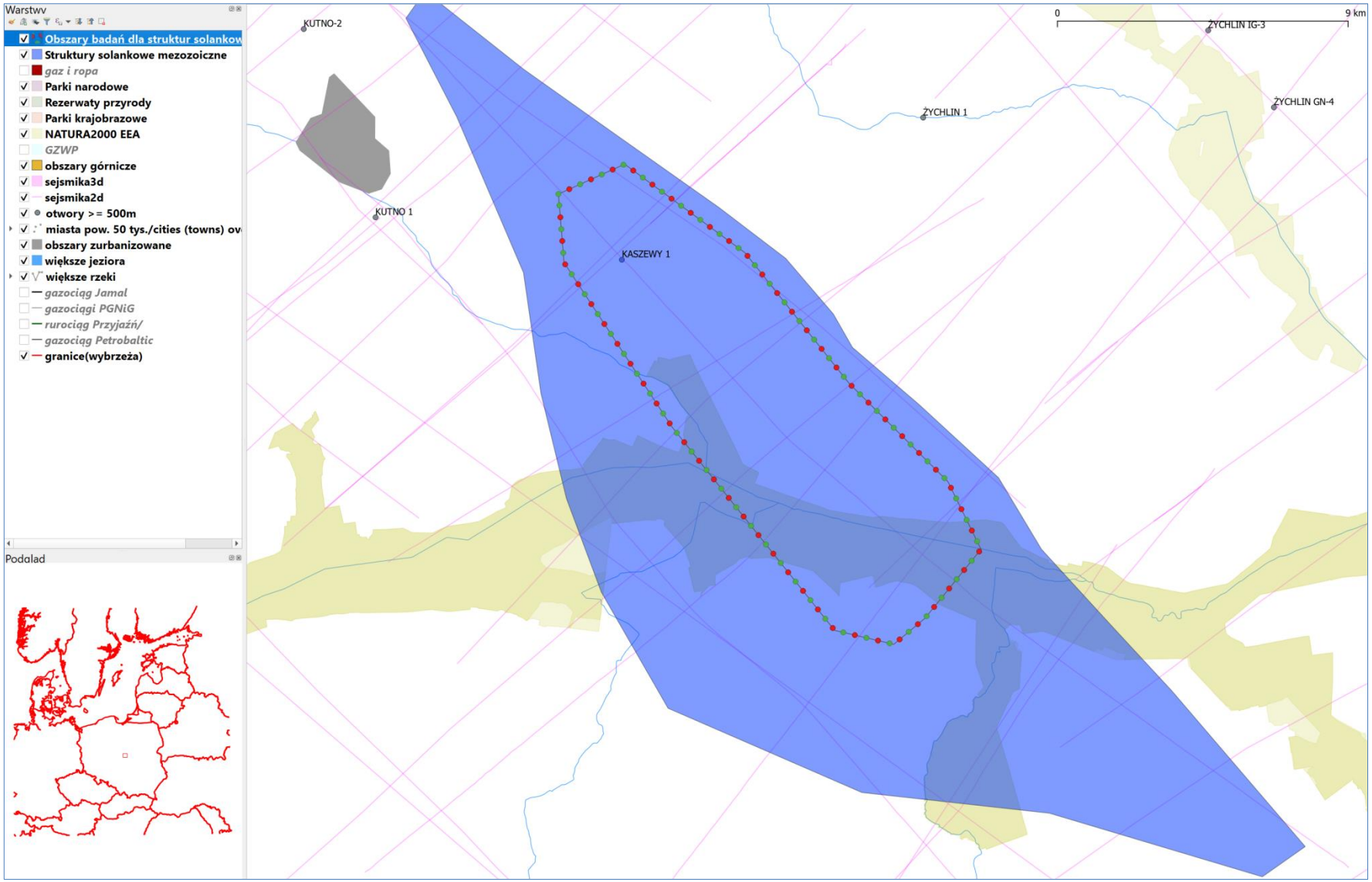


Fig. 8-4 Orientacyjny obszar badań dla struktury Wojszyce w utworach jury

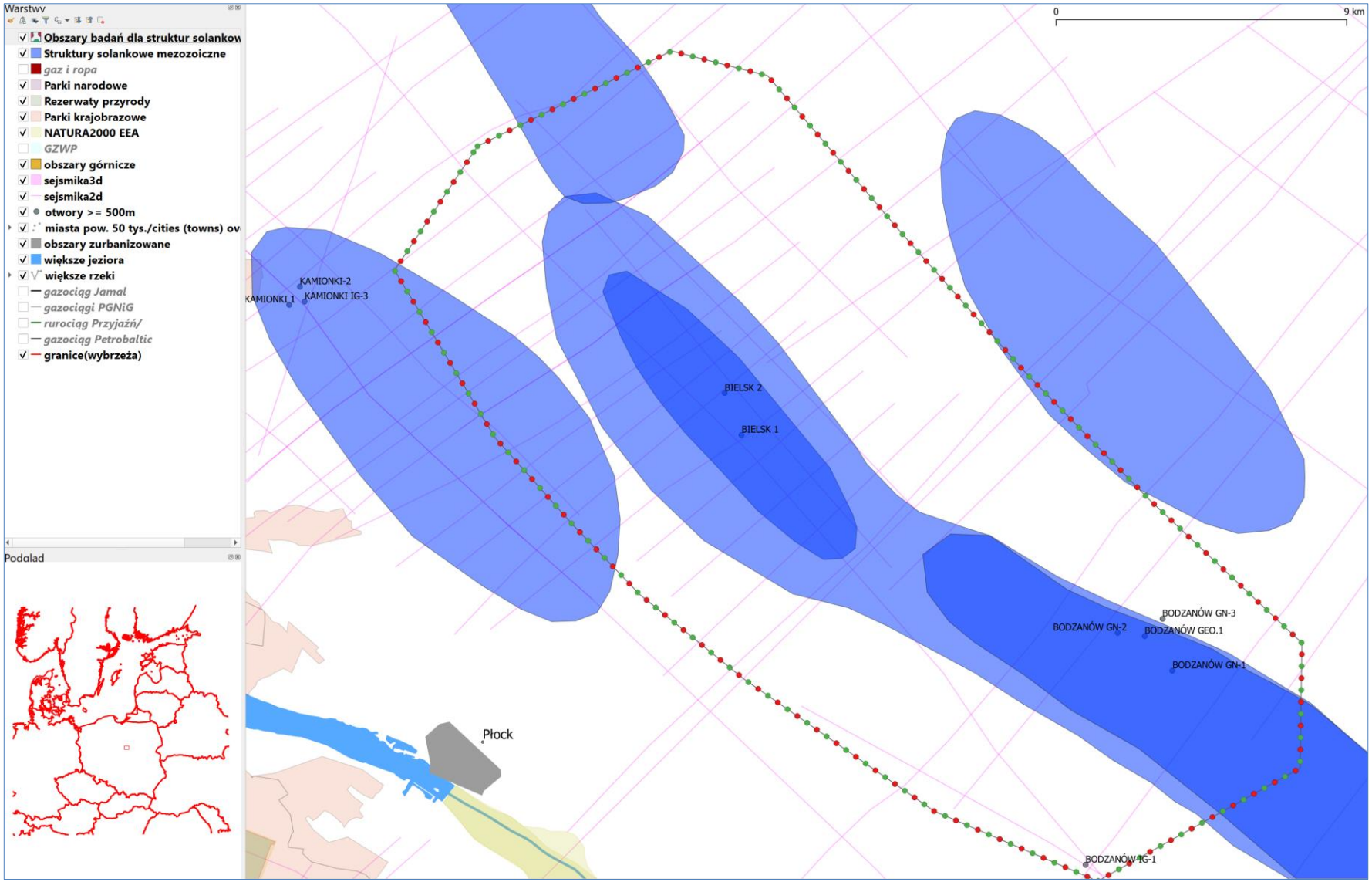


Fig. 8-5 Orientacyjny obszar badań dla struktury Bielsk –Bodzanów (kulminacja Bielska) w utworach kredy (oraz jury)

8.5 Podsumowanie

(Adam Wójcicki)

W rozdziale **8** przedyskutowano zagadnienia w zakresie wytycznych na potrzeby opracowania projektów robót geologicznych, dotyczących w szczególności uzupełniających badań geologicznych i geofizycznych potrzebnych do szczegółowego rozpoznania potencjalnych magazynów i składowisk substancji, czyli, w naszym przypadku nośników energii takich jak wodór, mieszaniny wodoru i gazu ziemnego, gaz ziemny oraz sprężone powietrze, a także dwutlenek węgla.

Można przy tym stwierdzić, że na magazyny wodoru (i ew. mieszanin wodoru i gazu ziemnego gazu ziemnego i sprężonego powietrza) rekomendowane są kawerny budowane w pokładach cechsztyńskiej soli najstarszej na wytypowanych obszarach w rejonie NE części wyniesienia Łeby. Obszary te zlokalizowane są w pobliżu potencjalnych źródeł zielonego wodoru, tzn. farm wiatrowych na morzu i ew. przyszłych instalacji wytwórczych (elektrolizerów). Natomiast struktury solankowe, z uwagi na potencjalnie ogromną pojemność, rekomendowane są na składowiska dwutlenku węgla, ewentualnie mieszanin gazu ziemnego i wodoru.

Na wstępie przedstawiono zagadnienia prawne dotyczące problematyki przygotowywania i realizacji projektów robót geologicznych na potrzeby rozpoznawania potencjalnych magazynów i składowisk substancji w przedmiotowym zakresie, tzn. podstawy prawne odnośnie sporządzania i zakresu prg, realizacji objętych nim badań oraz dokumentacji będącej wynikiem prac wykonanych w ramach prg i jej dalszego wykorzystania w procesie koncesyjnym.

Następnie omówiono przedsięwzięcia dotyczące magazynowania wodoru w kawernach solnych na świecie, przy czym wskazano, że jeśli chodzi o warunki geologiczne to najbliższym odpowiednikiem planowanych prac byłby projekt Teeside w Wielkiej Brytanii (oraz dalsze prace tam postulowane). Z kolei dla struktur solankowych warte są uwagi doświadczenia projektu pilotażowego Ketzin oraz aktualnie realizowanych wielkoskalowych projektów składowania dwutlenku węgla w formacjach solankowych na lądzie (Aquistore, Gorgon, Illinois, Quest), gdzie zastosowano bogaty zakres badań geologiczno-geofizycznych na etapie rozpoznawania struktur i monitoringu stanu początkowego ośrodka geologicznego.

Zarówno dla pokładów soli jak i struktur solankowych scharakteryzowano wyczerpująco prace wykonane w ramach niniejszego przedsięwzięcia w zakresie wstępnego udokumentowania proponowanych do rozpoznania obiektów, których wyniki i/lub metodyka mogą być przydatne przy sporządzaniu prg w przedmiotowym zakresie. Przytoczono zawarte w odnośnych rozdziałach niniejszego opracowania sugestie wskazujące na potrzebę wykonania prac geofizycznych i geologicznych niezbędnych do uzyskania odpowiedzi na szereg postawionych tam problemów oraz propozycje dotyczące zakresu i metodyki takich prac.

Na podstawie tych informacji oraz doświadczeń ze wspomnianych wyżej przedsięwzięć na świecie dotyczących magazynowania wodoru w kawernach w pokładach soli oraz składowania dwutlenku węgla w strukturach solankowych na lądzie zaproponowano orientacyjny zakres i kosztorys prac potrzebnych do rozpoznania proponowanych (jako przykładowych) obiektów, tzn. 4 obszarów perspektywicznych do lokowania kawern w pokładzie soli i 4 mezozoicznych struktur solankowych.

9. Koordynacja prac, wymiana doświadczeń i prezentacja wyników

9.1 Koordynacja prac

W ramach koordynacji prac komunikowano się w miarę potrzeby e-mailowo i telefonicznie oraz przez aplikację MS Teams w sprawach realizacji zaplanowanego zakresu prac przez wykonawców, lub kontaktowano się osobiście/spotykano się w zespołach w związku z realizacją poszczególnych podzadań. Obejmowało to m.in. zorganizowanie spotkania inauguracyjnego wykonawców projektu, które odbyło się zdalnie z wykorzystaniem aplikacji MS Teams w lutym 2022 roku, wyjazd służbowy 1 pracownika Oddziału Dolnośląskiego z Wrocławia do Warszawy celem analizy materiałów archiwalnych dotyczących badań związanych z lokalizacją kawern w pokładach soli w marcu 2022 roku, wyjazdy służbowe z Wrocławia do Warszawy pracownika OD odpowiedzialnego za podzadania dotyczące pokładów soli na spotkania robocze w grudniu 2022 roku oraz w lutym i marcu 2023 roku, a także delegacje 3 pracowników OD z Wrocławia do Warszawy w lipcu 2023. Delegacje związane z wyjazdami do rdzeniowni zostały omówione w rozdziałach dotyczących odnośnych podzadań.

W lutym 2024 roku zorganizowano spotkanie podsumowujące prace wykonane dotychczas w ramach całego przedsięwzięcia, w formie hybrydowej, tzn. wykonawcy z komórek organizacyjnych w Warszawie oraz 2 pracowników z Oddziału Dolnośląskiego i 1 pracownik z Oddziału Górnośląskiego byli obecni osobiście (wyjazd służbowy 2 osób z Wrocławia do Warszawy i 1 osoby z Sosnowca do Warszawy), zaś pozostali członkowie zespołu wykonawców z OD i OG brali udział zdalnie, stąd w sumie w spotkaniu uczestniczyło ponad 20 osób (zależnie od sesji), natomiast w ramach samego spotkania przedstawiono 22 prezentacje w 4 sesjach i przedyskutowano zagadnienia wymagające uzupełnienia.

9.2 Wymiana doświadczeń i prezentacja wyników

W ramach wymiany doświadczeń wzięto udział w krajowej konferencji branżowej „IV edycja seminarium: Magazyny energii – aktualne regulacje, perspektywy rozwoju 23 lutego 2022“ (online; 23.02.22, 2 osoby) dotyczącej problematyki związanej (m.in.) z zagadnieniami podziemnego magazynowania paliw/nośników energii, w tym wodoru.

Jeśli chodzi o wymianę doświadczeń (oraz prezentację wyników prac) w ramach konferencji o zasięgu międzynarodowym, obejmujących m.in. kontakty z europejskimi i amerykańskimi służbami geologicznymi oraz innymi podmiotami zagranicznymi i krajowymi, z możliwością integracji założeń badawczych i wyników z analogicznymi z przedsięwzięć prowadzonych w kraju i zagranicą to można tu przytoczyć:

- udział w konferencji zagranicznej „10th Conference on the Mechanical Behavior of Salt” w Holandii (05-09.07.2022; 1 osoba, która wygłosiła 1 referat – na bazie wcześniej przygotowanego artykułu);

- szeroki udział w konferencji krajowej (o charakterze międzynarodowym) „Quo Vadis Sal 2022” w Krakowie (22-23.09.22; 5 osób, uprzednio przygotowano 4 referaty z zakresu niniejszego przedsięwzięcia, z tego wygłoszono 3);

- udział w konferencji krajowej (o charakterze międzynarodowym) „Geopetrol 2022” w Zakopanem (19-21.09.22; 1 osoba), obejmującej m.in. sesję „Magazynowanie gazu ziemnego i wodoru w strukturach geologicznych oraz geologiczna sekwestracja CO_2”;

- udział w międzynarodowej konferencji Baltic Carbon Forum 2022 w Kownie, Litwa (13-14.10.22; 1 osoba, która wygłosiła 1 referat z problematyki składowania CO_2 w Polsce);

- udział w konferencji EGU w Wiedniu, Austria (delegacja 1 osoby wraz z odnośnymi opłatami, 23-29.04.23) celem zapoznania się z postępami badań w zakresie magazynowania substancji w strukturach/kawernach solnych;

- udział w międzynarodowej konferencji Jurassica XV (3 osoby), gdzie wygłoszono referat „Storage potential in Jurassic formations in Poland” (a wcześniej przygotowano założenia i abstrakt; delegacja 1 osoby, 19-22.09.23);

- przygotowanie abstraktu posteru przedstawiającego model soli pokładowych w rejonie złoża soli Zatoka Pucka (E część wyniesienia Łeby) na konferencję Quo Vadis Sal 2023 i sam poster (4 osoby);

- udział w międzynarodowej konferencji Baltic Carbon Forum 2023 (delegacja do Rygi, Łotwa; 2 osoby 10/11-14.10.23) celem zapoznania się z postępami wdrażania technologii CCS/składowania CO_2/magazynowania w basenie Morza Bałtyckiego, Europie i na świecie;

- udział w seminarium EIT RawMaterials EXPERTFORUM. „Responsible Sourcing Driving Sustainable Change” (delegacja do Pragi, Czechy, 2 osoby, 6-8.12.23) celem zapoznania się z problematyką zrównoważonych praktyk w eksploatacji surowców mineralnych i działalności górniczej, ochronie środowiska i ograniczeniu emisji gazów (np. CO_2), w tym także zmian polityki dotyczącej magazynowania/składowania emitowanych gazów w podziemnych magazynach;

- uczestnictwo w seminarium “Transport i składowanie CO2 oraz diagnoza technologii CCUS w Polsce”, projektu CCUS.pl (delegacja do Krakowa, 1 osoba, 16-17.11.23), celem zapoznania się z postępami tegoż projektu, realizowanego przez AGH i Wise Europa, którego przedmiotem jest strategia rozwoju technologii wychwytu, transportu, utylizacji i składowania CO2 w Polsce oraz pilotaż Polskiego Klastra CCUS.

Zgodnie z zapisami umowy dotyczącej niniejszego przedsięwzięcia przygotowano stronę www gdzie niniejsze sprawozdanie (raport końcowy) zostanie zamieszczone po akceptacji przez Zamawiającego (https://skladowanie.pgi.gov.pl/twiki/bin/view/Magazyny/WebHome).

Przygotowano 1 publikację o zasięgu krajowym i 3 publikacje o zasięgu międzynarodowym (dalsze szczegóły podano w Załączniku A).

Publikacja o zasięgu krajowym "Magazynowanie i składowanie substancji w strukturach geologicznych" (Wójcicki, Czapowski, Zacharski) została złożona w kwietniu 2022 roku do Wydawnictw IOŚ jako rozdział w monografii Instytutu Ochrony Środowiska "Zeroemisyjna Polska - wyzwanie przyszłości" (finalny tytuł monografii: „Ochrona klimatu w Polsce – wybrane zagadnienia i rozwiązania”), która po recenzji i korektach została opublikowania w październiku 2023 roku.

Artykuł w periodyku zagranicznym, o zasięgu międzynarodowym, „Deformation patterns in the mechanically stratified evaporites over an active basement fault” (Adamuszek, Dąbrowski)

został przygotowany przed konferencją Saltmech w Holandii (tzn. w pierwszych miesiącach 2022 roku), zaś po recenzji i poprawkach ukazał się w księdze artykułów z konferencji wydanej przez Uniwersytet w Utrechcie (Holandia) w lipcu 2022 roku.

Wersja robocza artykułu "Wpływ uziarnienia soli kamiennych na tempo zaciskania się kawern solnych/ Correlation between the rock-salt grain size and the rate of underground cavern convergence " (Słotwiński, Adamuszek) została przygotowana przed konferencją Quo Vadis Sal 2022 (tzn. w lecie 2022 roku), i posłużyła do przygotowania prezentacji przedstawionej na tejże konferencji. Po recenzji oraz finalnych poprawkach artykuł został opublikowany w języku polskim i angielskim w periodyku o zasięgu międzynarodowym – Przeglądzie Solnym/Salt Review, Roczniku Polskiego Stowarzyszenia Górnictwa Solnego 2023, który ukazał się w styczniu 2024 roku.

Artykuł „Giant polygonal anhydrite ridges in the northeastern Southern Permian Basin (Poland)" (Głuszyński, Jarosiński, Dąbrowski, Peryt) został złożony do periodyku o zasięgu międzynarodowym Geology w roku 2023, przyjęty i jest aktualnie w trakcie recenzji i korekty.

10. Prace realizowane przez podwykonawców

(Adam Wójcicki)

W roku 2022 w ramach zadania zostały wykonane i odebrane następujące prace kooperacyjne:

- Badania petrofizyczne na porowatość/przepuszczalność i gęstość oraz mikroszczelinowatość wykonane przez Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy. Badania obejmowały 40 próbek skał węglanowo-krzemiankowych kredy (z 11 otworów wybranych na początku realizacji podzadania 4, omówionego w rozdziale 4) oraz 20 szlifów z 20 próbek skał węglanowo-krzemiankowych kredy (z 10 otworów spośród tychże 11). Zostały odebrane wyniki badań petrofizycznych w 40 próbkach skał kredy i analiza mikroszczelinowatości w 20 szlifach w formie tabelarycznej (pliki .xls) i zawierające interpretację tych wyników opracowanie tekstowe z załącznikami graficznymi (plik .pdf i MS Word) – materiały te zamieszczono na DVD w katalogu **/Prace podwykonawców/Badania petrofizyczne**, zaś ich wykorzystanie zostało omówione w rozdziale 4 niniejszego sprawozdania.

- Analizę rentgenowską (XRD) wykonaną przez Instytut Nauk Geologicznych Polskiej Akademii Nauk dla 12 próbek (z 6 otworów spośród omawianych wyżej 11) w ramach badań rentgenowskich skał iłowcowych/mułowcowych i przewarstwień ilastych. Zostały odebrane wyniki analizy rentgenowskiej (XRD) w 12 próbkach skał drobnoklastycznych wraz z interpretacją przekazane w formie cyfrowej (format MS Word) – materiały te zamieszczono na DVD w katalogu **/Prace podwykonawców/Analiza rentgenowska**, a ich wykorzystanie zostało omówione w rozdziale 4 niniejszego sprawozdania.

W roku 2023 w ramach zadania były realizowane prace kooperacyjne w zakresie zaawansowanego reprocessingu danych (profili) sejsmicznych. Objęło to trzy etapy prac wykonywanych przez GK Processing Sp. z o.o., realizowane w ramach dwóch umów zawartych przez PIG-PIB z podwykonawcą. Wykonywane prace były bieżąco nadzorowane, co polegało na analizie i odbiorze cotygodniowych raportów cząstkowych z prac prowadzonych przez podwykonawcę. Prace z każdego z etapów zostały odebrane po ich ukończeniu i wprowadzeniu przez podwykonawcę uzgodnionych poprawek. W Etapie I przedmiotem prac były 4 profile o łącznej długości 80 km przecinające strukturę solankową w utworach jury, zaś w Etapie II przedmiotem prac były 4 profile o łącznej długości 80 km przecinające strukturę solankową w utworach kredy. Prace kooperacyjne objęły dodatkowo (po zawarciu stosownego aneksu do Umowy pomiędzy PIG-PIB a PGNiG S.A.) reprocessing danych sejsmicznych 4 profili sejsmicznych o łącznej długości 120 km dla typowanych odcinków profili przecinających kolejną strukturę solankową w utworach jury. W każdym z etapów zostały odebrane dane cyfrowe stanowiące wyniki reprocessingu oraz dokumentacja z wykonanych prac (tzn. opracowanie tekstowe z załącznikami graficznymi) – materiały te zamieszczono na DVD w katalogu **/Prace podwykonawców/Reprocessing danych sejsmicznych**, a ich szczegółową dyskusję oraz wykorzystanie przedstawiono w rozdziale 6 niniejszego sprawozdania.

11. Podsumowanie

(Adam Wójcicki, Marta Adamuszek, Michał Słotwiński, Marcin Dąbrowski, Andrzej Głuszyński, Tadeusz Peryt, Krzysztof Leszczyński, Kinga Bobek, Marek Jarosiński, Aleksandra Kozłowska, Joanna Roszkowska-Remin, Edyta Nowak-Koszla, Sylwia Kijewska, Dominika Sieradz, Leszek, Skowroński, Olga Rosowiecka, Zdzisław Petecki)

W Polsce obecnie funkcjonuje 10 podziemnych magazynów substancji (nie licząc odpadów), w tym 7 podziemnych magazynów gazu wysokometanowego, 2 magazyny gazu zaazotowanego i 1 magazyn ropy naftowej. Magazynowanie tych substancji prowadzi się w sczerpanych złożach węglowodorów oraz w kawernach w wysadach solnych i pokładach soli. Nie funkcjonują jeszcze w naszym kraju podziemne magazyny wodoru, mieszanin wodoru i gazu ziemnego, ani też sprężonego powietrza. Rezultaty niniejszego przedsięwzięcia mogą przyczynić się do powstania takich magazynów (Fig. 11-1).

11.1 Magazyny substancji na świecie (rozdział 1.1)

Jeśli chodzi o podziemne magazynowanie substancji – nośników energii na świecie to najliczniej reprezentowane są podziemne magazyny gazu, wybudowane w strukturach naftowych, kawernach solnych i aquiferach – jest ich w sumie blisko 700. Pojemność czynna wszystkich aktualnie funkcjonujących magazynów gazu ziemnego w Polsce jest poniżej 1% pojemności wszystkich magazynów gazu ziemnego na świecie. Natomiast, jeśli chodzi o magazyny wodoru, mieszanin wodoru i gazu ziemnego (z domieszkami) oraz sprężonego powietrza to w sumie jest na świecie 12 takich magazynów funkcjonujących obecnie, do niedawna i w budowie (z tego 7 w Europie), przy czym magazyny (praktycznie) czystego wodoru funkcjonują obecnie wyłącznie w kawernach solnych, podobnie jak magazyny sprężonego powietrza. Natomiast mieszaniny wodoru i gazu ziemnego, względnie gazu ziemnego i wodoru (z domieszkami), magazynuje się w sczerpanych złożach gazu ziemnego (lecz nie ropy naftowej) i strukturach solankowych. Dla porównania jest na świecie co najmniej 25 aktualnie lub niegdyś funkcjonujących projektów CCS w zakresie składowania dwutlenku węgla na skalę przemysłową i wiele innych w mniejszej skali. Najwięcej takich projektów zlokalizowanych jest Ameryce Północnej, w Europie funkcjonują obecnie dwa projekty norweskie i jeden chorwacki. Najczęściej do składowania dwutlenku węgla na skalę przemysłową wykorzystywane są sczerpane złoża węglowodorów, w szczególności ropy naftowej (w tym do wspomagania wydobycia węglowodorów), w mniejszym stopniu aquifery (solankowe poziomy wodonośne).

11.2 Magazynowanie substancji w kawernach w pokładach soli cechsztyńskich wyniesienia Łeby (Tom II oraz rozdziały 2 i 3)

Jako rekomendowany rejon do analiz dotyczących lokalizacji kawern w pokładach soli cechsztyńskich na potrzeby magazynowania, w szczególności wodoru, wybrano wstępnie obszar wschodniej części wyniesienia Łeby, gdzie występuje pokład cechsztyńskiej soli najstarszej o najbardziej perspektywicznych parametrach. Analizowane parametry obejmowały m.in. miąższość i głębokość

występowania pokładu soli, wielkość ziaren halitu, występowanie domieszek minerałów ilastych i anhydrytu oraz przewarstwienia skalne. Przeanalizowano też reaktywność rozmaitych związków chemicznych występujących w soli kamiennej z wodorem. Analizowano też na podstawie dostępnej literatury przedmiotu parametry operacyjne kawern takie jak ciśnienie magazynowe substancji, pojemność i dostarczalność gazu oraz zalecany odstęp między kawernami w pokładzie soli. Poruszono też problematykę występowania poligonalnych grzbietów najstarszego anhydrytu dolnego, które zaburzają warstwę soli najstarszej – obszary tych grzbietów nie są rekomendowane do lokalizacji kawern magazynowych, rekomendowane są obszary pomiędzy nimi (panwie solne) o średnicy najczęściej rzędu 1-2 kilometrów.

Na podstawie interpretacji dostępnych danych otworowych i sejsmicznych sporządzono na rozpatrywanym obszarze wyniesienia Łeby mapy stropu, spągu i miąższości pokładu najstarszej soli kamiennej w wariancie wykorzystującym tylko dane z otworów oraz w wariancie opartym na interpretacji danych otworowych i sejsmicznych i porównano te mapy z analogicznymi z wcześniejszych opracowań. Określono potencjał magazynowy dla wodoru w pokładzie najstarszej soli kamiennej w rejonie wyniesienia Łeby w oparciu o mapy miąższości najstarszej soli kamiennej oraz parametry geometryczne i operacyjne kawern (i związane z tym kryteria) oraz obszarów magazynowych i wyznaczono strefę najbardziej perspektywiczną do lokalizacji kawern magazynowych w NE części wyniesienia Łeby, w obszarze i bezpośrednim sąsiedztwie złoża soli kamiennej Zatoka Pucka. W obrębie tej strefy wyznaczono i scharakteryzowano cztery obszary najbardziej perspektywiczne dla lokalizacji kawern magazynowych (dla wodoru) gdzie miąższości pokładu najstarszej soli kamiennej są odpowiednio wysokie, brak jest grzbietów anhydrytowych oraz obszarów ścisłej ochrony przyrody i obszarów zabudowanych, a także zarekomendowano lokalizację przyszłych kawern i zespołów magazynowych.

Na podstawie parametrów geomechanicznych dla soli kamiennej (parametry sprężyste i wytrzymałościowe, plastyczne i lepkie) z rejonu wyniesienia Łeby (oraz soli cechsztyńskich z innych rejonów Polski, basenu permskiego w Europie i innych formacji solnych na świecie (parametry sprężyste i wytrzymałościowe, plastyczne i lepkie), a następnie modeli strukturalnych, prowadzono badania i modelowania stabilności i szczelności kawern. Analizowano zagadnienia szczelności i stateczności kawern solnych (tzn. odporności kawerny na uszkodzenia mechaniczne, które mogą prowadzić do utraty szczelności oraz jej zdolności do zachowywania pierwotnego kształtu i objętości), zestawiono kryteria szczelności i stateczności kawern odnoszących się do następujących parametrów: przemieszczenia, dylatancji, konwergencji i plastyczności (w tym ich wartości krytyczne).

Na potrzeby oceny ewentualnych zagrożeń dla użytkowych poziomów wodonośnych w związku z budową i eksploatacją kawern magazynowych w rozpatrywanym rejonie przeanalizowano dla tego obszaru, w oparciu o dostępne publikacje i opracowania archiwalne, warunki hydrogeologiczne, tzn. występowanie użytkowych wód podziemnych, możliwości ewentualnej migracji wzdłuż lokalnych i regionalnych stref uskokowych solanek do poziomów wód użytkowych oraz, w oparciu o parametry hydrogeochemiczne solanek, możliwości występowania niedostatecznej izolacji pomiędzy poziomami wodonośnymi charakteryzującymi się wysoką mineralizacją a użytkowymi poziomami wodonośnymi. Przeanalizowano ewentualne zagrożenia dla wód użytkowych wiążące się z eksploatacją kawern solnych. Sporządzono charakterystykę hydrogeochemiczną występujących w rejonie wyniesienia Łeby pięter wodonośnych, gdzie występują wody podziemne charakteryzujące się znaczącą

mineralizacją, na potrzeby oceny jakości izolacji tych poziomów od użytkowych poziomów wodonośnych.

Opracowano wstępne modele numeryczne kawern solnych wykorzystane następnie do badań stabilności i szczelności kawern – zaadaptowano i rozwinięto przy tym modele i kody numeryczne wcześniej stworzone w ramach innych przedsięwzięć i publikacji. Analizowano w szczególności naprężenia w obrębie modelu kawerny dla różnych rozkładów przyłożonego ciśnienia, w obrębie otworu w modelu kawerny oraz naprężenie wokół inkluzji w pokładzie soli. Wyniki modelowania numerycznego posłużyły do określenia kryteriów oceny parametrów geometrycznych kawerny, parametrów mechanicznych skał oraz parametrów operacyjnych, które mają szczególny wpływ na stabilność i szczelność kawern w rozpatrywanym rejonie wyniesienia Łeby.

Następnie wykonano modelowanie numeryczne stabilności i szczelności kawern solnych zlokalizowanych w wybranych (4) otworach w obrębie każdego z czterech wytypowanych obszarów perspektywicznych, dla których wcześniej opracowano modele strukturalno-parametryczne. W modelach dla każdej lokalizacji przyjęto, że kawerna zlokalizowana jest w pokładzie soli, którą przykrywa miąższa warstwa nadkładu. Zostały uwzględnione w modelach takie parametry geomechaniczne jak naprężenia pionowe (wpływ nadkładu) i lepkość soli (zależna od temperatury i uziarnienia), a ponadto uwzględniono ciśnienie gazu w kawernie oraz geometrię kawerny i wielkość domeny modelu numerycznego. Dla obszarów wokół każdej z kawern zilustrowano tempo przemieszczeń soli i naprężenia efektywne oraz wpływ nadkładu, lepkości soli, ciśnienia gazu oraz różnych wariantów geometrii kawerny w obrębie pokładu soli.

Wyniki modelowań numerycznych pozwoliły następnie wyznaczyć finalne kryteria oceny parametrów geometrycznych kawerny, parametrów mechanicznych skał oraz parametrów operacyjnych, które mają szczególny wpływ na stabilność i szczelność kawern w rejonie wyniesienia Łeby.

Następnie dokonano podsumowania wykonanych prac w ramach niniejszego przedsięwzięcia prac dotyczących problematyki magazynowania substancji (w szczególności wodoru) w kawernach w pokładach soli cechsztyńskich. Dotyczyły one analiz możliwości magazynowania w miąższym pokładzie najstarszej soli kamiennej na obszarze wyniesienia Łeby. Jak wspomniano wyżej, w rezultacie tych analiz na obszarze NE części wyniesienia Łeby zostały wyznaczone (w oparciu o mapy miąższości pokładu soli sporządzone na podstawie danych otworowych, interpretacji danych sejsmicznych 2D oraz dostępnych informacji na temat parametrów soli kamiennej i kawern), cztery obszary najbardziej perspektywiczne pod kątem lokowania kawern. Przy wyznaczaniu obszarów uwzględniono zagospodarowanie terenu, formy ochrony przyrody i możliwe konflikty interesów. Istotnym wkładem do interpretacji miąższości soli Na1 są analizy występowania w podłożu pokładu soli skomplikowanego systemu wąskich poligonalnych grzbietów anhydrytowych ograniczających panwie solne o rozmiarach rzędu 1-2 km, gdzie mogą być korzystne warunki do lokowania kawern (a nie w obrębie grzbietów, gdzie pokład soli może nawet zanikać). Wykonano takie analizy w oparciu o dostępną sejsmikę 3D w strefie na południe od wytypowanych obszarów perspektywicznych, dla których postuluje się wykonanie analogicznych badań sejsmicznych.

Wskazówki dotyczące wyboru lokalizacji pod budowę podziemnych magazynów w obrębie wytypowanych obszarów w rejonie wyniesienia Łeby obejmowały kryteria głębokości występowania i miąższości pokładu soli, występowania i miąższości przewarstwień w jego obrębie, obecności uskoków i struktur tektonicznych oraz stopnia zanieczyszczenia soli (domieszek). Ponadto

zarekomendowano wybór i ranking lokalizacji w oparciu o ocenę potencjału magazynowego, gdzie obok parametrów pokładu soli uwzględnia się także parametry geometryczne i operacyjne kawern. Dzięki temu, inwestorzy i decydenci mogą dokonać wyboru lokalizacji, która najlepiej spełnia zarówno kryteria geologiczne, jak i operacyjne, maksymalizując efektywność i rentowność inwestycji, uwzględniając powyższe informacje a następnie wykonane przez nich dalsze badania i analizy w zakresie wykonalności i oceny bezpieczeństwa projektowanego magazynu.

Samą analizę stabilności i szczelności kawern solnych wykonano w oparciu o omawiane w rozdziale 16 wyniki modelowania numerycznego. Przeanalizowano, pod kątem wskazówek dla potencjalnych inwestorów, wpływ różnych parametrów geometrycznych, mechanicznych i operacyjnych na tempa deformacji wokół kawern oraz naprężeń efektywnych, które stanowią kluczowe narzędzie do oceny stabilności i szczelności kawern. Badania te podkreśliły znaczenie trzech głównych czynników: (1) lepkości soli, wpływającej m.in. na tempo zaciskania kawern, gdzie istotna też może być obecność przewarstwień anhydrytu; (2) ciśnienia w kawernie, co może mieć wpływ na integralność strukturalną kawern oraz ew. deformacje i ryzyko utraty szczelności; (3) geometrii kawerny, co ma wpływ na rozkład naprężeń wokół kawerny i utrzymanie jej integralności strukturalnej (najbardziej optymalna jest kawerna rozszerzająca się ku dołowi, z zaokrąglonymi brzegami).

Jeśli chodzi o wybór lokalizacji pod budowę podziemnych magazynów w obrębie wytypowanych obszarów w rejonie wyniesienia Łeby to ponadto zarekomendowano wykonanie na rozpatrywanych obszarach perspektywicznych badań geofizycznych w tym w szczególności sejsmiki 3D, pozwalającej na ewentualną lokalizację wałów anhydrytowych. Jednocześnie wskazano na konieczność wykonania większej ilości badań mechanicznych na próbach soli, zwłaszcza prób pełzania oraz analiz na obecność zanieczyszczeń w obrębie soli, a także wielkości kryształów (szczegółowe badania petrograficzne i mikrostrukturalne).

Przeprowadzono także liczne konsultacje naukowe podczas konferencji oraz pracowano nad publikacjami naukowymi w przedmiotowym zakresie.

11.3 Analizy regionalnego uszczelnienia kredowego struktur solankowych w Polsce centralnej (rozdział 4)

Analizie została poddana węglanowa i węglanowo-krzemionkowa sekwencja górnej kredy (łącznie z albem górnym) w centralnej Polsce w otworach wiertniczych na obszarze niecki mogileńsko-uniejowskiej i niecki brzeżnej (płockiej). Wykonano profilowania litologiczne i sedymentologiczne fragmentów rdzeni z otworów oraz sporządzono ogólną charakterystykę litologiczną, stratygraficzną i sedymentologiczną sekwencji, zebrano także archiwalne dane na temat zawartości kalcytu. Wykonano nowe badania laboratoryjne na próbkach skał: petrograficzne, petrofizyczne (w tym badania porowatości, przepuszczalności i mikroszczelinowatości skał) i XRD. Wykonano profilowania podatności magnetycznej skał (ręcznym podatnościomierzem) oraz promieniowania gamma (spektrometrem polowym) celem identyfikacji m. in. zailonych przewarstwień oraz korelacji z profilowaniem gamma z geofizyki otworowej i dopasowania pomiędzy rdzeniem a głębokością geofizyczną. Wykonano także profilowania strukturalne rdzeni dla określenia na ile kruche struktury tektoniczne w obrębie potencjalnie uszczelniających warstw kredy mogą przyczynić się do rozszczelnienia zbiorników w obrębie kompleksu kredowego.

Zmienność własności petrofizycznych i chemicznych skał w profilu kredy górnej jest przeważnie niewielka i na ogół obserwuje się bardzo stopniowe przejścia pomiędzy poszczególnymi litologicznymi typami skał. Podstawowe litofacje to: węglanowe (wapienie, wapienie margliste), iłowcowe (iłowce margliste, wapniste), mułowcowe (mułowce margliste), margliste (margle, margle ilaste), węglanowo-krzemionkowe (opoki, gezy), piaszczyste (piaskowce). Skały kredy górnej wykazują zróżnicowane zailenie w profilu pionowym i na ogół nie spotyka się miąższych przewarstwień iłowców, a laminacja ilasto-marglista jest nieliczna. Zawartość węglanu wapnia w skałach kredy górnej jest zmienna, na ogół dość wysoka i najczęściej zawiera się w przedziale 50-90%, ale występują także skały silnie margliste i zailone z zawartością węglanu wapnia poniżej 40%.

Badania geologiczne, w tym głównie sejsmika refleksyjna, wskazują, że węglanowa i węglanowo-krzemionkowa sekwencja kredy górnej w Polsce centralnej nie jest intensywnie zuskokowana. Główne uskoki przebiegają w rejonie struktur solnych oraz w strefach związanych z synsedymentacyjnymi rowami tektonicznymi, po południowo-zachodniej stronie antyklinorium śródpolskiego, w nieckach mogileńskiej i uniejowskiej. W strefie Strzelno-Poddębice profilowania strukturalne nie sugerują tektonicznego rozszczelnienia całego kompleksu K2, choć pęknięcia technologiczne rdzenia wskazują na jego kruchość. Górne interwały K2 – najczęściej do koniaku – bywają rozszczelnione seryjnymi spękaniami stromymi, natomiast niższe kompleksy nie noszą śladów takiego rozszczelnienia. W rejonie struktury Gostynina (otwór Żychlin IG-3) mogą być rozszczelnione utwory cenomanu, w otworze Polik IG-1 może być rozszczelniony praktycznie cały kompleks K2, zaś w otworze Grudziądz IG-1 nie stwierdzono takich zagrożeń. Natomiast analizy geomechaniczne w otworze Pabianice 1 wykazały, że występująca tam strefa uskokowa przedłużająca się w wysad Kłodawy, jest współcześnie reaktywowana przesuwczo. Jeżeli równoległa do niej strefa Poddębic jest również reaktywowana przesuwczo, to mogą być tam rozwierane spękania w obrębie K2 o odpowiedniej orientacji względem uskoków głównych.

Zebrane dane archiwalne wskazują, że skały z otworów wiertniczych położonych w niecce brzeżnej wykazują generalnie nieco wyższe wartości porowatości. Wysoką porowatość i przepuszczalność mają też lokalnie piaskowce santonu i w mniejszym stopniu węglany kampanu w niecce łódzkiej (rejon Poddębic). Generalnie przepuszczalność w utworach węglanowych i węglanowo-krzemionkowych jest niska i zawiera się przeważnie w przedziale <0,10 – 0,32 mD. Nowe badania petrofizyczne wskazują, że utwory kredy górnej i albu górnego, głównie wapienie, iłowce/mułowce wapniste, margle oraz opoki i gezy, charakteryzują się wysoką porowatością efektywną – około 20%. Jednakże przestrzeń porowa tych skał ma charakter mikroporowaty (dominuje frakcja <0,1 μm). Dla próbek iłowców-mułowców-margli średnie wartości frakcji nanoporów sięgają 86%. Podobne wartości można zaobserwować dla próbek reprezentujących opoki (84%). Próbki wapieni poza silnie rozbudowanym systemem nanoporów (średnia 54%) posiadają również znaczący udział mikroporów (0,5-0,1um), którego średnie wartości sięgają 45%. We wszystkich badanych litotypach występuje wyraźny trend spadku porowatości wraz z głębokością. Rozbudowany system nanoporów znacznie obniża zdolności transportowe badanych skał, których przepuszczalność jest bardzo niska (mediany <0,1 mD).

Stąd analizowane skały kredy górnej wraz z albem górnym w zasadzie mogą być rozważane jako w miarę dobry poziom uszczelniający, zwłaszcza jeśli weźmie się pod uwagę fakt, że sekwencja ta osiąga znaczną miąższość. Obok miąższości tej sekwencji istotny jest brak stref uskokowych lub spękań rozszczelniających cały kompleks K2 (co jest spełnione na większości obszaru badań).

Zapewnia to najprawdopodobniej bezpieczne magazynowanie gazu ziemnego, mieszanin gazu ziemnego z wodorem, zapewne też czystego wodoru i z pewnością sprężonego powietrza. Jeśli chodzi o składowanie dwutlenku węgla to problemem może być reaktywność tego gazu rozpuszczonego wodach złożowych z węglanami. Jednak w przypadku sekwencji węglanowej i węglanowo-krzemionkowej górnej kredy mamy do czynienia z dużą jej miąższością, a ponadto w przestrzeni porowej mogą zachodzić inne reakcje, także wytrącanie związków chemicznych, co może stanowić skuteczną barierę dla migracji zatłoczonego dwutlenku węgla poza kompleks składowania.

11.4 Kryteria wyboru i rankingu struktur solankowych oraz wybór struktur na ich podstawie (rozdziały 5.1 – 5.3)

Zestawiono, na podstawie dostępnych publikacji i opracowań archiwalnych, tabelarycznie kryteria wyboru dotyczące podziemnych magazynów gazu ziemnego, wodoru oraz mieszanin wodoru i gazu ziemnego, a także magazynów sprężonego powietrza oraz składowisk dwutlenku węgla (Tabela 5-1 – Tabela 5-3). Zasadniczo są to kryteria złożowe charakteryzujące przydatność struktury jako potencjalnego magazynu/składowiska rozpatrywanej substancji, obejmujące parametry geometryczne (i pojemność), parametry kolektora i parametry uszczelnienia. Podano kryteria optymalne, charakteryzujące najbardziej pożądane własności rozpatrywanych struktur oraz kryteria graniczne, których niespełnienie zasadniczo dyskwalifikuje rozpatrywane struktury z dalszych rozważań. Dla rozpatrywanych substancji (dwutlenek węgla, gaz ziemny, wodór oraz mieszaniny wodoru i gazu ziemnego, sprężone powietrze), częściowo pokrywają się zalecane przedziały głębokości dla magazynowania/składowania, w mniejszym stopniu miąższości kolektora, które to wiążą się z kolei z wymaganymi pojemnościami magazynowymi. W tych samych warunkach złożowych, w porównaniu do dwutlenku węgla występującego w wysokogęstościowej fazie nadkrytycznej, ewentualnie ciekłej, gęstość gazu ziemnego może być 3-9 mniejsza, gęstość wodoru 30-40 mniejsza, a gęstość sprężonego powietrza o rząd wielkości mniejsza niż CO_2, i stąd w tej samej objętości przestrzeni porowych można odpowiednio mniej zmieścić (masy) danej substancji. Ale i tak typowe wielkości dla magazynów gazu ziemnego, a zwłaszcza wodoru są nieporównywalnie mniejsze niż składowisk dwutlenku węgla. Jeśli chodzi o własności kolektora to dla magazynowania wodoru niewskazana jest obecność minerałów, z którymi ten gaz reaguje i jest wiązany, względnie, z którymi takie reakcje zachodzą w obecności flory bakteryjnej i kwasów organicznych. Zalecane własności zbiornikowe dla poszczególnych substancji są porównywalne dla tych samych warunków złożowych. Jeśli chodzi o jakość i integralność uszczelnienia to wymogi dla poszczególnych substancji są na ogół analogiczne, z tym, że dla CO_2 preferowane są dodatkowe uszczelnienia w nadkładzie, a jeśli występują w nich węglany to uszczelnienie powinno być o możliwie największej miąższości. Stąd jako podstawę do rankingu w części dotyczącej parametrów złożowych przyjęto zasadniczo kryteria złożowe dla CO_2, gdyż są one na ogół porównywalne lub ostrzejsze niż dla pozostałych substancji.

Należy przy tym nadmienić, że w przypadku struktur solankowych ich stopień rozpoznania może okazać się niewystarczający do wiarygodnego określenia, w oparciu o dostępne informacje, czy spełnione jest dane kryterium. Poza tym, ponieważ obecnie jest stosunkowo niewiele magazynów

wodoru oraz mieszanin wodoru z gazem ziemnym (z domieszkami) funkcjonujących w Europie i na świecie niewiele, stąd kryteria w tym przedmiocie mają charakter orientacyjny.

Przyjęte kryteria rankingu obejmują parametry złożowe z ww. kryteriów wyboru, a także problematykę dostępności danych, wykonalności magazynowania/składowania oraz związanych z tym ewentualnych zagrożeń i konfliktów interesów w zakresie wykorzystania górotworu.

Wykorzystując informacje zawarte we wcześniej realizowanych opracowaniach (w tym „Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO_2 wraz z ich programem monitorowania" – Wójcicki i in., 2013), dostępnych dokumentacjach i publikacjach oraz zestawione w ramach niniejszego przedsięwzięcia (co objęło analizę danych sedymentologicznych, złożowych, geofizycznych, hydrogeologicznych i hydrogeochemicznych), została sporządzona charakterystyka i ranking 47 zinwentaryzowanych mezozoicznych struktur solankowych (Tabela 5-7) odnoszące się do wszystkich tych zagadnień. Przyjęto i zastosowano w sumie 9 podstawowych kryteriów obejmujących odpowiadające im zagadnienia i wskaźniki. Dla każdego z kryteriów przyjęto trójstopniową punktację (3 – bardzo korzystne parametry, 2 – korzystne, 1 – mało korzystne), zaś w przypadku, gdy brak było odnośnych danych przyjmowano 0 punktów. Suma punktów otrzymanych dla wszystkich 9 kryteriów dawała w rezultacie pozycję danej struktury w rankingu. Zastosowane kryteria rankingu zestawiono generalnie w trzech blokach tematycznych.

Pierwszy blok dotyczył dostępnych danych geologiczno-geofizycznych (otworów, sejsmiki i grawimetrii) i warunków geologicznych kolektorów (głębokość, miąższość, porowatość, przepuszczalność).

Drugi blok obejmował zagadnienia związane z bezpieczeństwem składowania oraz pojemności magazynowania/składowania. Obejmowało to, jeśli chodzi o zagadnienia bezpieczeństwa składowania, rozkład ciśnienia złożowego w kolektorze, jakość i integralność uszczelnienia, w tym miąższość podstawowego uszczelnienia i ew. występowanie dodatkowych warstw uszczelniających w nadkładzie, skład mineralno-petrograficzny warstw uszczelniających (m.in. występowanie minerałów ilastych i węglanów), oraz, jako przeciwskazanie, możliwość występowania uskoków przecinających kompleks uszczelniający, mogących stanowić drogi migracji płynów złożowych. Ponadto blok ten obejmował, stanowiące do pewnego stopnia podsumowanie powyższych zagadnień, kryterium efektywności pułapkowania, w tym, co najistotniejsze, możliwości ucieczki zatłoczonej substancji w kierunku pionowym jak również w kierunku poziomym, w którym wykorzystywano informacje na temat geometrii pułapki, możliwości migracji oraz jakości izolacji solankowych poziomów wodonośnych w oparciu o parametry hydrogeochemiczne solanki.

W trzecim bloku rozpatrywana była dostępność (lub możliwości budowy) infrastruktury przesyłowej i odbiorczej dla danej substancji, w tym obecność tras gazociągów w obrębie lub bezpośrednim sąsiedztwie struktury oraz czy zlokalizowane w obrębie struktury otwory możliwe byłyby do wykorzystania. Kolejne kryterium dotyczyło zagrożeń dla użytkowych poziomów wodonośnych, w tym możliwości migracji płynów złożowych do wód użytkowych (w oparciu o wcześniej analizowane zagadnienia dotyczące jakości uszczelnienia i pułapkowania), zaś konflikty interesów dotyczyły występowania w obrębie lub bezpośrednim sąsiedztwie struktury obszarów ochrony przyrody, obszarów górniczych kopalin, w tym wód termalnych, wód leczniczych i solanek, a także lokalizacji zakładów geotermalnych.

W wyniku przeprowadzonego rankingu, w oparciu o dostępne dane, wybrano trzy struktury w utworach jury (Wojszyce – stosunkowo nowe i bogate dane – oraz Konary i Budziszewice-Zaosie – dane archiwalne z ubiegłego wieku) i jedną w utworach kredy (Bielsk-Bodzanów – dane archiwalne z ubiegłego wieku). Jak wspomniano wyżej, charakterystyka i ranking struktur solankowych oparte były na dostępnych informacjach dotyczących poszczególnych kryteriów, przy czym należy zauważyć, że informacje te mogą nie zawsze być kompletne i wiarygodne.

11.5 Analiza danych hydrogeologicznych i hydrogeochemicznych na obszarach występowania struktur solankowych w Polsce centralnej (rozdział 5.4)

Prace te dotyczyły uszczegółowienia i aktualizacji wcześniejszych badań prowadzonych w ramach przedsięwzięcia „Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO_2 wraz z ich programem monitorowania" dla obszaru Polski centralnej, gdzie w szczególności doszły od czasu zakończenia tego przedsięwzięcia nowe dane (otwory) w rejonach lokalizacji struktur solankowych (tzn. na obszarach i bliższym lub dalszym sąsiedztwie struktur). Jednocześnie obszar ten obejmuje wytypowane w rozdziale 5.3 cztery struktury solankowe w utworach jury i kredy, a także pokrywa się z obszarem badań uszczelnienia kredowego z rozdziału 4. W ramach tych prac, w oparciu o wcześniejsze opracowania, dostępne publikacje, dokumentacje otworowe i bazy danych PIG-PIB, analizowano warunki hydrogeologiczne w nadkładzie potencjalnego kompleksu magazynowania/składowania (w tym występowanie użytkowych wód podziemnych i ewentualne zagrożenia związane z ascenzją wód słonych), parametry hydrogeochemiczne kolektorów – poziomów wodonośnych solankowych (w tym do oceny na ile może dochodzić do wymiany płynów pomiędzy tymi kolektorami, a wyżej występującymi aquiferami) oraz rozkłady mineralizacji i ciśnień piezometrycznych zależnie od głębokości występowania wód i zbiornika.

W analizach warunków hydrogeologicznych scharakteryzowano poszczególne piętra wodonośne występujące na rozpatrywanym obszarze (od czwartorzędu, po dewon, naturalnie nie we wszystkich piętrach występują wody użytkowe). Jeśli chodzi o wody użytkowe to scharakteryzowano Jednolite Części Wód Podziemnych, czyli zasadniczo użytkowane wody pitne i Główne Zbiorniki Wód Podziemnych, czyli strategiczne rezerwy wód użytkowych. Scharakteryzowano przy tym możliwe zagrożenia, tzn., gdzie z uwagi na warunki geologiczne może dojść do ascenzji wód słonych (solanek, wód słonawych) do użytkowego poziomu wodonośnego. Nadkład rozpatrywanych struktur solankowych w obrębie utworów mezozoiku może obejmować piętra wodonośne, gdzie obecne są wody użytkowe od czwartorzędu do jury. Biorąc pod uwagę wszystkie te informacje wstępnie stwierdzono, że szczelność nieprzepuszczalnych warstw izolujących, zalegających nad wytypowanymi (czterema) strukturami wodonośnymi przeznaczonymi do podziemnego składowania dwutlenku węgla prawdopodobnie jest wystarczająca, by zapewnić warunki sprzyjające magazynowaniu/składowaniu rozpatrywanych substancji i ograniczyć wystąpienie ubytków magazynowanej/składowanej substancji, co jednocześnie mogłyby stanowić zagrożenie dla wyżej ległych poziomów wodonośnych stanowiących użytkowe piętra wodonośne (choć nie jest to takie pewne w przypadku uszczelnienia zbiornika dolnokredowego). Należy zwrócić uwagę na fakt, że w większości przypadków warunki do magazynowania substancji są uzależnione od głębokości występowania poziomów i wymagają dalszych, szczegółowych badań w celu rozpoznania właściwości kolektora.

Charakterystykę hydrogeochemiczną kolektorów (solankowych poziomów wodonośnych) opracowano dla kompleksów skał obejmujących poziomy stratygraficzne mezozoiku: perm, trias górny, środkowy i dolny, jurę górną, środkową i dolną oraz kredę górną i dolną. Zestawiono lokalizację otworów, z których były dostępne dane na mapach omawianych kompleksów, analizowano ich lokalizację względem struktur solnych i wysadów solnych, na ogół silnie zaburzonych tektonicznie, oraz zmiany ciśnień złożowych i mineralizacji wód pomiędzy sąsiednimi poziomami. Scharakteryzowano poszczególne kolektory pod względem składu chemicznego (jonów) i mineralizacji, wykonano uproszczone modelowanie analiz chemicznych wód za pomocą programu Wateval oraz obliczono wybrane wskaźniki hydrochemiczne. Dokonano przy tym wstępnej interpretacji tych danych pod względem możliwości kontaktu danego solankowego poziomu wodonośnego z wodami infiltracyjnymi. Następnie, na podstawie stopnia przeobrażenia składu chemicznego wód, wskaźników hydrochemicznych i wielkości stężenia solanek określono genetyczne typy wód obrazujące różne warunki do magazynowania. Wydzielono 6 typów genetycznych wód ze względu na stopień metamorfizmu wód i izolacji kolektora. Typy 1 i 2 to wody strefy aktywnej wymiany (niekorzystne warunki do magazynowania), typy 3 i 4 to wody zmetamorfizowane, ale w kontakcie z wodami infiltracyjnymi w przeszłości co stwarza słabo lub średnio korzystne warunki do magazynowania, a typy 5 i 6 to wody reliktowe, z bardzo szczelnych kolektorów o bardzo korzystnych warunkach do magazynowania. Wyniki analiz wskazują, że w badanym rejonie wody o charakterze infiltracyjnym osiągają lokalnie głębokość występowania 2000 m, zaś solanki świadczące o szczelności kolektorów mogą występować już na głębokości 700 m, ale korzystne warunki występują najczęściej na głębokości ponad 1500 m. W wytypowanych czterech strukturach, typy genetyczne wód wskazują, zależnie od kolektora, najczęściej magazynowanie warunkowe, po szczegółowym rozpoznaniu kolektora. W przypadku struktury Budziszewice-Zaosie magazynowanie/składowanie substancji jest najprawdopodobniej możliwe w kolektorach jury dolnej poniżej formacji ciechocińskiej, w strukturze Konary być może już w kolektorze dolnego aalenu – górnego toarku (J2/J1 – otwór Konary IG-1), w strukturze Wojszyce najprawdopodobniej w kolektorach jury dolnej poniżej formacji ciechocińskiej (otwór Kaszewy 1), natomiast w strukturze Bielsk-Bodzanów magazynowanie/składowanie substancji jest najprawdopodobniej możliwe jedynie w rejonie kulminacji Bielska (otwór Bielsk 1). Taka ocena szczelności kolektorów opiera się wyłącznie na pozyskanych analizach fizyko-chemicznych wód i może być tylko wskazówką, wstępną sugestią co do warunków magazynowania ww. substancji w rozpatrywanych strukturach.

11.6 Reprocessing danych sejsmicznych dla trzech struktur solankowych rozpoznanych sejsmiką z ubiegłego wieku (rozdział 6)

Wykonano, w ramach prac kooperacyjnych, zaawansowany reprocessing archiwalnych profili sejsmicznych 2D, usytuowanych na obszarze struktur Budziszewice-Zaosie, Bielsk-Bodzanów (kulminacja Bielska) i Konary. Były to profile o niedostatecznej jakości obrazu sejsmicznego, wytypowane do reprocessingu celem lepszego rozpoznania rozpatrywanych struktur (po 4 dla każdej ze struktur, razem 12 profili, w tym 2 połączone). Prace kooperacyjne były na bieżąco nadzorowane i odbieranie po zakończeniu każdego z etapów (każdy etap dotyczył jednej struktury). W rozdziale 6 niniejszego sprawozdania szczegółowo scharakteryzowano i przeanalizowano ich wyniki.

W przypadku profili sejsmicznych w rejonie struktury Budziszewice-Zaosie cechą charakterystyczną reprocessowanych danych 2D w jest ich duża nieregularność, niska krotność profilowania, a także znaczące odległości pomiędzy punktami odbioru i wzbudzania.

Dane z profili wykonanych w rejonie struktury Bielsk-Bodzanów (konkretnie kulminacji Bielska) charakteryzują się też niską krotnością profilowania, wynikającą z ubogich parametrów sejsmicznych. Jakość i energia fal refleksyjnych, reprezentujących się na rekordach, jest dobra. Poziom zakłóceń jest na dosyć niskim poziomie.

Analogicznie cechą charakterystyczną reprocessowanych danych sejsmicznych 2D w rejonie struktury Konary jest niska krotność profilowania. Natomiast jakość i energia fal refleksyjnych widocznych na rekordach jest zróżnicowana, od zadowalającej po bardzo niską, a poziom zakłóceń jest bardzo wysoki.

W przypadku struktur Budziszewice-Zaosie i Bielsk-Bodzanów (kulminacja Bielska) niezbędna była weryfikacja lub zbudowanie bazy geometrii danych sejsmicznych. Dla danych ze struktury Bielsk-Bodzanów (kulminacja Bielska) ważnym elementem przetwarzania było tłumienie fal krotnych, zarówno krótko jak i długookresowych. W przypadku profili w rejonie struktury Konary istotnym elementem przetwarzania było tłumienie zakłóceń koherentnych, które wymagało dwukrotnego użycia dedykowanych procedur przed i po dekonwolucji. Dodatkowo, procedura interpolacji została tak zdefiniowana, aby eliminować te elementy danych, które były związane z falą powierzchniową.

Brak bliskich offsetów praktycznie na wszystkich profilach z trzech rozpatrywanych struktur implikował wiele problemów, związanych między innymi z wyborem optymalnego okna czasowego dla potrzeb obliczeń rezydualnych poprawek statycznych, stąd właściwe odwzorowanie strefy płytkiej było utrudnione. Z kolei w przypadku struktury Konary zakres dalekich offsetów jest ograniczony, co sprawia, że odwzorowanie warstw głębszych, szczególnie dla nachylonych horyzontów, jest dyskusyjne.

Pomimo wszystkich tych problemów uzyskany w wyniku reprocessingu obraz pokazuje wyraźną poprawę jakości wszystkich profili sejsmicznych w stosunku do danych archiwalnych, szczególnie w płytszych częściach sekcji.

11.7 Interpretacja geologiczno-geofizyczna struktur solankowych (rozdział 7)

Do interpretacji geologiczno-geofizycznej pod kątem oceny przydatności jako potencjalnych magazynów/składowisk substancji wybrano trzy struktury w utworach jury (Wojszyce, dla której dostępne były stosunkowo nowe i bogate dane, oraz Konary i Budziszewice-Zaosie – dane archiwalne z ubiegłego wieku) i jedną w utworach kredy (Bielsk-Bodzanów – dane archiwalne z ubiegłego wieku).

Interpretacja danych sejsmicznych dla struktur Budziszewice-Zaosie, Konary i Bielsk-Bodzanów

Dla struktur Budziszewice-Zaosie, Konary i Bielsk-Bodzanów dokonano interpretacji zreprocesowanych w rozdziale 6 profili (po 4 dla każdej ze struktur, razem 12 profili, w tym 2 połączone na strukturze Budziszewice-Zaosie) oraz reinterpretacji danych sejsmicznych opracowanych wcześniej w ramach innych przedsięwzięć PIG-PIB/PSG (w tym przedsięwzięcia

„Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO_2 wraz z ich programem monitorowania") celem wykonania korelacji na profilach i map dla kluczowych horyzontów zbiornikowych i uszczelniających dla poszczególnych struktur (rozdział 7.1). Jeśli chodzi o zreprocesowane profile to pomimo znaczącej poprawy jakości obrazu sejsmicznego nie w każdym przypadku wyniki były satysfakcjonujące. W zestawieniu z innymi dostępnymi archiwalnymi danymi sejsmicznymi z wybranych obszarów, umożliwiły jednak przeprowadzenie interpretacji strukturalnej. Interpretowane horyzonty sejsmiczne wybrano na podstawie wydzieleń otrzymanych głównie z analizy litofacjalnej w otworach pod kątem możliwości magazynowania/składowania substancji.

Do interpretacji struktury Budziszewice-Zaosie wykorzystano informacje z 6 otworów wiertniczych zlokalizowanych w obrębie struktury, dla których dostępne były również wyniki pomiarów prędkości średnich. Z tego dla jednego otworu wykonano dowiązanie danych sejsmicznych z wykorzystaniem sejsmogramu syntetycznego. Korelację wykonano dla 5 horyzontów sejsmicznych wyznaczających strop: triasu, synemuru – kolektora, pliensbachu dolnego – kolektora, aalenu dolnego – kolektora, bajosu górnego – uszczelnienia. Największą trudność napotkano przy interpretacji najpłytszego horyzontu, tj. bajosu górnego – uszczelnienia, ze względu na brak zapisu falowego, co uniemożliwia jednoznaczną ocenę zamknięcia struktury na NW. Natomiast w szczycie struktury zapis sejsmiczny ma generalnie obniżoną jakość. Dostępne profile i informacje z otworów wiertniczych pozwoliły jednak zobrazować strukturę Budziszewice-Zaosie, która jest antykliną powstałą nad poduszką solną utworów permu. W obrębie interpretowanych horyzontów nie stwierdzono widocznych uskoków. Układ refleksów w kierunku SW-NE wskazuje wyraźnie, że skrzydła antykliny zapadają w obu kierunkach tworząc zamknięcie potencjalnych kolektorów. W rejonie otworu Buków 1 i dalej na SW od osi struktury widoczne jest znaczne zmniejszenie miąższości warstw i wyklinowywanie się niektórych horyzontów sejsmicznych. Szczyt struktury wydaje się jednak stosunkowo miąższy. Na podstawie interpretacji horyzontów sejsmicznych wyliczono mapy czasowe powierzchni odpowiadających stropowi potencjalnego: kolektora aalenu dolnego, kolektora pliensbachu górnego, kolektora synemuru. Mapy obliczone dla wybranych interpretowanych horyzontów pokazują, że struktura ma wyraźnie wydłużony kształt, o rozciągłości NW-SE. Zagęszczenie izolinii oraz wzrost czasu w kierunku od osi struktury wskazują, że kolektory powinny mieć zamknięcie od strony SE. Wyniki ekstrapolacji i trend horyzontów od strony NW, gdzie pełna interpretacja nie była możliwa (słaba jakość danych i brak obrazu falowego), wykazują, że tu również powinno być zamknięcie, ale prawdopodobnie bardzo łagodne. Kulminacja struktury widoczna na wszystkich ww. mapach znajduje się w pobliżu otworów wiertniczych Zaosie.

Na obszarze struktury Konary zlokalizowane są jedynie dwa głębokie otwory (Konary IG-1 i Byczyna 1), dla których wykonano pomiary geofizyczne. W celach pomocniczych wykorzystano również informacje z jednego płytszego otworu zlokalizowanego w jej obrębie. Na jednym z reprocesowanych profili sejsmicznych jakość obrazu nie jest satysfakcjonująca i uniemożliwia korelację horyzontów sejsmicznych – zapewne jest to spowodowane błędami w akwizycji oraz prawdopodobnie występowaniem pokładów węgla brunatnego w nadkładzie na północnym skraju struktury. Interpretację strukturalną wykonano dla horyzontów sejsmicznych odpowiadających stropowi pliensbachu górnego – kolektora, toarku dolnego – uszczelnienia, aalenu górnego – uszczelnienia. Dodatkowo skorelowano strop utworów oxfordu, jury górnej oraz walnej powierzchni niezgodności laramijskiej powstałej po wyniesieniu bruzdy śródpolskiej. Przeprowadzona interpretacja strukturalna pokazała, że w przekroju poprzecznym kształt antykliny jest asymetryczny. Horyzonty SW skrzydła

struktury są bardziej strome, a miąższość warstw się zmniejsza. Największą zmianę miąższości wykazuje kolektor aalenu górnego. Korelacja horyzontów w bardziej połogim skrzydle NE wskazuje na wyraźny wzrost miąższości lub w przypadku aalenu górnego jedynie niewielkie zmiany. Horyzonty sejsmiczne wyznaczone w części SE struktury wyraźnie zapadają w przeciwieństwie do części NW, gdzie zwiększenie głębokości ma bardzo łagodny charakter. Obserwuje się brak wyraźnej ciągłości refleksów w szczytowej części struktury, co dodatkowo utrudnia ocenę jak duże mogą być wyznaczone kolektory przy tak łagodnym zapadaniu horyzontów i czy posiadają odpowiednie zamknięcie. Zakładając, że warstwy w przybliżeniu układają się współkształtnie do poduszki solnej, nad którą powstała antyklina, takie zamknięcie powinno być. Potwierdzenie jednoznacznego i pewnego zamknięcia poziomów kolektorskich zwłaszcza od strony NW wymaga dalszych badań i analizy, w tym oceny oddziaływania pobliskiego wysadu solnego Góra. Na podstawie zinterpretowanych horyzontów sejsmicznych wykonano mapy czasowe powierzchni sejsmicznych stropu: aalenu górnego – uszczelnienie, toarku dolnego – uszczelnienie, pliensbachu górnego – kolektor.

W przypadku struktury Bielsk-Bodzanów skupiono się na kulminacji Bielska, gdzie interpretację oparto na dwóch odwierconych tam otworach (Bielsk 1 i 2), wspomagano się również informacjami z otworu Bodzanów IG-1 położonego dalej na SE od tej kulminacji, poza rowem, w którym zlokalizowana jest ta struktura. Analizowana struktura jest oparta na uskokach zakotwiczonych w utworach permskich. Jak sugeruje układ interpretowanych warstw, m.in. większa miąższość warstw w obrębie rowu niż poza nim, główne uskoki były odmładzane i przynajmniej w ostatniej fazie powstawania, tj. na początku dolnej kredy, synsedymentacyjne. Struktura była następnie wyniesiona w czasie inwersji bruzdy śródpolskiej, która ukształtowała jej antyklinalny charakter. Interpretacja profili podłużnych jest obarczona bardzo dużą niejednoznacznością, gdyż uskoki biegnące wzdłuż profili bardzo często przecinają obraz sejsmiczny. W obrębie rowu można wyróżnić liczne mniejsze uskoki towarzyszące. Prawdopodobnie otwór Bielsk 1 przewierca jeden z nich co dodatkowo utrudnia dowiązanie sejsmiki do otworu i identyfikację horyzontów, zaś różnice w stratygrafii sugerują, że również pomiędzy otworami Bielsk 1 i 2 może być dyslokacja. Interpretację strukturalną wykonano dla horyzontów sejsmicznych odpowiadających stropowi pliensbachu górnego – kolektora, aalenu dolnego i toarku górnego – kolektora, bajosu dolnego i aalenu górnego – uszczelnienia, bajosu górnego – uszczelnienia oraz stropu formacji mogileńskiej – kolektora. Dodatkowo skorelowano strop oxfordu i jury górnej. Jak wykazała interpretacja w obrębie utworów jury poza znaczną głębokością występowania, poziomy uszczelniające i kolektory są silnie zuskokowane i chociaż zrzuty nie muszą być duże mogło nastąpić przerwanie ciągłości warstw. Jedynie horyzont wyznaczający strop formacji mogileńskiej nie wykazuje przerwania przez deformacje nieciągłe. Nie obserwuje się też takich deformacji w nadkładzie uszczelniającym tej formacji (kompleks węglanowo-krzemionkowy), nie udało się też skorelować horyzontów sejsmicznych w obrębie tego kompleksu. Interpolacja powierzchni stropu formacji mogileńskiej przedstawia strukturę, której kulminacja układa się w kształt litery „L". Identyfikacja kształtu struktury w obrębie kredy wymaga lepszego rozpoznania pod kątem zamknięcia zwłaszcza od NE strony wyniesienia.

Archiwalne mapy strukturalne i zagospodarowanie terenu

Równolegle z pozyskiwaniem i interpretacją danych sejsmicznych przeanalizowano regionalne mapy geologiczne pod kątem występowania stref nieciągłości tektonicznych (rozdział 7.2). Analizy rozpoczęto od „Atlasu paleogeograficznego epikontynentalnego permu i mezozoiku w Polsce"

(Dadlez i in., 1998). Generalnie można stwierdzić, że struktury jurajskie Budziszewice-Zaosie, Konary i Wojszyce występują na poduszkach soli cechsztyńskich, co nie ma miejsca w przypadku struktury kredowej (z niżej ległymi poziomami jurajskimi) Bielsk-Bodzanów, choć w głębokim podłożu tej struktury występują utwory cechsztynu. W stropie utworów cechsztynu na obszarze polskiej części basenu permskiego obserwuje się generalnie dość skomplikowaną tektonikę, z tym, że ma to miejsce w mniejszym stopniu w rejonach czterech rozpatrywanych struktur, a z tego „najspokojniej" jest w rejonie struktury Wojszyce. W utworach mezozoiku zidentyfikowano w Atlasie uskoki w brzeżnych częściach struktur Konary, Wojszyce i Bielsk-Bodzanów. Interpretacja sejsmiki prowadzona w ramach niniejszego zadania (rozdziały 7.1, 7.5) generalnie potwierdza zidentyfikowane w Atlasie nieciągłości w rejonie struktury Bielsk-Bodzanów, w przeciwieństwie do struktur Konary i Wojszyce, gdzie wspomniane uskoki najprawdopodobniej występują w podłożu kompleksów jurajskich.

Jeśli chodzi o mapy o większym stopniu szczegółowości, tzn. wykonane w ramach dokumentacji sejsmicznych to można generalnie stwierdzić, że w przypadku struktur solankowych rzadko wykonywano mapy horyzontów w obrębie interesujących nas kompleksów geologicznych, tzn. utworów kredy i jury. Poniżej scharakteryzowano najistotniejsze wyniki wybranych dokumentacji dotyczące identyfikacji stref nieciągłości tektonicznych i korelacji horyzontów mezozoicznych wykorzystane przy kompleksowej interpretacji geologiczno-geofizycznej struktur Budziszewice-Zaosie, Konary i Bielsk-Bodzanów (interpretację struktury Wojszyce oparto zasadniczo na materiałach wytworzonych w ramach projektu demo CCS PGE Bełchatów; rozdziały 7.5 i 7.6).

Na wykonanej w ramach tematu AMOCO Polska Centralna Blok-A (Łobaziewicz, 1997) mapie spągu jury na obszarze struktury Budziszewice-Zaosie zaznacza się uskok w rejonie otworu Buków 1 i dalej poza strukturą na południe od otworu Buków 2. Według interpretacji danych sejsmicznych prowadzonej dla tej struktury w rozdziale 7.1.1, uskok ten nie zaznacza się w utworach jury.

W rejonie struktury Konary w ramach tematu sejsmicznego Włocławek - Płock (Jurek i in., 1980) prześledzono jedynie na profilach sejsmicznych dwa horyzonty jurajskie – strop jury środkowej i strop jury górnej, jednakże korelacje te są widoczne jedynie fragmentarycznie na poszczególnych profilach, a obraz sejsmiczny jest mało czytelny (nie wykonano map tych horyzontów).

W rejonie struktury Bielsk-Bodzanów (zasadniczo w rejonie kulminacji Bielska, czyli NW części struktury) ramach tematu sejsmicznego Rypin-Wyszogród (Marosz i Tomaszewska, 1993) wykonano, jeśli chodzi o interesujące nas formacje geologiczne (kreda-jura) jedynie mapę stropu kredy dolnej czyli stropu kolektora – piaskowcowej formacji mogileńskiej, w wersji czasowej i głębokościowej. Na mapie nie stwierdzono żadnych uskoków w stropie kredy dolnej, co potwierdza w tym zakresie wyniki interpretacji danych sejsmicznych wykonanej dla tej struktury w rozdziale 7.1.3.

Jeśli chodzi zagospodarowanie terenu, to w obrębie obszaru Polski centralnej obejmującego analizowane struktury znajduje się szereg obszarów zurbanizowanych, lecz na obszarach rozpatrywanych 4 struktur nie występują większe skupiska osadnicze, za to występują rozmaite obszary ochrony przyrody, ale brak jest szczególnie chronionych obszarów parków narodowych, zaś obszary NATURA 2000 obejmują jedynie fragment struktury Wojszyce. Informacje te zostały wykorzystane w rozdziale 8 do przedstawienia propozycji wytycznych dla projektów robót geologicznych na przykładzie omawianych 4 struktur (rozdział 7.2).

Mapy grawimetryczne i ich interpretacja geologiczna

Pozyskano z NAG/CBDG dostępne dane grawimetryczne (rozdział 7.3) w formie katalogów anomalii siły ciężkości w redukcji Bouguera dla gęstości redukcji wynoszącej 2,25 g/cm^3. Dane te najczęściej pochodziły z lat 1960-tych lub 1970-tych i charakteryzowały się stosunkowo niskim zagęszczeniem punktów grawimetrycznych (rzędu 2 pkt/km^2). Wyjątki stanowiły tu pomiary grawimetryczne na potrzeby rozpoznania wysadów solnych i złóż węgla brunatnego, prac badawczych i geotermii oraz szczegółowe (10-12 pkt/km^2) zdjęcie dla struktury Wojszyc wykonane w ramach projektu demo CCS PGE Bełchatów w roku 2010.

Katalogi te, po scaleniu danych pochodzących z tematów grawimetrycznych dla obszarów poszczególnych struktur, posłużyły do sporządzenia gridów anomalii siły ciężkości w redukcji Bouguera, a te następnie zostały poddane transformacjom (rozdział 7.3). Anomalia siły ciężkości w redukcji Bouguera jest superpozycją przyczynków od różniących się gęstością ciał zaburzających w obrębie ośrodka geologicznego, zarówno płytkich, jak i głębokich i bardzo głębokich (Fajklewicz, 2007), czyli jej źródłem jest rozkład gęstości ośrodka geologicznego. Natomiast zadaniem dla grawimetrii w ramach niniejszego przedsięwzięcia była identyfikacja stref nieciągłości tektonicznych w obrębie górotworu, w praktyce w przedziale głębokości odpowiadającym występowaniu rozpatrywanych dla poszczególnych struktur kompleksów magazynowania/składowania oraz ich bezpośredniego nadkładu (czy też dodatkowych uszczelnień). Przyjęto do tego celu orientacyjnie przedział głębokości od około 0,5 km do 2 km. Istnieje szereg metod wydzielania z anomalii siły ciężkości przyczynków pochodzących od płytko (anomalie rezydualne) lub głęboko (anomalie regionalne) występujących ciał zaburzających. Jedną z takich metod jest filtracja częstotliwościowa z wykorzystaniem transformaty Fouriera (Fajklewicz, 2007), w wariancie filtracji pasmowej, czyli pozostawiającej przyczynki od ciał zaburzających w określonym (z dużym przybliżeniem) przedziale głębokości. Poddano gridy anomalii siły ciężkości w redukcji Bouguera (sporządzone dla obszarów wszystkich czterech struktur) tej transformacji, wykorzystując oprogramowanie GEOSOFT, otrzymując anomalie rezydualne odpowiadające (hipotetycznie) przedziałowi głębokości 0,5-2 km. Z kolei, aby wyznaczyć strefy nieciągłości tektonicznych zastosowano kolejną transformację – wyliczono (oprogramowanie GEOSOFT) ze wspomnianych anomalii rezydualnych gradient poziomy. Gradient poziomy jest miarą zmienności rozkładu gęstości ośrodka geologicznego w poziomie (Fajklewicz, 2007), zaś jego wartości maksymalne mogą być związane z występowaniem kontaktów gęstości, uskoków, wyklinowań warstw oraz zmian facji, z którymi wiążą się zmiany gęstości ośrodka geologicznego. Stąd dla obszarów poszczególnych struktur analizowano strefy, gdzie wyraźnie zaznaczają się osie i maksima rozkładów gradientu poziomego z anomalii rezydualnych.

Na obszarze struktury Budziszewice-Zaosie zaznaczają się takie strefy w rejonie otworów Buków 1 i Buków 2, na SW skłonie struktury i na WSW od struktury. Jednakże nie znajdują one potwierdzenia w interpretacji danych sejsmicznych dla kompleksu składowania w obrębie utworów jury (rozdział 7.1.1), natomiast w dokumentacji archiwalnej (Łobaziewicz, 1997) postuluje się tam występowanie uskoków w spągu jury, a więc poniżej rozpatrywanego kompleksu składowania.

Na zachodnim skłonie struktury Konary widoczna jest stosunkowo słabo zaznaczająca się (nieco silniej na NW) strefa maksimum gradientu poziomego, zaś przy zachodnim krańcu struktury kolejna taka strefa, nieco bardziej wyrazista. Strefy te, najprawdopodobniej związane z dolnymi partiami

sekwencji utworów jury, nie zostały jednoznacznie stwierdzone jako uskoki w interpretacji danych sejsmicznych dla kompleksu składowania w obrębie utworów jury (rozdział 7.1.2), natomiast strefa na zachodnim skłonie struktury jest postulowana w archiwalnej interpretacji podanej w monografii Tarkowski (red., 2010). Natomiast bardzo silne anomalie zaznaczają się na WSW od struktury, w rejonie głęboko występującego wysadu solnego Gopło (strop soli na głębokości 2412 m wg Tarkowski i Czapowski, 2018), być może związane są one z tektoniką w obrębie nadkładu mezozoicznego w rejonie wysadu.

W obrębie struktury Wojszyce widoczna jest strefa maksimum gradientu poziomego na SW od otworu Kaszewy 1 (przebiegając w kierunku z NW na SE), oraz równoległa strefa na wschód od tego otworu, na NE skłonie struktury. Mogą to być strefy uskokowe lub zmiany facjalne w obrębie najniższych partii sekwencji utworów jury lub górnego triasu skutkujące kontrastem gęstości. Na południe od struktury zaznacza się bardzo wyraźnie przebijający utwory mezozoiku wysad solny Rogóźno, gdzie serię solną nawiercono na głębokości 321-427 m p.p.t., a czapę wysadu na głębokości 55-329 m p.p.t. (Czapowski i Tarkowski, 2018). Strefy maksimów gradientu poziomego w obrębie struktury Wojszyce najprawdopodobniej związane są z głębszymi partiami sekwencji utworów jury (lub najwyższego triasu) gdyż nie zaznaczają się tak ostro i mają mniejszą amplitudę niż te w rejonie wysadu solnego Rogóźno.

Na obszarze struktury Bielsk-Bodzanów brak jest wyraźnych maksimów gradientu poziomego, które mogłyby być związane z występowaniem kontaktów gęstości, uskoków, wyklinowań warstw oraz zmian facji, z którymi wiążą się zmiany gęstości ośrodka geologicznego. Oznaczałoby to albo brak takich elementów strukturalnych w utworach kredy i najwyższej jury albo brak znaczących horyzontalnych zmian rozkładu gęstości w obrębie tych kompleksów. Interpretacja sejsmiki przedstawiona w rozdziale 7.1.3 sugeruje generalnie brak uskoków ponad spągiem kredy, co po części potwierdzałoby wyniki grawimetrii.

Ewolucja tektoniczna strefy Pabianic

Połączenie wyników analizy struktur tektonicznych z danych otworowych i interpretacji sejsmiki pozwoliło na odtworzenie ewolucji strukturalnej badanego kompleksu. Wyniki tej analizy (rozdział 7.4) posłużyły (między innymi), z kolei, do wersyfikacji interpretacji strukturalnych kompleksu kredowego w strefie Poddębice-Strzelno, przedstawionych w rozdziale 4.3., są ponadto istotne dla oceny możliwości magazynowania/składowania substancji w obrębie wytypowanych w rozdziale 5 i analizowanych w rozdziale 7 struktur solankowych w utworach jury.

Głównym elementem strukturalnym w strefie Pabianic jest asymetryczny rów tektoniczny, od NE ograniczony przez główny uskok (GSU) o biegu NW-SE, a od strony SW, ten w istocie półrów ograniczony jest przez mniejszą strefę uskoku antytetycznego. Z interpretacji strukturalnej profilu wynika, że struktura rowu została zainicjowana w T3 i była aktywna jeszcze w J1. Kompleksy J2, J3 oraz K ponad rowem są nieco wyniesione względem otoczenia. Struktura rowu jest podobna do inicjującego wysad Kłodawy (lecz bez wysadu), zaś strefa tektoniczna rowu Pabianic kontynuuje się ku NW, gdzie jest ona ugięta sigmoidalnie i trafia w wysad Kłodawy. Jest to zatem jedna z głównych stref tektonicznych basenu polskiego. W profilu otworu Pabianice-1 wyodrębniono główną strefę uskokową (GSU) wygasającą w stropowej części J1, zaś powyżej, na odcinku profilu sejsmicznego ponad rowem, antyklinalne ugięcie kompleksu J2-K2 o genezie związanej z inwersją laramijską.

Dane otworowe wskazują, że większość struktur ekstensyjnych znajduje się w skrzydle spągowym GSU, która podczas formowania rowu tektonicznego w okresie od T3 do J1 była najprawdopodobniej uskokiem normalnym lub transtensyjnym. Obecność żył kwarcowych wiąże się z rozpuszczaniem kwarcu i jego precypitacją, co z kolei było przyczyną lityfikacji piaskowców i powstania w nich struktur kruchych, najprawdopodobniej w kredzie (reaktywacja GSU). Na starsze struktury ekstensyjne nakładają się struktury kompresyjne. Współczesna aktywność GSU sugeruje jednak, że możliwa była również reaktywacja tej strefy w neogenie. Jednakże szczelność potencjalnych kolektorów J1 pod przykryciem uszczelnień J1 w strefie Pabianic nie ulega wątpliwości.

Jak wskazuje orientacja struktur breakouts (BB), w obrębie skrzydeł tego uskoku kierunki największego współczesnego naprężenia poziomego (S_{Hmax}) są odmienne – NNW-SSE w skrzydle stropowym i NW-SE w skrzydle spągowym, czyli w kierunku zgodnym z przebiegiem GSU.

Przesuwcza aktywność uskoku Pabianic-Kłodawy sugeruje, że również uskoki strefy Poddębic o podobnym biegu - NW-SE, mogą być współcześnie reaktywowane. To może mieć znaczenie dla szczelności antykliny Poddębic analizowanej w rozdziale 4.3 oraz innych struktur mezozoicznych zlokalizowanych na tym kierunku strukturalnym.

Analiza strukturalna i geomechaniczna otworu Kaszewy-1 pod kątem przydatności antykliny Wojszyc do składowania CO_2 (ew. magazynowania innych substancji)

Badania tektoniczne (rozdział 7.5) zostały przeprowadzone w celu: (1) dopełnienia interpretacji karotaży wiertniczych (otwór Kaszewy 1) poprzez wskazanie charakteru geofizycznie rejestrowanych struktur; (2) wykorzystania ewolucji strukturalnej dla weryfikacji koncepcji budowy struktury Wojszyc; (3) wskazania struktur tektonicznych mogących stanowić dodatkową przestrzeń szczelinową w obrębie kolektora oraz (4) wskazania czy nie stanowią zagrożenia dla rozerwania ciągłości uszczelnień.

Wykonano profilowanie strukturalne na rdzeniu z otworu Kaszewy-1, który został pobrany z głębokości 1074,2-2050,4 m (jura dolna – najwyższy trias). Profilowanie rdzenia wiertniczego uzupełniono danymi geofizyki wiertniczej, w tym głównie skanera mikrooporności owego (XRMI) z interwału głębokości 1053 m do 2000 m. Wykorzystano wyniki profilowania całości rdzenia przeprowadzonego w 2010 r., które zweryfikowano dla wybranych odcinków (łącznie 135 m). Analiza kierunków współczesnych naprężeń została wykonana na podstawie rozpoznanych w obrazie XRMI struktur typu breakouts (BB) tworzących wgłębienia w ścianie otworu oraz pęknięć ekstensyjnych ściany otworu indukowanych ciśnieniem płuczki (DITF – Drilling Induced Tensile Fractures). Przeanalizowano również spękania tektoniczne otwierane ciśnieniem płuczki (DENF). Profilowanie wielkości współczesnych naprężeń wykonano na postawie danych z dipolowej sondy akustycznej, skalibrowanych danymi laboratoryjnymi. Do oceny wielkości naprężeń wykorzystano, obok ww. informacji z XRMI także archiwalne dane na temat parametrów mechanicznych oraz ciśnień porowych i otworowych.

Model geomechaniczny 1D, obejmujący kierunki i wielkości współczesnych naprężeń tektonicznych, wykonano na postawie dopasowywania uzyskanych wyników modelowanych struktur zniszczeniowych do tych widocznych w obrazie XRMI oraz do wielkości gradientów naprężeń uzyskanych w wyniku testów hydraulicznych (leak-off test). Porównano go z modelem archiwalnym wykonanym przez SLB w ramach projektu demo CCS PGE Bełchatów. Kierunek największego

naprężenia poziomego (SH_{max}) został wyznaczony na podstawie orientacji BB, które są prostopadłe do S_{Hmax} oraz DITF, które są równoległe do S_{Hmax} (kierunki zbieżne). Przedmiotem modelowań były długości struktur BB i DITF (pomierzone i obliczone), oraz dopasowanie S_{hmin} do wyników testów szczelinowania hydraulicznego. Wyniki sugerują współczesne doginanie jurajskiej antykliny Wojszyc w kierunku prostopadłym do jej osi.

W otworze Kaszewy 1 stwierdzono drobne uskoki normalne w stropie triasu, a poniżej, w stropie kajpru, strefę uskoku przesuwczego o charakterze kruchym. W otworze stwierdzono spękania o charakterze tensyjnym i ścięciowym bez przemieszczenia, a także spękania ze śladami przemieszczenia w postaci luster tektonicznych bez rys i z rysami ślizgowymi. W obrębie kolektorów J1 spękania mają najczęściej upady pomiędzy 55° - 70° i kierunki zapadania systematycznie ku SW. W sąsiedztwie interwałów z zagęszczeniem luster tektonicznych, w obrębie piaskowców występują również żyły strome z przewagą wypełnienia kwarcowego. Mineralizacja węglanowa zaznaczyła się zwłaszcza w piaskowcach i mułowcach pliensbachu, gdzie występują żyły i kawerny o największej aperturze i ze szczotami mineralizacji. Zagęszczenie spękań skorelowane jest z litologią. Jest ich mianowicie najwięcej w piaskowcach i niektórych mułowcach, a są nieliczne lub nie występują w łupkach ilastych. W przedziale głębokości 1070 – 1220 m (najniższy aalen – toark górny) spękania występują we wszystkich typach litologicznych, a najliczniej w mułowcach. W interwale 1220 – 1300 m (najniższy toark – przystropowa część pliensbachu), mimo obecności pakietów piaskowców spękania nie występują. Największe zagęszczenie spękań występuje w długim interwale 1300 – 1740 m (pliensbach – hettang górny), który w większości składa się z kilku do kilkunastu metrów przewarstwień piaskowców, mułowców i iłowców (w tym najbardziej w stropie tego interwału, tzn. w piaskowcach pliensbachu).

Struktura antyklinalna Wojszyc rozwijała się wieloetapowo, na krawędzi bruzdy śródpolskiej, będącej centrum subsydencji permo-mezozoicznego basenu polskiego. Pierwszy etap aktywności tektonicznej można wyróżnić w pstrym piaskowcu, w którym na SW od osi antykliny powstał uskok normalny o upadzie ku SW, który mógł być również aktywny podczas sedymentacji młodszych jednostek triasu, jeszcze przed powstaniem antykliny. Ten etap był jednoczesny z powstaniem uskoku inicjującego rozwój „rowu Krośniewic" (i wysadu Kłodawy). Powstanie antykliny Wojszyc nastąpiło podczas sedymentacji retyku (w efekcie kompresyjnego fałdowania). Po fazie erozji przegubu antykliny, sedymentacja została wznowiona jeszcze w najwyższym retyku. Podczas sedymentacji dolnej jury – do pliensbachu włącznie – wzrosła miąższość w obu skrzydłach antykliny. Po pliensbachu nastąpiło odtworzenie centrum subsydencji bruzdy śródpolskiej ze skłonem zbiornika pod SW skrzydłem antykliny Wojszyc. W osi antykliny na powierzchnię podkenozoiczną wychodzą wapienie oksfordu. Wapienie te wraz z całą antykliną wyniesione zostały na skutek inwersji basenu polskiego, w efekcie której granica wału śródpolskiego znalazła się w przegubie antykliny Wojszyc, a ograniczająca ją od NE synklina stanowi część niecki brzeżnej. Podczas tej fazy inwersji przegub antykliny Wojszyc został wyniesiony o co najmniej 1500 m względem synkliny od strony NE, co stanowi strome lateralne zamknięcie struktury zbiornikowej. Od strony SW zamknięcie struktury jest płytkie ze względu na większe podniesienie tego skrzydła antykliny niż jej przegubu w fazie inwersji basenu.

W obrazie sejsmicznym, w przegubie antykliny Wojszyc interpretowany jest uskok, powstały w pstrym piaskowcu, generalnie równoległy do osi struktury. Na sekcjach sejsmicznych widzimy, że uskok ten kontynuuje się w kierunku NW, gdzie jego zrzut jest coraz większy. Przedłużenie tego uskoku ku górze trafia w otwór Kaszewy-1 blisko stropu triasu. W przegubie antykliny gwałtownie

spada jakość obrazowania sejsmicznego, dlatego niemożliwe jest prześledzenie kontynuacji tego uskoku i uskoków potomnych w obrębie jury. Dotychczasowe analizy wskazują, że w obrębie struktury Wojszyc zachodzić może istotna lateralna anizotropia prędkości fali sejsmicznej (obniżenie w kierunku prostopadłym do osi struktury). Archiwalny model grawimetryczny pokazuje, że ponad przegubem antykliny w obrębie jury środkowej i górnej występuje strefa obniżonej gęstości (po SW stronie antykliny nieco wyższej z uwagi na wpływ kompakcji). Najprawdopodobniej przyczyną anomalii jest gęsty zespół otwartych spękań w obrębie J3 i J2. Analiza mapy rezydualnych anomalii grawimetrycznych sugeruje, że powierzchnia stropu jury górnej urzeźbiona jest w postaci, układających się w pasy wzdłuż osi antykliny, skałek twardego i gęstego wapienia skalistego, przykrytych osadami węgli brunatnych i iłów miocenu o wyjątkowo małej gęstości. O występowaniu tego rodzaju zjawisk krasowych świadczy trudny do opanowania zanik płuczki wiertniczej w tym interwale głębokościowym wraz z gwałtownie spadającą jakością obrazowania sejsmicznego. Stąd, aby w przyszłości osiągnąć dobrej jakości obrazowanie sejsmiczne należy wykluczyć tę strefę ze wzbudzania i rejestracji fali. Jest to istotne dla stwierdzenia czy przesuwcza strefa uskokowa w przegubie struktury, sięgająca stropu kajpru i propagująca się poprzez drobne uskoki normalne do stropu triasu, propaguje się także w obrębie jury (i czy ma także związek ze skałkami w stropie jury).

W obrębie struktury Wojszyce potencjalne główne kolektory znajdują się w obrębie J1, a uszczelnienia w obrębie J2 oraz najwyższej J1 (formacja ciechocińska). Z punktu widzenia bezpieczeństwa składowania/magazynowania substancji bardzo ważna jest integralność tych kompleksów uszczelniających. Jeśli chodzi o spękania penetratywne to według przeprowadzonych analiz nie powinny stanowić problemu w obrębie ilastych uszczelnień J2 i J1, nawet jeżeli tam występują, to powinny być mniej liczne i nie mieć ciągłości pionowej. Możliwe jest też, że ze względu na podwyższoną zawartość minerałów ilastych sprzyjających pełzaniu łupków, struktury kruche w ogóle się w uszczelnieniach nie wykształciły lub są w pełni zasklepione. Zatem pozostaje pytanie o możliwość rozszczelnienia uszczelnień jury przez uskoki. Możliwe jest, że w obrębie antykliny Wojszyc uskoki o znikomym zrzucie tną cały kompleks jurajski, lecz najprawdopodobniej nie są to uskoki aktywne, stanowiące drogi migracji dla płynów złożowych. Z kolei badania naprężeń w otworze Kaszewy-1 pokazały, że współczesne naprężenie tektoniczne S_{Hmax} w osi struktury Wojszyc ma taką samą orientację (NW-SE), co nie sprzyja reaktywacji przesuwczej uskoków o tym samym biegu, a wnioski z testów szczelinowania hydraulicznego sugerują, że reaktywacja uskoków normalnych jest raczej wykluczona. Natomiast możliwość występowania otwartych szczelin w obrębie kolektorów J1 może być korzystna, gdyż może podnosić wydajność zatłaczania do kolektora, zwłaszcza przy wykorzystaniu otworów krzywionych/poziomych. Najlepsze ku temu warunki występują w kolektorze pliensbachu górnego.

W celu bardziej szczegółowego rozpoznania struktury niezbędne jest odwiercenie otworu w szczycie struktury (kilka km na SE od otworu Kaszewy 1), do stropu pliensbachu. W otworze konieczne byłoby, poza wykonaniem karotaży standardowych, również wykonanie karotaży sondy akustycznej dipolowej i skanera XRMI, a w obrębie uszczelnień J2-J1 po strop kolektora pliensbachu – testów szczelinowania hydraulicznego. Badania te powinny być uzupełnione analizami laboratoryjnymi parametrów geomechanicznych i petrofizycznych na kilkunastu próbach skał. To pozwoli na pełną charakterystykę strukturalną, geomechaniczną i hydrauliczną uszczelnień. Powinno zostać wykonane zdjęcie 3D/3C, z analizą anizotropii w obrębie poszczególnych formacji litostratygraficznych, zaprojektowane tak aby ominąć „horyzont skałkowy” w obrębie wychodni wapieni oksfordu

powierzchni podkenozoicznej. Wyniki badań sejsmicznych należy zintegrować z modelami parametrycznymi oraz wynikami karotażu i testów złożowych.

Przekroje sejsmiczno-grawimetryczne przez strukturę Wojszyce

W ramach projektu demo CCS PGE Bełchatów wykonano na obszarze struktury sejsmikę wysokorozdzielczą 2D wzdłuż 8 profili sejsmicznych (rozdział 7.6) o łącznej długości 225 km (zdjęcie sejsmiczne Wojszyce 2D – Musiatowicz i Zubrzycka 2010), otwór badawczy Kaszewy 1 (Posyniak i Rosa, 2009), a także szczegółowe zdjęcie grawimetryczne o zagęszczeniu punktów pomiarowych 10-12 pkt/km2 (Ostrowski i in., 2010; rozdziały 7.3 i 7.5).

Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy brał udział w tym projekcie demo CCS, wspomagając PGE Bełchatów w komponencie składowania (co obejmowało m.in. opracowanie projektów robót geologicznych, nadzór na pracami polowymi, zagadnienia komunikacji i akceptacji społecznej oraz udział w opracowaniu i interpretacji wyników, tzn. przekrojów, map i modeli geologiczno-geofizycznych; Szynkaruk, 2011). Przy interpretacji zdjęcia sejsmicznego Wojszyce 2D wykorzystano ponadto wyniki interpretacji sejsmiki z wcześniej wykonanych prac w rejonie struktury oraz dane z otworu Kaszewy 1 i otworów archiwalnych zlokalizowanych w sąsiedztwie struktury Wykonane zostały korelacje kluczowych horyzontów sejsmicznych, dla których sporządzono następnie mapy czasowe i głębokościowe, wykorzystane do konstrukcji modeli 3D.

W ramach tych prac sformułowano następujące wnioski dla zdjęcia sejsmicznego Wojszyce 2D: (1) zasadniczym problemem interpretacyjnym była zróżnicowana jakość obrazu sejsmicznego; (2) ogólnie jakość danych sejsmicznych jest dobra (wysoka rozdzielczość pionowa, dobra ciągłość refleksów); (3) wyjątek stanowi strefa przegubowa badanej antykliny, gdzie obserwujemy znaczący spadek jakości obrazu sejsmicznego, szczególnie dla utworów górno- i środkowojurajskich; (4) w obrębie jury dolnej oraz triasu szerokość strefy charakteryzującej się słabą jakością obrazu sejsmicznego jest mniejsza (niż w J3 i J2), za wyjątkiem profilu podłużnego (PIG016310), który w całości charakteryzuje się bardzo słabą jakością danych; (5) wyinterpretowane uskoki mają rozciągłość NW-SE i deformują osady cechsztyńskie oraz górnotriasowe do stropu kajpru – brak jest wyraźnych przesłanek świadczących o kontynuacji uskoków w najwyższą partię triasu oraz jurę; (6) ze względu na niską jakość obrazu sejsmicznego w obrębie utworów jurajskich w przegubowej strefie antykliny Wojszyce nie można wykluczyć istnienia niewielkich uskoków normalnych; (7) zamknięcie struktury od strony SE ma niewielką amplitudę co w połączeniu z niską jakością danych sejsmicznych, szczególnie na mniejszych głębokościach (środkowa i górna jura), zwiększa ryzyko popełnienia błędu w interpretacji; (8) słaba jakość obrazu sejsmicznego w centralnej części struktury Wojszyce obniża pewność oraz jednoznaczność interpretacji w tej strefie.

Na wszystkich profilach sejsmicznych interpretowano horyzonty od stropu jury środkowej do spągu cechsztynu, przy czym z punktu widzenia niniejszego przedsięwzięcia najistotniejsze są: strop jury górnej (śledzona tylko na NE skrzydle struktury), strop jury środkowej (czyli spąg jury górnej), strop bajosu górnego – kolektor (cienki), strop aalenu dolnego – kolektor (aalen dolny i góny toark stanowią w zasadzie jeden kolektor), strop pliensbachu górnego – kolektor, oraz strop triasu górnego czyli spąg jury i ewentualnie T3-niezg. Ostatnia granica to niezgodność kątowa występująca poniżej stropu kajpru, która związana jest z zasadniczą fazą wzrostu cechsztyńskiej poduszki solnej znajdującej się w podłożu antykliny Wojszyce. Z tą fazą aktywności związany jest również rozwój strefy uskokowej, zlokalizowanej w kulminacji struktury Wojszyce, w sąsiedztwie otworu Kaszewy.

Brak jest wyraźnych przesłanek (w obrazie sejsmicznym) świadczących o kontynuacji tego uskoku w najwyższą partię triasu oraz jurę.

Przekroje sejsmiczne zestawiono na 4 profilach z krzywymi anomalii siły ciężkości w redukcji Bouguera oraz gradientem pionowym wyliczonym z anomalii Bouguera. Gradient pionowy jest miarą zmienności rozkładu gęstości w górotworze w kierunku pionowym (Fajklewicz, 2007). Strzałkami zaznaczono na krzywych gradientu pionowego strefy, gdzie najprawdopodobniej występują lokalne zmiany gęstości – zwiększenie lub zmniejszenie. Ponieważ szerokość tych anomalii jest generalnie dość mała, najprawdopodobniej związane są one z najpłycej występującymi utworami jury. Wydaje się to być zgodne z sugestią z rozdziału 7.5.7 na temat występowania, w szczególności na osi struktury, skomplikowanej rzeźby stropu jury górnej, tzn. krasowych ostańców wapiennych o wysokiej gęstości przedzielonych zagłębieniami wypełnionymi osadami węgli brunatnych i iłów miocenu o niskiej gęstości. Charakterystyczne jest przy tym występowanie ujemnej anomalii grawimetrycznej w redukcji Bouguera w kulminacji struktury, tzn. w przegubie antykliny. W rozdziale 7.5.7 postawiono hipotezę, że przyczyną tej anomalii mogą być gęste spękania w utworach jury górnej i środkowej.

Przekroje sejsmiczno-grawimetryczne przez struktury Budziszewice-Zaosie, Konary i Bielsk-Bodzanów

W rozdziale 7.7 dokonano kompleksowej interpretacji danych sejsmicznych i grawimetrycznych dla trzech struktur rozpoznanych archiwalnymi danymi sejsmicznymi z ubiegłego wieku (Budziszewice-Zaosie, Konary i Bielsk), dla których podano też krótką charakterystykę geologiczno-złożową. Zestawiono interpretację zreprocesowanych przekrojów sejsmicznych dla tych trzech struktur (po 4 profile dla każdej struktury, w tym dwa połączone w jeden w przypadku struktury Budziszewice-Zaosie) z krzywymi anomalii rezydualnych siły ciężkości i gradientu poziomego.

Jeśli chodzi o dane grawimetryczne to wykorzystano gridy anomalii rezydualnych opracowane w rozdziale 7.3 – anomalie rezydualne odnoszące się do szacunkowego przedziału głębokości występowania rozpatrywanych dla poszczególnych struktur kompleksów magazynowania/składowania oraz ich bezpośredniego nadkładu (czy też dodatkowych uszczelnień), czyli orientacyjnie 0,5-2 km oraz gridy obliczonego z tych anomalii gradientu poziomego. Na poszczególnych profilach zaznaczono maksima gradientu, które mogą być związane z występowaniem kontaktów gęstości, uskoków, wyklinowań warstw oraz zmian facji, z którymi wiążą się zmiany gęstości ośrodka geologicznego. W przypadku struktur jurajskich Budziszewice-Zaosie i Konary charakterystyczne są występujące w obrazie anomalii rezydualnych anomalie ujemne w przegubach struktur, korelujące się ze strefami o gorszej jakości obrazu sejsmicznego, zaś maksima gradientu poziomego ze strefami tektonicznymi w obrębie podłoża lub spągu utworów jury. Co ciekawe, obserwuje się też anomalie ujemne na profilach przecinających występującą w rowie strukturę antyklinalną Bielsk-Bodzanów (kulminacja Bielska) w strefie przegubu tej struktury (na profilach poprzecznych), gdzie nie zaznacza się strefa obniżonej jakości obrazu sejsmicznego.

Ponadto, wykorzystano do interpretacji kompleksowej rozkłady prędkości składania opracowane przez podwykonawcę w ramach reprocessingu 12 profili sejsmicznych dla omawianych trzech struktur, skalibrowane prędkościami sejsmicznymi z otworów, które zestawiono z przekrojami sejsmicznymi i krzywymi anomalii grawimetrycznych. Prędkości składania przeliczono na prędkości interwałowe wzorem Dixa, a z tych z kolei wyliczono gęstości ośrodka geologicznego wzorem Gardnera. Modele gęstościowe ośrodka geologicznego zestawiono z przeliczonymi do domeny

głębokościowej (w oparciu o ww. prędkości składania) horyzontami sejsmicznymi, otrzymując modele strukturalno-gęstościowe, czyli grawimetryczne.

11.8 Przygotowanie wytycznych do opracowania projektów robót geologicznych dla lokalizacji kawern w oraz rozpoznania wybranych struktur solankowych (rozdział 8)

Przedyskutowano zagadnienia w zakresie wytycznych na potrzeby opracowania projektów robót geologicznych, dotyczących w szczególności uzupełniających badań geologicznych i geofizycznych potrzebnych do szczegółowego rozpoznania potencjalnych magazynów i składowisk substancji, czyli, w naszym przypadku nośników energii takich jak wodór, mieszaniny wodoru i gazu ziemnego, gaz ziemny oraz sprężone powietrze, a także dwutlenek węgla. Można przy tym stwierdzić, że na magazyny wodoru (i ew. mieszanin wodoru i gazu ziemnego gazu ziemnego i sprężonego powietrza) rekomendowane są kawerny budowane w pokładach cechsztyńskiej soli najstarszej na wytypowanych obszarach w rejonie NE części wyniesienia Łeby. Obszary te zlokalizowane są w pobliżu potencjalnych źródeł zielonego wodoru, tzn. farm wiatrowych na morzu i ew. przyszłych instalacji wytwórczych (elektrolizerów). Natomiast struktury solankowe, z uwagi na potencjalnie ogromną pojemność, rekomendowane są na składowiska dwutlenku węgla, ewentualnie mieszanin gazu ziemnego i wodoru.

Na wstępie (rozdział **8.1**) przedstawiono w sposób syntetyczny problematykę uregulowań prawnych dotyczących opracowywania projektów robót geologicznych (prg) na poszukiwanie i rozpoznawanie struktur geologicznych – potencjalnych składowisk i magazynów rozpatrywanych w ramach niniejszego przedsięwzięcia substancji. W szczególności dotyczy to zapisów obowiązującego Prawa geologicznego i górniczego oraz odnośnych rozporządzeń, miejsca prg w procesie koncesyjnym i wykorzystania jego wyników – wyniki prg dostarczają informacji wykorzystywanych do sporządzenia dokumentacji niezbędnej do ubiegania się o koncesję na składowanie/magazynowanie substancji.

Omówiono (rozdział **8.2.1**), obok ogólnie sformułowanej problematyki rozpoznawania struktur solnych metodami geofizycznymi, przykład projektu w zakresie magazynowania wodoru w kawernach w pokładach soli cechsztyńskich, najbardziej zbliżonego do problematyki poruszanej w niniejszym przedsięwzięciu. Projekt ten, funkcjonujący w Wielkiej Brytanii (Teesside, NE Anglia) dzięki adaptacji kawern służących wcześniej do magazynowania gazu miejskiego i gazu ziemnego (wybudowanych jeszcze w połowie ubiegłego wieku; w pokładzie soli w obrębie Z3, na głębokości ok. 380 metrów, miąższość max. 45 m czystej soli), natomiast w tym samym rejonie rozważane jest wykorzystanie głębiej występujących i bardziej miąższych pokładów soli cechsztyńskich (w tym w pokładzie w obrębie Z2, na głębokości ok. 1400 metrów, o miąższości ok. 150 m) i związane z tym prace rozpoznawcze. Informacje te wykorzystano na potrzeby propozycji badań geologicznych i geofizycznych dla wytypowanych obszarów perspektywicznych w rejonie wyniesienia Łeby.

Jeśli chodzi o magazynowanie i składowanie substancji w strukturach solankowych to omówiono (rozdział **8.2.2**) trzy projekty (we Francji, Niemczech i Czechach) dotyczące magazynowania mieszanin wodoru i gazu ziemnego (z domieszkami), gdzie zostały wybudowane w latach 1950-tych i 1960-tych

magazyny gazu miejskiego, adaptowane później na magazyny gazu, przy czym zwrócono uwagę na projekt w Niemczech (Ketzin), gdzie w tej samej lokalizacji powstał projekt pilotażowego zatłaczania dwutlenku węgla i na bazie jego doświadczeń rozważa się tam teraz magazynowanie wodoru. Ponadto omówiono sześć projektów na świecie w zakresie podziemnego składowania dwutlenku węgla na skalę przemysłową (projekty CCS, czyli obejmujące wychwyt, transport i składowanie dwutlenku węgla), w strukturach solankowych na lądzie. Z tego cztery projekty to aktualnie funkcjonujące (Aquistore, Kanada; Gorgon, Australia; Illinois, USA i Quest, Kanada), dla których dostępne są bogate informacje w zakresie rozpoznania warunków geologicznych i stanu początkowego ośrodka geologicznego w przypadku wykorzystywanych tam struktur solankowych. Natomiast dwa zakończone (w USA i Algierii) wykorzystywały do składowania CO_2 poziomy solankowe występujące pod złożami węglowodorów. W przypadku aktualnie funkcjonujących wielkoskalowych projektów Aquistore, Gorgon, Illinois i Quest, podobnie jak w przypadku projektu pilotażowego w Ketzin, były dostępne mniej lub bardziej szczegółowe informacje na temat badań geologiczno-geofizycznych wykonanych na potrzeby rozpoznania (względnie monitoringu stanu początkowego) struktur geologicznych wykorzystywanych do składowania CO_2, przydatne do opracowania wytycznych dla rozpoznania rozpatrywanych w ramach niniejszego przedsięwzięcia obiektów.

Zarówno dla pokładów soli jak i struktur solankowych scharakteryzowano wyczerpująco prace wykonane w ramach niniejszego przedsięwzięcia w zakresie wstępnego udokumentowania proponowanych do rozpoznania obiektów, których wyniki i/lub metodyka mogą być przydatne przy sporządzaniu prg w przedmiotowym zakresie. Przytoczono zawarte w odnośnych rozdziałach niniejszego opracowania sugestie wskazujące na potrzebę wykonania prac geofizycznych i geologicznych niezbędnych do uzyskania odpowiedzi na szereg postawionych tam problemów oraz propozycje dotyczące zakresu i metodyki takich prac (rozdziały **8.3** i **8.4**). Na podstawie tych informacji oraz doświadczeń ze wspomnianych wyżej przedsięwzięć na świecie dotyczących magazynowania wodoru w kawernach w pokładach soli oraz składowania dwutlenku węgla w strukturach solankowych na lądzie zaproponowano orientacyjny zakres i kosztorys prac potrzebnych do rozpoznania proponowanych (jako przykładowych) obiektów, tzn. 4 obszarów perspektywicznych do lokowania kawern w pokładzie cechsztyńskiej soli najstarszej w NE części wyniesienia Łeby i 4 mezozoicznych struktur solankowych w centralnej części Niżu Polskiego.

Rozpoznanie wytypowanych obszarów lokalizacji kawern solnych (rozdział 8.3)

Istotne dla ew. przyszłych prg w zakresie lokowania kawern w pokładzie soli najstarszej w rejonie wyniesienia Łeby były w szczególności analizy występowania w podłożu pokładu soli skomplikowanego systemu wąskich poligonalnych grzbietów anhydrytowych (wyższego i niższego rzędu) ograniczających panwie solne o rozmiarach rzędu 1-2 km (rozdział 7 Tomu II). Z uwagi na wymaganą miąższość pokładu soli i stabilność budowanych kawern jedynie w obrębie tych panwi mogą być korzystne warunki do lokowania kawern (a nie w obrębie grzbietów, gdzie pokład soli może nawet zanikać). Analizy te wykonano w oparciu o interpretację zdjęcia sejsmicznego 3D Opalino-Lubocino zlokalizowanego w strefie na południe od wytypowanych obszarów perspektywicznych i wskazano, w oparciu o interpretację rezydualnych anomalii grawimetrycznych i profili sejsmicznych, na możliwość występowania takich struktur na znacznie szerszym obszarze w rejonie wyniesienia Łeby (w tym jego części, gdzie występują wytypowane obszary perspektywiczne).

W oparciu w oparciu o te analizy (i inne prace w przedmiotowym zakresie wykonane w ramach niniejszego przedsięwzięcia) oraz informacje z ww. przykładowego projektu z Wielkiej Brytanii, zaproponowano orientacyjny zakres badań geologiczno-geofizycznych (i ich szacunkowe koszty) na potrzeby szczegółowego rozpoznania wytypowanych (lub analogicznych) obszarów perspektywicznych dla lokowania kawern do magazynowania wodoru.

Proponuje się wykonanie w pierwszej kolejności szczegółowego zdjęcia grawimetrycznego o zagęszczeniu punktów 10-12 pkt/km^2 na szerszym obszarze (badania nieinwazyjne), obejmującym wytypowane cztery obszary perspektywiczne. Odległość między punktami pomiarowymi byłaby nie mniejsza niż 300 m, co byłoby optymalne dla rozpoznania panwii solnych o rozmiarach rzędu 1-2 km oraz występowania grzbietów anhydrytowych wyższego i niższego rzędu o jeszcze mniejszych rozmiarach, w ramach późniejszej interpretacji anomalii rezydualnych na potrzeby optymalnego zaprojektowania zdjęć sejsmicznych 3D w rozpatrywanych obszarach perspektywicznych.

Natomiast sejsmika 3D powinna być wykonana w obrębie poszczególnych obszarów perspektywicznych. Na tym etapie trudno jeszcze podać ich dokładną lokalizację, gdyż będzie ona określona na podstawie interpretacji zdjęcia grawimetrycznego. Szacunkowo, najprawdopodobniej będą to strefy o powierzchni rzędu 10-30 km^2, w zależności od obszaru (czyli w sumie ok. 80 km^2). Metodyka akwizycji powinna zostać ukierunkowana na rozpoznanie utworów cechsztynu, w szczególności interesującego z punktu widzenia zadania geologicznego przedziału głębokości występowania pokładu soli najstarszej i anhydrytu dolnego (szacunkowo 600-1000 m p.p.t). Z badań sejsmicznych 3D będą wyłączone obszary zabudowane, natomiast badania na obszarach NATURA 2000 i parków krajobrazowych będą wymagały decyzji o środowiskowych uwarunkowaniach i zgody właściwych organów i najprawdopodobniej także sporządzenia raportu o oddziaływaniu na środowisko.

Ponadto należy wykonać badania mechaniczne na próbach soli z otworów w rejonie wyniesienia Łeby, gdzie znajdują się wytypowane obszary, zwłaszcza prób pełzania. Istotnym faktem jest, aby zwrócić uwagę na obecność zanieczyszczeń w obrębie soli a także wielkości kryształów. W związku z tym badania mechaniczne powinny być wsparte szczegółowymi badaniami petrograficznymi i mikrostrukturalnymi. Można przy tym wykorzystać rdzenie archiwalne z otworów odwierconych na tych obszarach oraz rozważyć w każdym z wytypowanych obszarów najbardziej perspektywicznych dla lokowania kawern, odwiercenie otworu badawczego przewiercającego kompleks soli najstarszej (czyli do ok. 900 m p.p.t.) wraz z pobraniem rdzeni z tego kompleksu. Otwór taki mógłby być ewentualnie później zaadaptowany na potrzeby budowy kawerny.

Biorąc to wszystko pod uwagę można określić orientacyjne koszty prac rozpoznawczych:

- grawimetria wraz z wstępną interpretacją – ok. 0,5 mln zł;

- sejsmika 3D – ok. 8 mln zł;

- nowe otwory – ok. 4 mln zł.

Daje to w sumie 12,5 mln zł, do tego należy doliczyć szacunkowo 10% na reinterpretację materiałów archiwalnych i analizy laboratoryjne archiwalnych próbek rdzeni (a wcześniej pozyskanie niezbędnych informacji i próbek od Skarbu Państwa) oraz interpretację kompleksową całości – razem 13,75 mln zł.

Rozpoznanie wytypowanych struktur solankowych (rozdział 8.4)

O potrzebie wykonania prac rozpoznawczych niezbędnych do lepszego rozpoznania struktur solankowych wspomniano ogólnie w rozdziale 7.1 niniejszego sprawozdania przy dyskusji wyników interpretacji danych sejsmicznych dla rozpoznanych archiwalną sejsmiką z ubiegłego wieku struktur Budziszewice-Zaosie, Konary i Bielsk-Bodzanów (kulminacja Bielska). Dotyczyły one w szczególności potwierdzenia zamknięcia struktur umożliwiającego efektywne pułapkowanie zatłoczonych substancji w obrębie ich kompleksów składowania/magazynowania, rozpoznania przegubów struktur, gdzie obserwuje się bardzo słabą jakość obrazu sejsmicznego, względnie uzyskania wiarygodnego odwzorowania tektoniki w otoczeniu struktury i samej struktury.

W przypadku rozpoznanej w ramach projektu demo CCS PGE Bełchatów wysokorozdzielczą sejsmiką 2D, otworem badawczym Kaszewy 1 oraz szczegółowym zdjęciem grawimetrycznym (prace polowe i interpretacja ich wyników wykonane w latach 2009-2011) w rozdziale 7.5.7 sformułowano bardziej szczegółowe zalecenia na temat dalszych prac jakie należałoby wykonać dla lepszego rozpoznania struktury, w tym na potrzeby oceny bezpieczeństwa składowania/magazynowania substancji. Zalecono wykonanie otworu o głębokości co najmniej 1000 m w szczycie struktury, 3-4 km na SE od otworu Kaszewy-1, rdzeniowanego od stropu oksfordu do stropu pliensbachu (na potrzeby profilowań strukturalnych i badań laboratoryjnych parametrów mechanicznych i petrofizycznych próbek skał), z standardowymi badaniami geofizyki wiertniczej oraz pomiarami umożliwiającymi sporządzenie modeli geomechanicznych, a także testów szczelinowania hydraulicznego w obrębie kompleksów uszczelniających aż do stropu podstawowego kolektora.

Zasugerowano wykonanie zdjęcia 3D/3C, z analizą anizotropii w obrębie poszczególnych formacji litostratygraficznych, z parametrami rejestracji umożliwiającymi eliminację zakłóceń pochodzących od „horyzontu skałkowego" w obrębie wychodni wapieni oksfordu na powierzchni podkenozoicznej. W konstrukcji modelu strukturalnego i geomechanicznego struktury Wojszyc należałoby uwzględnić anizotropię prędkości fali P, a wyniki badań sejsmicznych zintegrować z modelami geomechanicznymi i gęstościowymi oraz wynikami geofizyki wiertniczej i testów złożowych. Dostrzeżono także potrzebę rozpoznania przegubu i szczytu struktury, gdzie obserwuje się bardzo słabą jakość obrazu sejsmicznego i potwierdzenia zamknięcia struktury na SE (rozdział 7.6).

Zaproponowano, w oparciu o te wnioski i sugestie oraz informacje przykładowych projektów z Niemiec, Kanady, USA, Australii, obejmujących składowanie dwutlenku węgla w strukturach solankowych na lądzie, orientacyjny zakres badań geologiczno-geofizycznych (i ich szacunkowe koszty) na potrzeby szczegółowego rozpoznania wytypowanych (lub analogicznych) struktur solankowych w centralnej części Niżu Polskiego, na potrzeby składowania dwutlenku węgla (ew. magazynowania mieszanin gazu ziemnego i wodoru).

Generalnie można powiedzieć, że w projektach CCS obejmujących składowanie dwutlenku węgla w strukturach solankowych na lądzie stosuje się do rozpoznania potencjalnych składowisk/monitoringu ich stanu początkowego mniej lub bardziej podobny zestaw badań geologiczno-geofizycznych (sejsmika 3D/4D, otwory badawcze z zestawem konwencjonalnych i niekonwencjonalnych badań geofizyki wiertniczej oraz poborem rdzeni testami złożowymi, inne badania stanu początkowego: VSP, międzyotworowe, powierzchniowe geochemiczne, składu użytkowych wód podziemnych z ew. wierceniem płytkich otworów, satelitarne, etc.).

Ponieważ struktury Budziszewice-Zaosie, Konary, Bielsk-Bodzanów są przykładami struktur rozpoznanych archiwalną sejsmiką z ubiegłego wieku, generalnie słabej jakości, a struktura Wojszyce jest rozpoznana wysokorozdzielczą sejsmiką 2D i otworem, w którym zbadano parametry geomechaniczne kompleksu składowania oraz szczegółowym zdjęciem grawimetrycznym, proponuje się dwa etapy rozpoznania struktur na potrzeby składowania/magazynowania substancji.

W pierwszym etapie proponuje się wykonanie uzupełniających badań geologiczno-geofizycznych dla struktur słabiej zbadanych (ww. lub innych, analogicznych), umożliwiających rozpoznanie takiej struktury w stopniu porównywalnym do osiągniętego dla struktury Wojszyce. Objęłoby to wysokorozdzielczą sejsmikę 2D dla lepszego zobrazowania przegubu/szczytu i zamknięć struktury, a także wiarygodnego odwzorowania tektoniki w sąsiedztwie i obrębie struktury (szacunkowo ok. 200 km na strukturę) oraz szczegółowe zdjęcie grawimetryczne w rejonie struktury (zagęszczenie punktów pomiarowych 10-12 pkt/km^2), na potrzeby kompleksowej interpretacji geologiczno-geofizycznej i zaprojektowania zdjęcie sejsmicznego 3D. Należałoby też wykonać otwór badawczy przewiercający cały kompleks składowania w szczycie struktury (czyli do głębokości minimum 1000-1500 m, w zależności od struktury) z pobraniem rdzeni do profilowań strukturalnych i analiz laboratoryjnych, w tym geomechanicznych i petrofizycznych, z standardowymi badaniami geofizyki wiertniczej oraz pomiarami umożliwiającymi sporządzenie modeli geomechanicznych, a także testami szczelinowania hydraulicznego.

Biorąc to wszystko pod uwagę można określić orientacyjne koszty prac rozpoznawczych dla pierwszego etapu:

- sejsmika 2D – ok. 4 mln zł;

- grawimetria – ok. 1,6-1,7 mln zł;

- otwór badawczy – ok. 15-20 mln zł.

Do tego należałoby doliczyć 10% na reinterpretację danych archiwalnych (a wcześniej ich pozyskanie od Skarbu Państwa), analizy laboratoryjne na archiwalnych próbkach rdzeni (a wcześniej ich pozyskanie od Skarbu Państwa), interpretację kompleksową nowych i archiwalnych danych.

Razem dla pierwszego etapu otrzymujemy więc orientacyjnie ok. 22,7-28,3 mln zł.

Drugi etap rozpoznania takiej struktury objął by badania analogiczne do tych zaproponowanych w przypadku struktury Wojszyce oraz stosowanych na etapie charakterystyki potencjalnego składowiska/monitoringu stanu początkowego ośrodka geologicznego w projektach Ketzin, Aquistore, Gorgon, Illinois, Quest – jak poniżej:

- sejsmika 3D – ok. 8 mln zł;

- drugi otwór badawczy w przegubie struktury, 2-4 km od pierwszego, zakres analogiczny, czyli ok. 15-20 mln zł.

Ponadto należałoby doliczyć 15% na monitoring stanu początkowego: VSP, płynów złożowych, ciśnienia i temperatury w otworach, międzyotworowy (tomografii sejsmicznej i elektroporowej), powierzchniowy geochemiczny i hydrogeologiczny podziemnych wód użytkowych (istniejące i nowe płytkie otwory, nawiercające wszystkie użytkowe poziomy wodonośne, tzn. JCWP i GZWP) oraz

interpretację kompleksową danych z obu etapów obejmującą stworzenie szczegółowego modelu geologicznego kompleksu składowania/magazynowania i jego nadkładu.

Stąd dla drugiego etapu otrzymujemy w sumie orientacyjnie ok. 26,5-32,2 mln zł.

Nie obejmuje to budowy sieci stałego monitoringu dla sejsmiki 4D i innych badań, ani infrastruktury związanej z zagospodarowaniem składowiska/magazynu (które zasadniczo powstaną po uzyskaniu koncesji na składowanie/magazynowanie).

11.9 Wnioski i rekomendacje

Zakres i najważniejsze wyniki prac wykonanych w ramach niniejszego przedsięwzięcia, wiążących się z realizacją celów określonych w Karcie Informacyjnej zadania scharakteryzowano obszernie wyżej, w rozdziałach **11.1-11.8**.

Natomiast poniżej przedstawiono najważniejsze wnioski i rekomendacje związane z:

- oceną stabilności i szczelności kawern solnych (na przykładzie złóż pokładowych wyniesienia Łeby) wybranych na potrzeby lokalizacji magazynów/składowisk substancji;

- oceną szczelności i geologiczną charakterystyką struktur solankowych w utworach mezozoiku na obszarze Niżu Polskiego, wybranych na potrzeby lokalizacji magazynów/składowisk substancji.

Przedstawiono też w obu przypadkach wnioski i rekomendacje dotyczące wytycznych i kryteriów wspomagających proces decyzyjny inwestora przy wyborze lokalizacji i budowie nowych magazynów/składowisk substancji w obrębie kawern solnych oraz struktur solankowych, w tym w zakresie efektywnego zaprojektowania kosztownych uzupełniających badań geologicznych i geofizycznych potrzebnych do szczegółowego rozpoznania rozpatrywanych obiektów.

11.9.1 Kawerny w pokładach soli

Na obszarze NE części wyniesienia Łeby zostały wyznaczone (w oparciu o mapy miąższości pokładu soli sporządzone na podstawie danych otworowych, interpretacji danych sejsmicznych 2D oraz dostępnych informacji na temat parametrów soli kamiennej i kawern), cztery obszary najbardziej perspektywiczne pod kątem lokowania kawern. Preferowane jest w tym przypadku magazynowanie wodoru w kawernach, gdyż obszary te zlokalizowane są w pobliżu potencjalnych źródeł zielonego wodoru, tzn. farm wiatrowych na morzu i ew. przyszłych instalacji wytwórczych (elektrolizerów). Przy wyznaczaniu obszarów uwzględniono zagospodarowanie terenu, formy ochrony przyrody i możliwe konflikty interesów. Istotnym wkładem do interpretacji miąższości soli Na1 są analizy występowania w podłożu pokładu soli skomplikowanego systemu wąskich poligonalnych grzbietów anhydrytowych ograniczających panwie solne o rozmiarach rzędu 1-2 km, gdzie mogą być korzystne warunki do lokowania kawern (a nie w obrębie grzbietów, gdzie pokład soli może nawet zanikać). Wykonano takie analizy w oparciu o dostępną sejsmikę 3D w strefie na południe od wytypowanych obszarów perspektywicznych, dla których postuluje się wykonanie analogicznych badań sejsmicznych.

Wskazówki dotyczące wyboru lokalizacji pod budowę podziemnych magazynów w obrębie wytypowanych obszarów w rejonie wyniesienia Łeby obejmowały kryteria głębokości występowania i miąższości pokładu soli, występowania i miąższości przewarstwień w jego obrębie, obecności

uskoków i struktur tektonicznych oraz stopnia zanieczyszczenia soli (domieszek). Ponadto zarekomendowano wybór i ranking lokalizacji w oparciu o ocenę potencjału magazynowego, gdzie obok parametrów pokładu soli uwzględnia się także parametry geometryczne i operacyjne kawern. Dzięki temu, inwestorzy i decydenci mogą dokonać wyboru lokalizacji, która najlepiej spełnia zarówno kryteria geologiczne, jak i operacyjne, maksymalizując efektywność i rentowność inwestycji, uwzględniając powyższe informacje a następnie wykonane przez nich dalsze badania i analizy w zakresie wykonalności i oceny bezpieczeństwa projektowanego magazynu.

Samą analizę stabilności i szczelności kawern solnych wykonano w oparciu o wyniki modelowania numerycznego. Przeanalizowano, pod kątem wskazówek dla potencjalnych inwestorów, wpływ różnych parametrów geometrycznych, mechanicznych i operacyjnych na tempa deformacji wokół kawern oraz naprężeń efektywnych, które stanowią kluczowe narzędzie do oceny stabilności i szczelności kawern. Badania te podkreśliły znaczenie trzech głównych czynników: (1) lepkości soli, wpływającej m.in. na tempo zaciskania kawern, gdzie istotna też może być obecność przewarstwień anhydrytu; (2) ciśnienia w kawernie, co może mieć wpływ na integralność strukturalną kawern oraz ew. deformacje i ryzyko utraty szczelności; (3) geometrii kawerny, co ma wpływ na rozkład naprężeń wokół kawerny i utrzymanie jej integralności strukturalnej (najbardziej optymalna jest kawerna rozszerzająca się ku dołowi, z zaokrąglonymi brzegami).

Jeśli chodzi o wybór lokalizacji pod budowę podziemnych magazynów w obrębie wytypowanych obszarów w rejonie wyniesienia Łeby to ponadto zarekomendowano wykonanie na rozpatrywanych obszarach perspektywicznych badań geofizycznych w tym:

- szczegółowego zdjęcia grawimetrycznego o zagęszczeniu punktów optymalnym dla rozpoznania panwii solnych o rozmiarach rzędu 1-2 km, ewentualnie występowania grzbietów anhydrytowych wyższego i niższego rzędu o jeszcze mniejszych rozmiarach, oraz zaprojektowania zdjęć sejsmicznych 3D w rozpatrywanych obszarach perspektywicznych;

- sejsmiki 3D pozwalającej na ewentualne zobrazowanie wałów anhydrytowych wyższego i niższego rzędu, w lokalizacjach określonych na podstawie interpretacji nowych danych grawimetrycznych, w miarę dostępności terenu – z badań sejsmicznych 3D będą wyłączone obszary zabudowane, natomiast badania na obszarach NATURA 2000 i parków krajobrazowych będą wymagały decyzji o środowiskowych uwarunkowaniach oraz zgody właściwych organów i najprawdopodobniej także sporządzenia raportu o oddziaływaniu na środowisko;

- badań mechanicznych na próbach soli z otworów w rejonie wyniesienia Łeby, gdzie znajdują się wytypowane obszary, zwłaszcza prób pełzania. Istotnym faktem jest, aby zwrócić uwagę na obecność zanieczyszczeń w obrębie soli a także wielkości kryształów. W związku z tym badania mechaniczne powinny być wsparte szczegółowymi badaniami petrograficznymi i mikrostrukturalnymi. Można przy tym wykorzystać rdzenie archiwalne z otworów odwierconych na tych obszarach oraz rozważyć w każdym z wytypowanych obszarów najbardziej perspektywicznych dla lokowania kawern, w oparciu o wyniki sejsmiki 3D, odwiercenie otworu badawczego przewiercającego kompleks soli najstarszej wraz z pobraniem rdzeni z tego kompleksu. Otwór taki mógłby być ewentualnie później zaadaptowany na potrzeby budowy kawerny.

Określono ponadto orientacyjne koszty takiego zestawu uzupełniających badań geologiczno-geofizycznych (wraz z pozyskaniem niezbędnych informacji i próbek od Skarbu Państwa oraz

interpretacją kompleksową całości) – dla czterech wytypowanych obszarów perspektywicznych wynoszą one w sumie blisko 14 mln zł.

11.9.2 Struktury solankowe

Przedsięwzięcie obejmowało (rozpoczętą przed wyborem struktur do ich dalszej charakterystyki) ocenę jakości i integralności regionalnego uszczelnienia kredowego dla występujących na obszarze Polski centralnej (na obszarze niecki mogileńsko-uniejowskiej i niecki brzeżnej (płockiej)) struktur solankowych, tzn. węglanowej i węglanowo-krzemionkowej sekwencji górnej kredy (łącznie z albem górnym). Ocenę wykonano w oparciu o wyniki profilowania rdzeni, analiz laboratoryjnych na próbkach skał i geofizyki wiertniczej. Dostępne informacje, w tym głównie sejsmika refleksyjna, wskazują, że sekwencja ta w Polsce centralnej nie jest intensywnie zuskokowana. Główne uskoki przebiegają w rejonie struktur solnych oraz w strefach związanych z synsedymentacyjnymi rowami tektonicznymi. Profilowania strukturalne sugerują możliwość rozszczelnienia w takich strefach górnych interwałów sekwencji, a lokalnie, rzadko – jej całości. Nowe badania petrofizyczne wskazują, że utwory kredy górnej i albu górnego, głównie wapienie, iłowce/mułowce wapniste, margle oraz opoki i gezy, charakteryzują się wysoką porowatością efektywną – sięgającą 20%, jednakże przestrzeń porowa tych skał ma charakter mikro- i nanoporowaty. Dla próbek iłowców-mułowców-margli oraz opok obserwuje się dominację nanoporów (ponad 80%), natomiast w próbkach wapieni nanopory nieznacznie przeważają nad mikroporami. Stąd analizowane skały kredy górnej wraz z albem górnym mogą stanowić w miarę dobry poziom uszczelniający, zwłaszcza jeśli weźmie się pod uwagę fakt, że sekwencja ta osiąga znaczną miąższość. Obok miąższości tej sekwencji istotny jest brak stref uskokowych lub spękań rozszczelniających cały kompleks K2 (co jest spełnione na większości obszaru badań). Jedynie w przypadku składowania dwutlenku węgla problemem może być reaktywność tego gazu rozpuszczonego wodach złożowych z węglanami, jednak duża miąższość sekwencji, oraz fakt, że w przestrzeni porowej mogą zachodzić inne reakcje, także wytrącanie związków chemicznych, wskazują, że może ona stanowić skuteczną barierę dla migracji zatłoczonego dwutlenku węgla poza kompleks składowania.

Wyboru struktur (co obejmowało też ich ranking) dokonano na podstawie analizy dostępnych informacji (w tym danych sedymentologicznych, złożowych, geofizycznych, hydrogeologicznych i hydrogeochemicznych) oraz zestawionych kryteriów złożowych, charakteryzujących przydatność i szczelność struktury jako potencjalnego magazynu/składowiska rozpatrywanej substancji, oraz innych kryteriów, dotyczących dostępności danych, wykonalności magazynowania/składowania oraz związanych z tym ewentualnych zagrożeń i konfliktów interesów w zakresie wykorzystania górotworu. Wskazano przy tym, że w przypadku struktur solankowych ich stopień rozpoznania nie zawsze może okazać się wystarczający do wiarygodnego określenia, w oparciu o dostępne informacje, czy spełnione jest dane kryterium. Spośród 47 zinwentaryzowanych mezozoicznych struktur solankowych wybrano do dalszych analiz trzy struktury w utworach jury (Wojszyce – stosunkowo nowe i bogate dane – oraz Konary i Budziszewice-Zaosie – dane archiwalne z ubiegłego wieku) i jedną w utworach kredy (Bielsk-Bodzanów – dane archiwalne z ubiegłego wieku).

W przypadku struktur jurajskich Budziszewice-Zaosie i Konary stwierdzono (na podstawie interpretacji zreprocesowanych w ramach niniejszego przedsięwzięcia profili sejsmicznych oraz reinterpretacji danych sejsmicznych opracowanych wcześniej w ramach innych przedsięwzięć PIG-PIB/PSG, archiwalnych map strukturalnych, interpretacji danych grawimetrycznych, hydrogeologicznych i hydrogeochemicznych) integralność kompleksu składowania w obrębie

utworów jury dolnej. Nie stwierdzono uskoków tnących kolektory i uszczelnienia w obrębie utworów jury dolnej i zasugerowano, że najprawdopodobniej bezpieczne będzie składowanie/magazynowanie substancji w kolektorze górnego pliensbachu (oraz kolektorach głębiej występujących), ale wymagałoby to szczegółowego rozpoznania kompleksu składowania/magazynowania. Charakterystyczne jest występowanie w przegubach i szczytach struktur obniżonej jakości obrazu sejsmicznego, co też koreluje się z ujemnymi rezydualnymi anomaliami grawimetrycznymi, co można prawdopodobnie tłumaczyć kombinacją skomplikowanej rzeźby stropu jury i spękaniami w najwyższych partiach sekwencji jury (przez analogię do sytuacji na strukturze jurajskiej Wojszyce). Ponadto potwierdzenia wymagają zamknięcia struktur, zwłaszcza od strony NW, warunkujące efektywne pułapkowanie zatłaczanych substancji (tzn. brak możliwości migracji zatłaczanej substancji poza strukturę w kierunku poziomym).

Dla struktury kredowej Bielsk-Bodzanów, a właściwie kulminacji Bielska (część NW) również postuluje się (w oparciu o analogiczne materiały jak w przypadku dwóch ww. struktur jurajskich) integralność rozpatrywanego kompleksu składowania, tzn. kolektora dolnokredowej formacji mogileńskiej i uszczelnienia górnokredowego i możliwość bezpiecznego składowania/magazynowania tam substancji, lecz potwierdzenie tego faktu również wymagałoby szczegółowych badań. Potwierdzenia wymaga ponadto zamknięcie tej, występującej w rowie, struktury antyklinalnej w kierunku na NE, niezbędne było by też wiarygodne rozpoznanie strefy rowu. Natomiast utwory jury są silnie zuskokowane, a potencjalne kolektory występują stosunkowo głęboko, co może być problemem w przypadku ich ewentualnego wykorzystania na składowisko/magazyn.

Struktura jurajska Wojszyce wydaje się być w świetle dostępnych informacji (materiałów archiwalnych, w tym wytworzonych w ramach projektu demo CCS PGE Bełchatów) oraz wykonanych w ramach niniejszego przedsięwzięcia analiz, interpretacji i modelowań geomechanicznych bezpieczna dla składowania/magazynowania substancji w utworach jury dolnej (w charakteryzującym się dobrymi własnościami zbiornikowymi kolektorze górnego pliensbachu oraz w kolektorach głębiej występujących). Według interpretacji danych geologiczno-geofizycznych strefa uskokowa równoległa do osi antykliny i zlokalizowana w rejonie otworu Kaszewy 1 nie kontynuuje się ponad strop triasu. Jednak występowanie w przegubie i szczycie antykliny stref o słabej jakości obrazu sejsmicznego (relatywnie nawet gorszej niż w przypadku struktur Budziszewice-Zaosie i Konary) nie pozwala na jednoznaczne potwierdzenie tego faktu. Słaba jakość obrazu sejsmicznego może być tłumaczona występowaniem układających się w pasy wzdłuż osi antykliny, skałek twardego i gęstego wapienia skalistego, przykrytych osadami węgli brunatnych i iłów miocenu o wyjątkowo małej gęstości (na podstawie analizy rezydualnych anomalii grawimetrycznych). Taka budowa geologiczna może też tłumaczyć trudny do opanowania zanik płuczki wiertniczej w tym interwale głębokościowym w otworze Kaszewy 1. Strefy o słabej jakości obrazu sejsmicznego ponadto korelują się z występowaniem ujemnych anomalii grawimetrycznych, czyli lokalnie obniżonej gęstości ośrodka geologicznego, co może być tłumaczone występowaniem w szczycie antykliny gęstych spękań w obrębie utworów jury górnej i środkowej. Ponadto problematyczne jest stwierdzenie w świetle dostępnych informacji czy zamknięcie struktury od strony SE jest wystarczające do efektywnego pułapkowania zatłaczanych substancji.

Jeśli chodzi o uzupełniające badania geologiczno-geofizyczne umożliwiające szczegółowe rozpoznanie rozpatrywanych struktur to proponuje się prowadzenie takich badań w dwóch etapach.

Proponuje się wykonanie w pierwszym etapie dla struktur Budziszewice-Zaosie, Konary, Bielsk-Bodzanów (lub analogicznych struktur mezozoicznych na obszarze Niżu Polskiego, o analogicznym stopniu rozpoznania) uzupełniających badań geologiczno-geofizycznych umożliwiających ich rozpoznanie w stopniu porównywalnym do osiągniętego dla struktury Wojszyce, tzn. w następującym zakresie dla pojedynczej struktury solankowej:

- wysokorozdzielcza sejsmika 2D – 6-9 profili w sumarycznym wymiarze ok. 200 km, w celu bardziej wiarygodnego odwzorowania geometrii struktury, w tym uchwycenia zamknięć antyklin czy też rozpoznania tektoniki w bezpośrednim sąsiedztwie struktury;

- szczegółowe zdjęcie grawimetryczne o zagęszczeniu pomiarów 10-12 km^2 na potrzeby kompleksowej interpretacji geologiczno-geofizycznej i zaprojektowania zdjęcia sejsmicznego 3D;

- otwór badawczy w szczycie struktury przewiercający cały kompleks składowania (czyli do głębokości minimum 1000-1500 m, w zależności od struktury), z rdzeniowaniem z uszczelnień i kolektorów do analiz laboratoryjnych, w tym geomechanicznych i petrofizycznych. W otworze należy wykonać analogiczne badania jak w otworze Kaszewy 1, z tym, że dla kompleksów uszczelniających i kolektorów powinny zostać wykonane profilowania sondy akustycznej dipolowej i skanera XRMI, a także przynajmniej 8 testów szczelinowania hydraulicznego.

Orientacyjny koszt pierwszego etapu badań dla powyższego zakresu, wraz z ew. pozyskaniem archiwalnych danych i rdzeni od Skarbu Państwa, analizami na archiwalnych rdzeniach i interpretacją kompleksową całości, oszacowano na ok. 22,7-28,3 mln zł.

Drugi etap rozpoznania rozpatrywanej struktury solankowej objął by następujące badania:

- sejsmika 3D o parametrach umożliwiających eliminację zakłóceń od horyzontu „skałkowego" w obrębie powierzchni podkenozoicznej w szczycie i przegubie struktury;

- drugi otwór badawczy w przegubie struktury, 2-4 km od pierwszego, zakres analogiczny jak w pierwszym etapie;

- monitoring stanu początkowego: VSP, płynów złożowych, ciśnienia i temperatury w otworach, międzyotworowy (tomografii sejsmicznej i elektroporowej), powierzchniowy geochemiczny i hydrogeologiczny podziemnych wód użytkowych (istniejące i nowe płytkie otwory, nawiercające wszystkie użytkowe poziomy wodonośne, tzn. JCWP i GZWP);

- interpretacja kompleksowa danych z obu etapów (w przypadku struktury Wojszyce danych z projektu demo CCS) obejmująca stworzenie szczegółowego modelu geologicznego kompleksu składowania/magazynowania i jego nadkładu.

Stąd dla drugiego etapu otrzymujemy orientacyjny koszt ok. 26,5-32,2 mln zł.

Nie obejmuje to budowy sieci stałego monitoringu dla sejsmiki 4D i innych badań, ani infrastruktury związanej z zagospodarowaniem składowiska/magazynu, ani też adaptacji otworu badawczego na zatłaczający lub monitoringowy.

Należy przy tym zaważyć, że badania sejsmiczne na obszarach NATURA 2000 i parków krajobrazowych będą wymagały decyzji o środowiskowych uwarunkowaniach oraz zgody właściwych

organów i najprawdopodobniej także sporządzenia raportu o oddziaływaniu na środowisko. Badania na obszarach parków narodowych i rezerwatów przyrody raczej nie będą możliwe. Należy też raczej unikać wiercenia otworów badawczych, które mogły by być docelowo wykorzystane jako otwory zatłaczające, na obszarach ochrony przyrody.

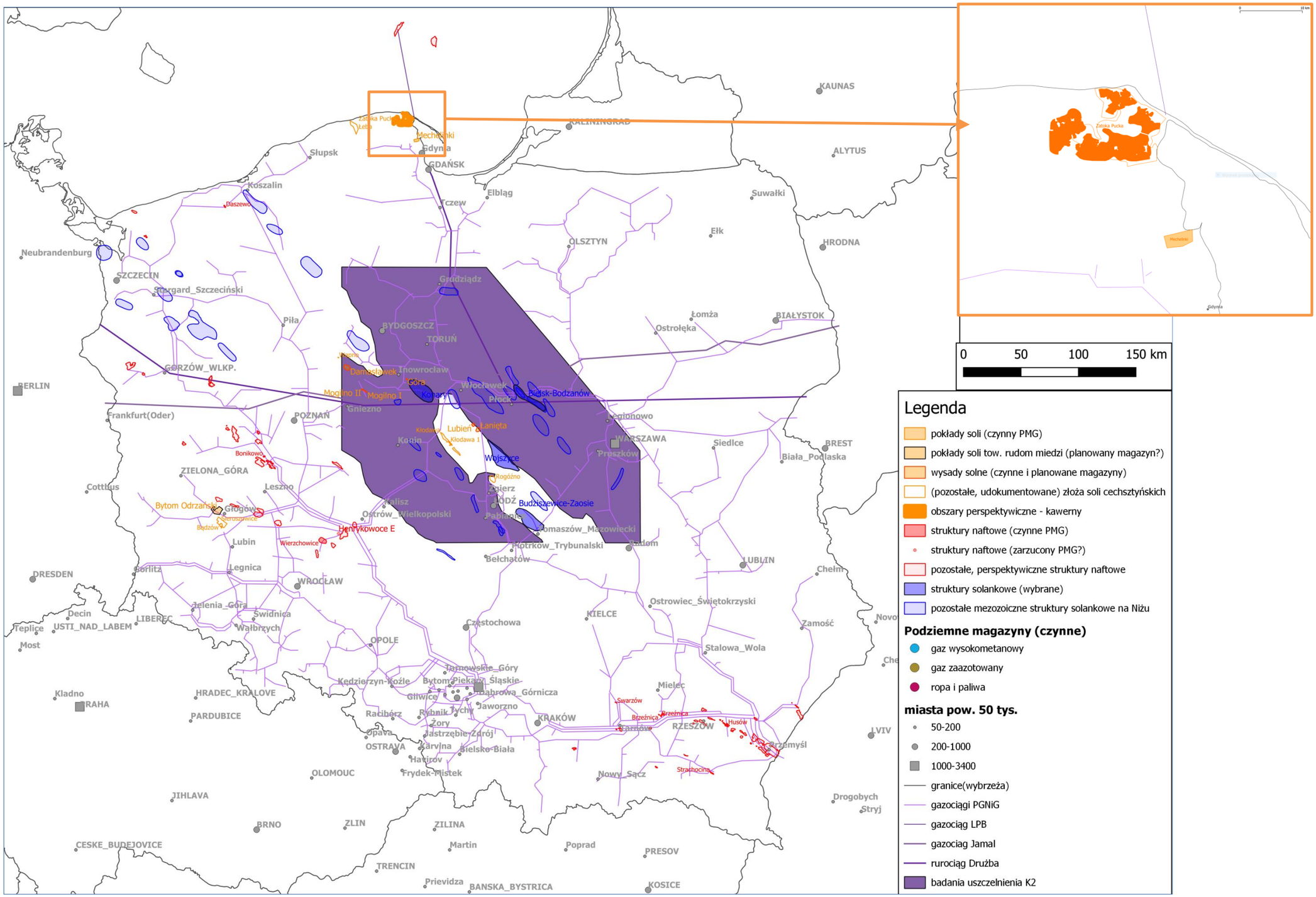


Fig. 11-1 Analizowane w ramach przedsięwzięcia struktury solankowe, obszar badań uszczelnienia K2 oraz struktury solne, w tym wytypowane obszary perspektywiczne dla lokalizacji kawern solnych w NE części wyniesienia Łeby, w rejonie złoża soli kamiennej Zatoka Pucka. Pozostałe informacje – patrz Fig. 1-1 i rozdział 1.1

LITERATURA

Allen, R.D., Doherty T.J., Eriksson R.I., Wiles I.E., Factors Affecting Storage of Compressed Air in Porous Rock Reservoirs. Battelle Memorial Institute PNL-4707.

Aslannezhad M., Ali M., Kalantariasl A., Sayyafzadeh M., You Z., Iglauer S., Keshavarz A., 2023. A review of hydrogen/rock/brine interaction: Implications for hydrogen geo-storage. Progress in Energy and Combustion Science, 95, Article 101066. https://doi.org/10.1016/j.pecs.2022.101066

Bank Hydro PIG-PIB, 2023. http://spd.pgi.gov.pl/PSHv8/Psh.html

Baron, M., Parnell, J., 2007. Relationships between stylolites and cementation in sandstone reservoirs: Examples from the North Sea, U.K. and East Greenland. Sedimentary Geology 194, 17–35. https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2006.04.007

Baza CBDG PIG-PIB, 2023. http://baza.pgi.gov.pl/;

Baza MIDAS PIG-PIB, 2023. http://geoportal.pgi.gov.pl/midas-web/index.jsp?conversationContext=2&conversationContext=2

Bengtson P., 1996. The Turonian stage and substage boundaries. W: Rawson P. F., Dhondt A. V., Hancock J. M., Kennedy W. J. (red.). Second International Symposium on Cretaceous Stage Boundaries. Bulletin de l'Institut royal des Sciences Naturelles de Belgique, Sciences de la Terre, 66: 69-79.

BIP MKiŚ, 2024. https://bip.mos.gov.pl/koncesje-geologiczne/raporty-i-zestawienia-dotyczace-udzielonych-koncesji-w-tym-zestawienia-otworow-wiertniczych/

BIP Urzędu gminy Krośnice, 2022. https://bip.krosnice.pl/?bip=2&cid=72&id=6815

Birkelund T., Hancock J.M., Hart M.B., Rawson P.F., Remane J., Robaszynski F., Schmid F., Surlyk F., 1984. Cretaceous stage boundaries. Proposals. Bulletin of the geological Society of Denmark, 33: 3-20.

Bobek K., Jarosiński M., 2021. Modifications of methods for the fracture analysis from borehole data in application to shale formations. Geological Quarterly, 65, 23, 17 p.

Bochnia N., Duda W., 1966. Dokumentacja półszczegółowych badań grawimetrycznych. Temat: Paraantyklinorium Kujawskie, rejon Brześcia Kujawskiego, 1965. Dokumentacja niepublikowana, Inw. 1242 Kat. 3726/314 Arch. CAG PIG, Warszawa.

Bojarski L., Płochniewski (red.), 1990. Mapa temperatur i chemizmu wód w utworach kredy dolnej. Mapa temperatur i chemizmu wód w utworach jury dolnej. Mapy 1:500000. Inst. Sur. Energet. AGH w Krakowie. Okręg. Przedsięb. w Poznaniu. Kraków.

Bojarski L. (red.) 1996. Atlas hydrochemiczny i hydrodynamiczny paleozoiku i mezozoiku oraz ascenzyjnego zasolenia wód podziemnych na Niżu Polskim, 1 : 1 000 000. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.

Bouteldja, M., Acosta, T., Carlier, B., Reveillere, A., Jannell, H., Fournier, C., 2021. Definition of Selection Criteria for a Hydrogen Storage Site in Depleted Fields or Aquifers. Hystories deliverable D1.1-0, 05 March 2021. https://hystories.eu/wp-content/uploads/2021/05/D1.1-0-Selection-criteria-for-H2-storage-sites.pdf

CBDG, 2008. Otwory wiertnicze. Stratygrafia. Weryfikacja profili stratygraficznych 2008. PIG-PIB.

Chadwick A., Arts R., Bernstone C., May F., Thibeau S., Zweigl P., 2008 - Best practice for the storage of CO_2 in saline aquifers. Keyworth, Nottingham, British Geological Survey. https://www.globalccsinstitute.com/archive/hub/publications/160498/best-practice-storage-co2-saline-aquifers-observations-guidelines-sacs-co2store-projects.pdf

Colón, C.F.J., Oelkers, E.H., Schott, J., 2004. Experimental investigation of the effect of dissolution on sandstone permeability, porosity, and reactive surface area1. Geochimica et Cosmochimica Acta 68, 805–817. https://doi.org/10.1016/j.gca.2003.06.002

Cornot-Gandolphe, S., 2019. Underground Gas Storage in the World – 2019 Status. Cedigaz. https://www.cedigaz.org/publications/free-downloads/

Crotogino, F., 2001. Huntorf CAES: More than 20 Years of Successful Operation. Spring 2001 Meeting Orlando, Florida, USA, 15-18 April 2001. http://www.fze.uni-saarland.de/AKE_Archiv/AKE2003H/AKE2003H_Vortraege/AKE2003H03c_Crotogino_ea_HuntorfCAES_CompressedAirEnergyStorage.pdf

Czapowski G., Sadowski A., Misiek G., Kolonko P., 2005. Możliwości niekonwencjonalnego wykorzystania walorów przyrodniczych i technicznych Kopalni Soli "Kłodawa". Technika Poszukiwań Geologicznych, 2005, R. 44, nr 4-5, s. 35-47.

Czapowski, G., Tarkowski, R., 2018. Uwarunkowania geologiczne wybranych wysadów solnych w Polsce i ich przydatność do budowy kawern do magazynowania wodoru. Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego, 472: 53–81.

Dadlez R., Marek S., Pokorski J. (red.) 1998. Atlas paleogeograficzny epikontynentalnego permu i mezozoiku w Polsce. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.

Dadlez R., Marek S., Pokorski J., 2000. Mapa geologiczna Polski bez utworów kenozoiku 1: 1 000 000. Ministerstwo Środowiska i Państwowy Instytut Geologiczny. Wydawnictwo Kartograficzne Polskiej Agencji Ekologicznej, Warszawa.

Dadlez R., 2001. Przekroje geologiczne przez bruzdę śródpolską. Państw. Inst. Geol. Warszawa.

Dąbrowski S., Janiszewska B., Pawlak A., Rynarzewski W., 2005. Jakość wód podziemnych jako czynnik warunkujący zasoby dyspozycyjne Pradoliny Warszawsko-Berlińskiej na obszarze kanałów Obry: Północnego, Środkowego i Południowego. W: Współczesne problemy hydrogeologii, t. 12: 155–164. Toruń.

Dix Ch., 1955. Seismic Velocities from Surface Measurements, Geophysics 20, no. 1 (January 1955): 68–86.

Döpp, L., Weinzierl, W., Schmidt-Hattenberger, C., and Sass, I., 2023. Hydrogen underground storage in a saline aquifer at the Ketzin site (Germany) – a numerical pre-feasibility assessment, EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023, EGU23-2282. https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-2282

Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/31/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie geologicznego składowania dwutlenku węgla oraz zmieniająca dyrektywę Rady 85/337/EWG, Euratom, dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2000/60/WE, 2001/80/WE, 2004/35/WE, 2006/12/WE, 2008/1/WE i rozporządzenie (WE) nr 1013/2006.

EngineeringToolbox, 2023. https://www.engineeringtoolbox.com/air-temperature-pressure-density-d_771.html

Fajklewicz Z., 2007. Grawimetria stosowana. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne Akademii Górniczo-Hutniczej. Kraków.

Finley R.J., Frailey S.M.1, Leetaru H.E., Ozgur S., Couëslan M.L., Marsteller, S., Early Operational Experience at a One-million Tonne CCS Demonstration Project, Decatur, Illinois, USA. GHGT-11, Energy Procedia 37 (2013) 6149– 6155.

Gardner, G.H.F., Gardner L.W., Gregory A.R., 1974. Formation velocity and density – the diagnostic basics for stratigraphic traps. Geophysics 39: 770–780.

Gas Storage Poland, 2022. https://ipi.gasstoragepoland.pl

GAZ SYSTEM S.A., 2022. https://www.gaz-system.pl/pl/system-przesylowy/inwestycje/pmg-damaslawek.html

GCCSI, 2021. Global Status of CCS 2021, CCS Accelerating to Net Zero, https://www.globalccsinstitute.com/resources/publications-reports-research/

GDOŚ, 2023 https://www.gov.pl/web/gdos/dostep-do-danych-geoprzestrzennych

geolog.pgi.gov.pl

geoportal.pl

Gholani R., 2023. Hydrogen storage in geological porous media: Solubility, mineral trapping, H_2S generation and salt precipitation. Journal of Energy Storage, Volume 59, March 2023, 106576. https://doi.org/10.1016/j.est.2022.106576

Giese R., Henninges J., Lüth S., Morozova D., Schmidt-Hattenberger C., Würdemann H., Zimmer M., Cosma C., Juhlin C., and CO2SINK Group, 2009. Monitoring at the CO_2SINK Site: A Concept Integrating Geophysics, Geochemistry and Microbiology. GHGT-9. Energy Procedia 1 (2009) 2251–2259.

Giles, M.R., Indrelid, S.L., Beynon, G.V., Amthor, J., 2000. The Origin of Large-Scale Quartz Cementation: Evidence from Large Data Sets and Coupled Heat–Fluid Mass Transport Modelling, in: Quartz Cementation in Sandstones. John Wiley & Sons, Ltd, pp. 21–38. https://doi.org/10.1002/9781444304237.ch2

Górecki, W. (red.), 2004. Analiza możliwości wykorzystania sczerpywalnych złóż węglowodorów, zawodnionych horyzontów i wybranych warstw wodonośnych na podziemne magazyny gazu ziemnego. Inw. 145/2005 Arch. CAG PIG, Warszawa.

Górecki W. (red) 2006. Atlas zasobów geotermalnych formacji mezozoicznej na Niżu Polskim. Atlas of geothermal resources of Mesozoic formations in the Polish Lowlands. AGH, 2006. 484s., Kraków.

Górowski M., Jaros E., Kurowska O., Laskownicka A. (GK Processing Sp. z o.o.), 2023a. Dokumentacja z wykonanych prac. Reprocessing danych sejsmicznych 2D. Etap I. Budziszewice-Zaosie (dokumentacja niepublikowana).

Górowski M., Jaros E., Kurowska O., Laskownicka A. (GK Processing Sp. z o.o.), 2023b. Dokumentacja z wykonanych prac. Reprocessing danych sejsmicznych 2D. Etap II. Bielsk-Bodzanów (dokumentacja niepublikowana).

Górowski M., Jaros E., Kurowska O., Laskownicka A. (GK Processing Sp. z o.o.), 2023c. Dokumentacja z wykonanych prac. Zaawansowany reprocessing danych sejsmicznych 2D – 4 profile. Rejon: Inowrocław-Toruń. Struktura Konary (dokumentacja niepublikowana).

Grzywacz J., 1960. Sprawozdanie z półszczegółowych badań grawimetrycznych w rejonie Wyszogrodu wykonanych w 1959 roku. Dokumentacja niepublikowana, Inw. 13191/61 Kat. 3930/101 Arch. CAG PIG, Warszawa.

IKS Solino, 2022. https://www.solino.pl/pl

Jarosiński M., 2006. The recent tectonic stress fleld investigations in Poland: a state of the art. Geol. Quarterly, 50: pp. 303-321.

Jarosiński, M., Poprawa, P., Ziegler, P.A., 2009. Cenozoic dynamic evolution of the Polish Platform. Geological Quarterly 53, 3–26.

Jaskowiak-Schoeneichowa M., 1977. Kreda górna. [W:] Budowa geologiczna wschodniej części niecki mogileńsko-łódzkiej (strefa Gopło-Ponętów-Pabianice). Pr. Inst. Geol., 80: 99-112.

Jaskowiak-Schoeneichowa M., Krassowska A., 1983. Kreda górna. [W:] Budowa geologiczna niecki warszawskiej (płockiej) i jej podłoża. Pr. Inst. Geol., 103: 177-197.

Jaworowski K., 1987. Kanon petrograficzny najczęstszych skał osadowych. Przegląd Geologiczny, 4: 205-208.

Juhlin C., Giese R., Zinck-Jørgensen K., Cosma C., Kazemeini H., Juhojuntti N., Lüth S., Norden B., Förster A., 2007. 3D baseline seismics at Ketzin, Germany: The CO2SINK project. Geophysics, 72(5), B121-B132. https://doi.org/10.1190/1.2754667

Jurczak, S., Brańka, S., Berezowski, T., Kasprzyk, W., Rogowska, E., 2006. Dokumentacja geologiczno-inżynierska złoża soli kamiennej "Góra" dla bezzbiornikowego magazynowania ropy naftowej i paliw płynnych w górotworze w miejsc. Góra, woj. kujawsko-pomorskie. Inw. 1698/2006 Arch. CAG PIG, Warszawa.

Jurek J., Krauze H., Kunicka W., 1980. Opracowanie badań sejsmicznych wykonanych w rejonie Włocławek - Płock, rejon: Inowrocław - Toruń, rok 1978 – 79. Dokumentacja niepublikowana, Inw. 9542/2022 Kat. 54/180 Arch. CAG PIG, Warszawa.

Kapuściński, J., Kołpaczyński, M., 2018. Projekt robót geologicznych w celu określenia warunków hydrogeologicznych i geologiczno-inżynierskich w związku z bezzbiornikowym magazynowaniem gazu w rejonie Marianowo, Etap 3, gm. Marianowo, Stara Dąbrowa, Stargard, pow. stargardzki, woj. zachodniopomorskie. Inw. 6921/2018 Arch. CAG PIG, Warszawa.

KAPSCO2, 2022. http://skladowanie.pgi.gov.pl/twiki/bin/view/KAPS/WebHome

Kijewska S., Głuszyński A., 2019. Sejsmika w okolicach otworu Bodzanów IG 1. [W:] Leszczyński K. (red.), 2019. Profile Głębokich otworów wiertniczych, z. 156, 203-204.

Kotański Z.(red.), 1997. Atlas geologiczny Polski : mapy geologiczne ścięcia poziomego 1:750 000, Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.

Kruk B., 1966. Dokumentacja półszczegółowych badań grawimetrycznych. Temat: Antyklina Justynowa - Jeżowa, 1966. Dokumentacja niepublikowana, Inw. 1306 Kat. 4030/77 Arch. CAG PIG, Warszawa.

Kruk B., 1967. Dokumentacja półszczegółowych badań grawimetrycznych, tematy: 1. Antyklina Justynowa – Jeżowa, 1966 - 67, 2. Antyklinorium Kujawskie i Rawsko - Gielniowskie, 1967. Dokumentacja niepublikowana, Inw. 1432 Kat. 4229/211 Arch. CAG PIG, Warszawa.

Kruk B., 1967a. Dokumentacja półszczegółowych badań grawimetrycznych. Temat: Paraantyklinorium Kujawskie, rejon Wojszyc 1966. Dokumentacja niepublikowana, Inw. 1303 Kat. 3928/457 Arch. CAG PIG, Warszawa.

Krzywiec P., 2009. Geometria i ewolucja wybranych struktur solnych z obszaru Niżu Polskiego w świetle danych sejsmicznych. Przegląd Geologiczny, 2009, vol. 57, nr 9.

Leszczyński K., 2002. Ewolucja geologiczna strefy Ponętów-Wartkowice w kredzie. Pr. Państw. Inst. Geol., 176.

Leszczyński K., 2012. The internal geometry and lithofacies pattern of the Upper Cretaceous-Danian sequence in the Polish Lowlands. Geological Quarterly, 56, 2: 363-386.

Letcher T. (ed.), 2020. Future Energy Improved, Sustainable and Clean Options for Our Planet. 3rd Edition - January 16, 2020. Elsevier. ISBN 978-0-08-102886-5.

Lüth S., Bergmann P., Huang F., Ivandic M., Ivanova A., Juhlin C., Kempka T., 2017. 4D seismic monitoring of CO_2 storage during injection and post- closure at the Ketzin pilot site. 13th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, GHGT-13, 14-18 November 2016, Lausanne, Switzerland. Energy Procedia 114 (2017) 5761 – 5767

Łobaziewicz Z., 1997. Opracowanie wyników prac interpretacyjnych dla tematu Polska Centralna Blok-A, rejon: Piotrków Trybunalski-Rawa Mazowiecka, interpretacja materiałów

reprocesowanych dla AMOCO. Dokumentacja niepublikowana, Inw. 2427/98 Arch. CAG PIG, Warszawa

Łyszkowska A., Kruk B., 1969. Dokumentacja półszczegółowych badań grawimetrycznych; temat: Antyklinorium Kujawskie i Rawsko - Gielniowskie, 1968 r. Kat. 43/157 Arch. CAG PIG, Warszawa.

Macioszczyk A., 1987. Hydrogeochemia. Wyd. Geol. Warszawa.

Majer E., Sokołowska M. (red.), 2023. Zasady dokumentowania warunków geologiczno-inżynierskich na potrzeby podziemnego bezzbiornikowego magazynowania i składowania. Autorzy: Majer E., Sokołowska M., Frankowski Z., Adamuszek M., Czapowski G., Fajfer J., Jarosiński M., Majer K., Szabłowska M., Samel I., Wójcicki A., Mazurek S., Roszkowska-Remin, Cyglicki M., Korzeniowski W., Łukasiak D., Jagoda E. Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa. ISBN 978-83-67567-41-1. https://bit.ly/3FMagpX

Manecki A., Muszyński M., 2008. Przewodnik do petrografii. AGH Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Kraków.

Margul B., 1971. Dokumentacja półszczegółowych badań grawimetrycznych temat: Synklinorium łódzkie, 1970 r. Dokumentacja niepublikowana, Inw. 1636 Kat. 4128/215 Arch. CAG PIG, Warszawa.

Marks L., Grabowski J., Stępień U. (red.), 2022. Mapa geologiczna Polski 1:500 000. C – Mapa podłoża kenozoiku. Państw. Inst. Geol. – PIB, Warszawa.

Marosz Z., Tomaszewska J., 1993. Opracowanie badań sejsmicznych wykonanych w rejonie Kamionki-Bielsk dla tematu Rypin-Wyszogród. Dokumentacja niepublikowana, Inw. 917/93 Arch. CAG PIG, Warszawa .

MINDAT, 2022. https://www.mindat.org/loc-176514.html

Murray, E., Kopan, Y., Yfantis, G., McInroy, D. and Leister, N., 2016. Hydrogen Turbines Follow On - Salt Cavern Appraisal for Hydrogen and Gas Storage. ETI. https://doi.org/10.5286/UKERC.EDC.000782

Musiatewicz M., Wojas A., 1992. Dokumentacja badań geofizycznych na temacie Wysad solny „Góra", gm. Inowrocław, woj. Bydgoskie. Dokumentacja niepublikowana, Inw. 1022/94 Arch. CAG PIG, Warszawa.

Musiatowicz J., Zubrzycka E., 2010. Raport końcowy z prac polowych Wojszyce 2D [wraz ze sprawozdaniem z prac doświadczalnych]. Dokumentacja niepublikowana, Inw. 4315/2011 Arch. CAG PIG, Warszawa.

OpenStreetMap, 2023 https://www.openstreetmap.org/#map=7/52.018/19.137

Ostrowski C., Stefaniuk M., Wojdyła M., Kosobudzka I., 2007. Dokumentacja badań geofizycznych. Temat: Pomiary polowe magnetotelluryczne, magnetyczne i grawimetryczne wzdłuż profilu Zgorzelec - Wiżajny wraz z ich przetworzeniem i interpretacją, 2005-2007. Dokumentacja niepublikowana, Inw. 3093/2014 Arch. CAG PIG, Warszawa.

Ostrowski C., Ostrowska K., Pisuła M., Rzepka A., Koryczan A. Czarna A., 2010. Opracowanie zdjęcia grawimetrycznego w rejonie struktury geologicznej Wojszyc wraz z interpretacją, 2010. Dokumentacja niepublikowana, Inw. 2934/2011 Arch. CAG PIG, Warszawa.

Paczyński B. (red.) Atlas hydrogeologiczny Polski: 1 : 500 000. Zasoby, jakość i ochrona zwykłych wód podziemnych, Część 2. Państwowy Instytut Geologiczny.

Paczyński B., Pałys J., 1970. Geneza i paleohydrogeologiczne warunki występowania wód zmineralizowanych na Niżu Polskim. Kwart. Geol. T. 14, z. 1.

Paczyński B., Sadurski A. (red), 2007. Hydrogeologia regionalna Polski, tom I – Wody słodkie. Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy. Warszawa.

Paczyński B., Sadurski A. (red.), 2007a. Hydrogeologia regionalna Polski, tom II; Wody mineralne, lecznicze i termalne oraz kopalniane. Państwowy Instytut Geologiczny. Warszawa. (Regional hydrogeology of Poland, volume II; Mineral, therapeutic, thermal and mine waters. Polish Geological Institute. Warsaw).

PGNiG, 2022 https://pgnig.pl/podziemne-magazyny-gazu

Pieńkowski G., 2015. Geologiczne składowanie ditlenku węgla (CCS) jest metodą bezpieczną – dowody geologiczne. Przegląd Geologiczny, 2015, vol. 63, nr 1.

Pisiewicz, T., 2020. Dodatek nr 1 do dokumentacji geologicznej złoża soli kamiennej "Damasławek", miejsc. Sielec, Podobowice, Uścikowo, Ustaszewo, Świątkowo, Bogdarka, gm. Żnin, Janowiec Wielkopolski, pow. żniński, woj. kujawsko-pomorskie. Inw. 7190/2020 Arch. CAG PIG, Warszawa.

Połońska M., 1999. Kreda górna. W: Diageneza osadów permu górnego i mezozoiku Kujaw (red. A. Maliszewska). Prace Państwowego Instytutu Geologicznego, 167: 128-138.

Posyniak A., Rosa W. , 2010. Dokumentacja końcowa otworu wiertniczego KASZEWY 1. Dokumentacja niepublikowana, Inw. 4311/2011 Arch. CAG PIG, Warszawa.

Pożaryski W., Radwański S., 1972. Mapa geologiczna Polski bez utworów kenozoiku, mezozoiku i permu. Skala 1:1000000, Państwowy Instytut Geologiczny. Warszawa.

Przytuła E., Filar S., Mordzonek G., 2013. Bilans wodnogospodarczy wód podziemnych z uwzględnieniem oddziaływań z wodami powierzchniowymi w polskiej części dorzecza Odry. Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy. Warszawa.

Raczyńska A., 1979. Stratygrafia i rozwój litofacjalny młodszej kredy dolnej na Niżu Polskim. Pr. Inst. Geol., 89.

Radio Zachód, 2018. https://zachod.pl/565071/bytom-odrzanski-liczy-na-miliardowa-inwestycje/

Rawson P.F., Dhondt A.V., Hancock J.M., Kennedy W.J. eds., 1995. Proceedings of the Second International Cretaceous Symposium on Stage Boundaries, Brussels 8-16 September 1995. Bulletin de l'Institut royal des Sciences Naturelles de Belgique, Sciences de la Terre, 66 – Supplement.

Razowska-Jaworek L., 2012. Wykorzystanie chemizmu wód głębokich poziomów wodonośnych Niżu Polskiego jako wskaźnika ich przydatności do lokowania dwutlenku węgla. Biuletyn PIG 448: 87-94.

Reczek J., 1967. Dokumentacja półszczegółowych badań grawimetrycznych, temat: Mogilno – Konin – Uniejów, 1965/66. Dokumentacja niepublikowana, Kat. G-215 PBG Arch. CAG PIG, Warszawa.

Reynolds, J.M., An Introduction to Applied and Environmental Geophysics, 2nd Edition. Wiley-Blackwell. ISBN: 978-0-470-97544-2.

Rock L., O'Brien S., Tessarolo S., Duer J., Bacci V.O., Hirst B., Randell D., Helmy M., Blackmore J., Duong C., Halladay A., Smith N., Dixit T., Kassam S., Yaychuk M., 2017. The Quest CCS Project: 1st Year Review Post Start of Injection. 13th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, GHGT-13, 14-18 November 2016, Lausanne, Switzerland. Energy Procedia 114 (2017) 5320 – 5328.

Rostron B., White D., Hawkes C., Chalaturnyk R., 2014. Characterization of the Aquistore CO_2 project storage site, Saskatchewan, Canada. GHGT-12, Energy Procedia 63 (2014) 2977 – 2984.

Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 3 września 2014 r. w sprawie obszarów, na których dopuszcza się lokalizowanie kompleksu podziemnego składowania dwutlenku węgla, Dziennik Ustaw z 2014 roku, poz. 1272.

Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 18 listopada 2016 r. w sprawie dokumentacji hydrogeologicznej i dokumentacji geologiczno-inżynierskiej, Dziennik Ustaw z 2016 roku, poz. 2033.

Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 8 grudnia 2017 r. w sprawie planów ruchu zakładów górniczych, Dziennik Ustaw z 2017 roku, poz. 2293.

Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 10 września 2019 r. w sprawie przedsięwzięć mogących znacząco oddziaływać na środowisko, Dziennik Ustaw z 2019 roku, poz. 1839.

Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 23 grudnia 2020 r. w sprawie innych dokumentacji geologicznych, Dziennik Ustaw z 2020 roku, poz. 449.

Sambo, C., Duduna, A., Samuel, S.A., Esenjor, P., Muhammed, N.S., Haq, B., 2022. A review on worldwide underground hydrogen storage operating and potential fields. International Journal of Hydrogen Energy (in press, corrected proof). https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.05.126

Schuppers J.D., Holloway S., May F., Gerling P., Bøe R., Larsen M., Andersen P.R., Hatzyannis, G., 2003. Storage capacity and quality of hydrocarbon structures in the North Sea and Aegan region. GESTCO WP2 Final Report, TNO Report NITG 02-020-B, Utrecht, NL.

Soćko A., 1965. Dokumentacja półszczegółowych badań grawimetrycznych, temat: Gostynin - Łowicz - Ponętów - Poddębice, rok 1964 /opracowanie tymczasowe/. Dokumentacja niepublikowana, Inw. 1163 Kat. 3929/154 Arch. CAG PIG, Warszawa.

Soćko A., 1966. Dokumentacja półszczegółowych badań grawimetrycznych. Temat: Gostynin - Łowicz - Ponętów - Poddębice, 1965. Dokumentacja niepublikowana, Inw. 1252 Kat. 3929/163 Arch. CAG PIG, Warszawa.

Spence B., 2010. QUEST Carbon Capture & Storage Project. Carbon Sequestration Leadership Forum Warsaw, October 2010. https://fossil.energy.gov/archives/cslf/sites/default/files/documents/Warsaw2010/Spence-TG-QuestPresentation-Warsaw1010.pdf

Stachowska A., Krzywiec P., 2021. Depositional architecture of the Upper Cretaceous succession in central Poland (Grudziądz–Polik area) based on regional seismic data. Geological Quarterly, 65, 21, 17 p.

Streibel M., Finley R.J., Martens S., Greenberg S., Möller F., Liebscher A., 2014. From Pilot to Demo Scale – Comparing Ketzin results with the Illinois Basin-Decatur Project. GHGT-12, Energy Procedia 63 (2014) 6323 – 6334.

Stupnicka, E. Stempień-Sałek, M., 2016. Geologia regionalna Polski, Wydawnictwa Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa.

Szynkaruk E., 2011. Wykonanie prac badawczych, prac niezbędnych do zorganizowania, wykonania i interpretacji badań geologicznych służących do wytypowania optymalnej struktury gospodarczej dla lokalizacji podziemnego składowiska CO 2 - [specjalne] - 40.2200.0946.38.0. Dokumentacja niepublikowana, Inw. 225/2012 Arch. CAG PIG, Warszawa.

Taccani R., Malabotti, S., Dall'Armi, C., Micheli, D., 2020. High energy density storage of gaseous marine fuels: An innovative concept and its application to a hydrogen powered ferry. International Shipbuilding Progress. 67. 1-24. 10.3233/ISP-190274.

Targosz P., Sada M., 2011. Dokumentacja prac grawimetrycznych i magnetotellurycznych Płock-Sierpc-Płońsk 2011 rok. Dokumentacja, niepublikowana, Inw. 4863/2013 Kat. G-689 PBG Arch. CAG PIG, Warszawa.

Tarkowski R., (red.), 2010. Potencjalne struktury geologiczne do składowania CO_2 w utworach mezozoiku Niżu Polskiego (Charakterystyka oraz ranking), autorzy: L. Dziewińska, Marek S., Tarkowski R., Uliasz-Misiak B, [w:] "Studia Rozprawy i Monografie", nr 164, IGSMiE PAN, 2010, 138s.

Tarkowski, R., Czapowski, G., 2018. Salt domes in Poland – Potential sites for hydrogen storage in caverns. International Journal of Hydrogen Energy, 43(46): 21414–21427.

Tarkowski, R., Uliasz-Misiak, B., Tarkowski, P., 2021. Storage of hydrogen, natural gas, and carbon dioxide – Geological and legal conditions. International Journal of Hydrogen Energy 46, 20010–20022. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.03.131.

Trupp M., Frontczak J., Torkington J., 2013. The Gorgon CO2 Injection Project – 2012 Update. GHGT-11, Energy Procedia 37 (2013) 6237– 6247.

Turek S. (red.), 1977. Atlas hydrogeochemiczny Polski. Inst. Geol. Warszawa.

Ustawa z dnia 9 czerwca 2011 r. Prawo geologiczne i górnicze Prawo geologiczne i górnicze, 2023, Dziennik Ustaw z 2023 roku, poz. 633 (z późn. zm.).

Ustawa z dnia 3 października 2008 r. o udostępnianiu informacji o środowisku i jego ochronie, udziale społeczeństwa w ochronie środowiska oraz o ocenach oddziaływania na środowisko, 2023, Dziennik Ustaw z 2023 roku, poz. 1094.

Wasiak I., 1972. Dokumentacja szczegółowych badań grawimetrycznych. Temat: Antyklina Jeżowa, 1971. Dokumentacja niepublikowana, Inw. 1688 Kat. 4129/1076 Arch. CAG PIG, Warszawa.

Wasiak I., 1990. Dokumentacja szczegółowych badań grawimetrycznych; temat: Poszukiwanie złóż węgla brunatnego w obrębie anomalii grawimetrycznych, II faza - 1989 r. Dokumentacja niepublikowana, Kat. G-570 Arch. Przeds. Bad. Geofiz. Sp. z o.o., Warszawa.

Williams J.D.O., Williamson J.P., Parkes D., Evans D.J., Kirk K. L., Sunny N., Hough E., Vosper H., Akhurst M. C., 2022. Does the United Kingdom have sufficient geological storage capacity to support a hydrogen economy? Estimating the salt cavern storage potential of bedded halite formations. Journal of Energy Storage, 53, 105109. https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105109; https://ukerc.rl.ac.uk/ETI/PUBLICATIONS/AdHoc_CCS_CC1011_16.pdf

Wipki M., Ivanova A., Liebscher A., Lüth S., Möller F., Szizybalski A., Wiese B., Zimmer M., 2016. Monitoring Concept for CO_2 Storage at the Ketzin Pilot Site, Germany – post-injection continuation towards transfer of liability. European Geosciences Union General Assembly 2016, EGU Division Energy, Resources & Environment, ERE. Energy Procedia 97 (2016) 348 – 355.

Wójcicki, A., Nagy, S., Lubaś, J., Chećko, J., Tarkowski, R. (red.), 2013. Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO_2 wraz z ich programem monitorowania. PIG-PIB, Warszawa. (raport podsumowujący i opracowanie końcowe) https://skladowanie.pgi.gov.pl.

Wójcicki A., Sobień K., Wójcik K., 2021. Typowanie obszarów, w których dopuszczalne powinno być lokalizowanie kompleksów podziemnego składowania CO_2 w Polsce. Ekspertyza PIG-PIB dla DGiKG MKiŚ (niepublikowana, przekazana do MKiŚ).

Zacharski, J., Wójcicki, A., Czapowski, G., 2021. Wykorzystanie wybranych struktur geologicznych do podziemnego magazynowania substancji. XI Forum Innowacyjności „Klimat wobec wyzwań XXI wieku", 18 listopada 2021 r., Instytut Ochrony Środowiska, Warszawa, https://ios.edu.pl/wp-content/uploads/2022/01/Wykorzystanie-wybranych-struktur-geologicznych-do-podziemnego-magazynowania-substancji.pdf

Zawisza, L., Borecka, A., Traple, J., Wątor, L., Wosz, R., Woźniak, H., 2009. Dokumentacja geologiczno-inżynierska określająca warunki w górotworze złoża gazu ziemnego "Henrykowice" dla potrzeb magazynowania gazu ziemnego w miejsc. Górka, Wielgie Milickie, gm. Milicz, Krośnice, pow. Milicz, woj. Dolnośląskie. Inw. 1378/2009 Arch. CAG PIG, Warszawa.

Zeljaś, D., 2020. Magazyny gazu ziemnego w cechsztyńskich formacjach solnych elementem bezpieczeństwa energetycznego Polski. Przegląd Geologiczny, 68(11): 824–832.

Zivar D., Kumar S., Foroozesh J., 2021. Underground hydrogen storage: A comprehensive review. International Journal of Hydrogen Energy, 46(45): 23436–23462.

Żelaźniewicz A., Aleksandrowski P., Buła Z., Karnkowski P.H., Konon A., Oszczypko N., Ślączka A., Żaba J., Żytko K., 2011. Regionalizacja tektoniczna Polski. Komitet Nauk Geologicznych PAN, Wrocław: 1–60.

Dodatek A Informacja z przygotowania publikacji

Publikacje o zasięgu krajowym

1. Wójcicki A., Czapowski G., Zacharski J., 2023. Magazynowanie i składowanie substancji w strukturach geologicznych. [W]: Sówka I., Szczepański K., Ślączka W. (red.), 2023. Ochrona klimatu w Polsce – wybrane zagadnienia i rozwiązania. Instytut Ochrony Środowiska - Państwowy Instytut Badawczy. ISBN 978-83-966110-1-7 https://ios.edu.pl/wp-content/uploads/2023/09/ochrona-klimatu-w-polsce-wybrane-zagadnienia-i-rozwiazania.pdf

Publikacje o zasięgu międzynarodowym

1. Adamuszek M., Dąbrowski M., 2022. Deformation patterns in the mechanically stratified evaporites over an active basement fault. [W]: de Bresser J.H.P., Drury M.R., Fokker P.A., Gazzani M., Hangx S.J.T., Niemeijer A.R., Spiers C.J., 2022. Proceedings of the 10th Conference on the Mechanical Behavior of Salt (SALTMECH X), Utrecht, The Netherlands, 06-08 July 2022. ISBN 9781003295808. https://doi.org/10.1201/9781003295808
2. Słotwiński M., Adamuszek M., 2023. Wpływ uziarnienia soli kamiennych na tempo zaciskania się kawern solnych/Correlation between the rock-salt grain size and the rate of underground cavern convergence. Przegląd Solny / Salt Review, 2023, 17: 117-138. http://psgs.agh.edu.pl/wp-content/uploads/2024/01/PS2023.pdf
3. Głuszyński A., Jarosiński M., Dąbrowski M., Peryt T., 2024. Giant polygonal anhydrite ridges in the northeastern Southern Permian Basin (Poland). Geology (artykuł przyjęty, w trakcie recenzji/korekty).