



Państwowy Instytut Geologiczny  
Państwowy Instytut Badawczy

ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa, tel 022 849 53 51, fax 022 849 53 42, sekretariat@pgi.gov.pl  
Sąd Rejonowy dla m. st. Warszawy w Warszawie, XIII Wydział Gospodarczy KRS, Nr 0000122099; NIP PL 5250008040

[www.pgi.gov.pl](http://www.pgi.gov.pl)

państwowa służba  
geologiczna  
państwowa służba  
hydrogeologiczna

Konsorcjum  
projektu



**ROZPOZNANIE FORMACJI I STRUKTUR DO BEZPIECZNEGO GEOLOGICZNEGO  
SKŁADOWANIA CO<sub>2</sub> WRAZ Z ICH PROGRAMEM MONITOROWANIA,  
RAPORT MERYTORYCZNY NR 2: SEGMENT II, REJON BĘLCHATÓW**

Koordynator projektu:

Dyrektor PIG-PIB,  
Przewodniczący Komitetu Sterującego Projektu:

*dr inż. Adam Wójcicki*

*doc. dr hab. Jerzy Nawrocki*



**"WYKONANO NA ZAMÓWIENIE MINISTRA RODOWISKA ZA RODKI FINANSOWE  
WYPŪACONE PRZEZ NARODOWY FUNDUSZ OCHRONY RODOWISKA I  
GOSPODARKI WODNEJ"**

Warszawa, grudzień 2009

## WYKONAWCY

IMIĘ I NAZWISKO	INSTYTUCJA	IMIĘ I NAZWISKO	INSTYTUCJA
dr inż. Adam Wójcicki	PIG-PIB	prof. dr hab. inż. Józef Dubiński	GIG
doc. dr hab. Marek Jarosiński	PIG-PIB	doc. dr hab. inż. Grzegorz Mutke	GIG
mgr Katarzyna Sobień	PIG-PIB	doc. dr hab. inż. Jan Wachowicz	GIG
dr Anna Feldman-Olszewska	PIG-PIB	dr inż. Jarosław Chećko	GIG
mgr inż. Teresa Adamczak	PIG-PIB	dr inż. Adam Lurka	GIG
doc. dr hab. Magdalena Sikorska-Jaworowska	PIG-PIB	dr inż. Krystyna Stec	GIG
dr Magdalena Pańczyk	PIG-PIB	dr Eleonora Solik-Heliasz	GIG
Dr Aleksandra Kozłowska	PIG-PIB	dr inż. Piotr Rozmus	GIG
Leszek Giro	PIG-PIB	mgr inż. Aleksandra Koterak	GIG
mgr Wanda Narkiewicz	PIG-PIB	mgr Michał Bednarski	GIG
mgr inż. Grzegorz Wróbel	PIG-PIB	mgr inż. Robert Warzecha	GIG
mgr inż. Sylwia Kijewska	PIG-PIB	mgr inż. Robert Siata	GIG
mgr inż. Paweł Poprawa	PIG-PIB	mgr inż. Jacek Chodacki	GIG
inż. Jacek Chełmiński	PIG-PIB	mgr inż. Tomasz Urych	GIG
mgr Maciej Tomaszczyk	PIG-PIB	doc. dr hab. inż. Radosław Tarkowski	IGSMiE PAN
mgr Łukasz Nowacki	PIG-PIB	dr hab. inż. Barbara Uliasz-Misiak	IGSMiE PAN
dr Lidia Razowska-Jaworek	PIG-PIB	prof. dr hab. inż. Sylwester Marek	IGSMiE PAN
Tadeusz Grudzień	PIG-PIB	dr Lidia Dziewińska	IGSMiE PAN
dr hab. inż. Stanisław Nagy, prof. nzw.	AGH	dr hab. Inż. Krzysztof Labus	IGSMiE PAN
prof. dr hab. inż. Andrzej Gonet	AGH	mgr inż. Magdalena Wdowin	IGSMiE PAN
prof. dr hab. inż. Henryk Marczak	AGH	doc. dr hab. inż. Jan Lubaś	INiG
prof. dr hab. inż. Stanisław Stryczek	AGH	dr inż. Grzegorz Leśniak	INiG
prof. dr hab. inż. Jakub Siemek	AGH	mgr inż. Krzysztof Sowizdzał	INiG
dr hab. inż. Rafał Wiśniowski	AGH	dr Wiesław Szott	INiG
mgr inż. Łukasz Klimkowski	AGH	dr inż. Piotr Łętkowski	INiG
mgr inż. Rafał Sedlaczek	AGH	inż. Andrzej Gołąbek	INiG
prof. dr hab. inż. Wojciech Górecki	AGH	mgr inż. Krzysztof Miłek	INiG
mgr inż. Bartosz Papiernik	AGH	Andrzej Rychlicki	INiG
mgr inż. Marek Hajto	AGH	mgr inż. Bogdan Filar	INiG
mgr inż. Grzegorz Machowski	AGH	mgr inż. Mariusz Miziołek	INiG
mgr inż. M. Michna	AGH	mgr inż. Barbara Piesik-Buś	INiG
mgr inż. M. Maruta	AGH	mgr inż. Jadwiga Zamojcin	INiG
mgr inż. A. Pasternacki	AGH	inż. Władysława Kędra	INiG

mgr inż. Mariusz Słyś	INiG	mgr Tomasz Bąk	PBG
prof dr hab. inż. Halina Jędrzejowska-Tyczkowska	INiG	mgr inż. Cezary Ostrowski	PBG
Irena Irlík	INiG	mgr inż. Grzegorz Pacanowski	PBG
Dorota Piróg	INiG	dr inż. Marek Wojdyła	PBG
mgr Iwona Byś	INiG	Zdzisław Żuk	PBG

## Spis treści

WSTĘP.....	5
1.1.14 ZEBRANIE SZCZEGÓLNYCH INFORMACJI GEOLOGICZNYCH, GEOFIZYCZNYCH, HYDROGEOLOGICZNYCH, ZŁOŻYCH, GEOMECHANICZNYCH. 8	8
Analizy danych z otworów wiertniczych (PIG-PIB, AGH, GIG).....	8
Mapy sejsmiczne formacji mezozoiku oraz wyniki innych badań geofizycznych (PIG-PIB, PBG) .....	12
Oddziaływanie CO <sub>2</sub> -składowania z otoczeniem (IGSMiE PAN).....	15
1.1.15 OPRACOWANIE SZCZEGÓLNYCH STATYCZNYCH MODELI OŚRODKA GEOLOGICZNEGO SKŁADOWANIA.....	17
Model statyczny utworów dolnej jury (AGH).....	19
Modele gęstości i oporności (PBG).....	33
Charakterystyka antyklin Zaosia i Justynowa, w tym utworów triasu dolnego (IGSMiE PAN). .	36
Model statyczny utworów triasu dolnego (INiG).....	41
Charakterystyka i analiza warunków hydrogeologicznych dla struktury Budziszewice-Zaosie (GIG).....	48
Oznaczenia składu mineralnego próbek skał (PIG-PIB).....	60
1.1.16 MODELOWANIE DYNAMICZNE PROCESÓW ZATACZANIA CO <sub>2</sub> DO SKŁADOWISKA.....	65
Modelowania dynamiczne dla formacji jury dolnej (AGH, GEM).....	70
Modelowania dynamiczne dla formacji jury dolnej (GIG, PetraSim/TOUGH2).....	81
Modelowania dynamiczne dla formacji triasu dolnego (INiG, Petrel/Eclipse).....	96
1.1.17 ZARZĄDZANIE RYZYKIEM GEOLOGICZNEGO SKŁADOWANIA CO <sub>2</sub> .....	113
Ocena ryzyka składowania CO <sub>2</sub> , w tym skutków potencjalnych wycieków (GIG).....	115
Ocena ryzyka składowania CO <sub>2</sub> w tym opis potencjalnych zagrożeń wyciekami CO <sub>2</sub> i migracją solanki (INiG) .....	126
Ocena ryzyka geologicznego składowania, w tym zagadnienia bezpieczeństwa składowania i integralności składowiska (AGH).....	144
1.1.18 OPRACOWANIE PROGRAMU MONITORINGU DLA WYTYPOWANYCH SKŁADOWISKA.....	157
Plan monitoringu powierzchniowego sejsmicznego, grawimetrycznego i elektromagnetycznego (PIG-PIB & PBG).....	159
Monitoring sejsmologiczny i metod tomografii pasywnej (GIG).....	165
Monitoring mikrobiologiczny i stężenia CO <sub>2</sub> w powietrzu podglebowym (IGSMiE PAN).....	171
Propozycja programu monitoringu parametrów kolektorów i uszczelnienia na podstawie planowanych prac z zakresu sejsmiki 4D (INiG).....	180
Plany monitoringu testowego zatłaczania CO <sub>2</sub> na jednej ze struktur rezerwowych (AGH & PIG- PIB).....	188
PODSUMOWANIE.....	193
Literatura.....	194



## WST P

Niniejszy raport obejmuje opracowanie wielowariantowych (alternatywnych) scenariuszy geologicznej sekwestracji CO<sub>2</sub> dla obiektu w poziomach wodonośnych solankowych w rejonie Bełchatowa, zgodnie z zaleceniami DYREKTYWY 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 - *Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej L 140/114 z dnia 5 czerwca 2009 r.* (zwana dalej **Dyrektywą**). Zakres raportu, jak również ramowy zakres II Segmentu, odpowiada punktom **1.1.14-1.1.18** Karty Informacyjnej niniejszego tematu i jednocześnie poniżej scharakteryzowanym zapisom Dyrektywy. Stanowi to pierwsze w naszym kraju praktyczne wdrożenie wymogów Dyrektywy odnośnie charakterystyki potencjalnych składowisk, wykorzystujących dostępne materiały archiwalne.

Zgodnie z Dyrektywą, składowanie CO<sub>2</sub> w warstwach geologicznych będzie poprzedzone szczegółowymi badaniami potencjalnego składowiska. Zgodnie z załącznikiem nr 1 do Dyrektywy, analiza taka, określająca m. in. wpływ geologicznego składowania CO<sub>2</sub> na środowisko, będzie musiała zawierać następujące elementy:

- zebranie danych dla składowiska i jego otoczenia (na które może wpływać składowisko), czyli tzw. kompleksu składowania, w tym danych geologiczno-geofizycznych, hydrogeologicznych, danych odnośnie inżynierii zbiornika (w tym szacunkowych pojemności składowania), geochemii, geomechaniki, sytuacji sejsmicznej, obecności naturalnych i sztucznych potencjalnych dróg ucieczki CO<sub>2</sub> z górotworu (w tym otworów wiertniczych), a także rozkładu populacji, cennych zasobów (takie jak przyrodnicze w tym NATURA 2000) oraz działalności górniczej prowadzonej w rejonie składowiska i dostępnoci różnic emisji dwutlenku węgla, w tym możliwości transportu (**1.1.14 Zebranie szczegółowych informacji geologicznych, geofizycznych, hydrogeologicznych, zóowych, geomechanicznych**)
- statyczne charakterystyk kompleksu składowania, czyli budowę jego trójwymiarowego modelu, obejmującą strukturę pułapki geologicznej, własności geochemiczne i geomechaniczne zbiornika oraz własności przepływu w zbiorniku, własności nadkładu i otaczających formacji, charakterystyk systemu spławy i antropogenicznych potencjalnych dróg CO<sub>2</sub>, poziomego i pionowego zasięgu kompleksu składowania, objętości i rozkładu porów, stanu wyjściowego pęknięć i innych związanych z tym cech (**1.1.15 Opracowanie szczegółowych statycznych modeli o rodka geologicznego składowisk**)
- charakterystyk dynamicznego zachowania dwutlenku węgla podczas składowania, w tym potencjalnego wydajności zatęczenia i wycięciwości strumienia CO<sub>2</sub>, efektywności modelowania zachodzących procesów, procesy reakcji ze skałami, charakterystyk i wyniki symulacji w perspektywie krótko i długoterminowej (**1.1.16 Modelowania dynamiczne procesów zatęczenia CO<sub>2</sub> do składowiska**)
- charakterystyk wycięciwości oceny na zacięciwość przyjęte dla poszczególnych parametrów dla ww. symulacji dynamicznego zachowania się dwutlenku węgla oraz ocen ryzyka geologicznego składowania dwutlenku węgla, w tym potencjalne drogi wycięciu, wielkość wycięciu, parametry krytyczne wpływające na potencjalny wycięcie, wtórne skutki składowania CO<sub>2</sub> i wszelkie inne zagrożenia dla zdrowia ludzi i środowiska, ocenę narażenia i skutków tych zagrożenia dla ludzi i środowiska oraz związane z tym scenariusze (**1.1.17 Zarządzenie ryzykiem geologicznego składowania CO<sub>2</sub>**).

Obok powyższych informacji, zgodnie z Dyrektywą (Załącznik Nr 2) do uzyskania koncesji na składowanie niezbędne jest przedłożenie właściwemu organowi **Planu monitorowania**, który ma

by aktualizowany w trakcie zatraczenia i po jego zakończeniu. W ramach niniejszego raportu i tematu w szczególności przedstawiono propozycje monitoringu stanu początkowego (zerowego) składowiska i zalecenia dla monitoringu na dalszych etapach realizacji projektu demonstracyjnego (**1.1.18 Opracowanie programu monitoringu dla wytypowanych składowisk**).

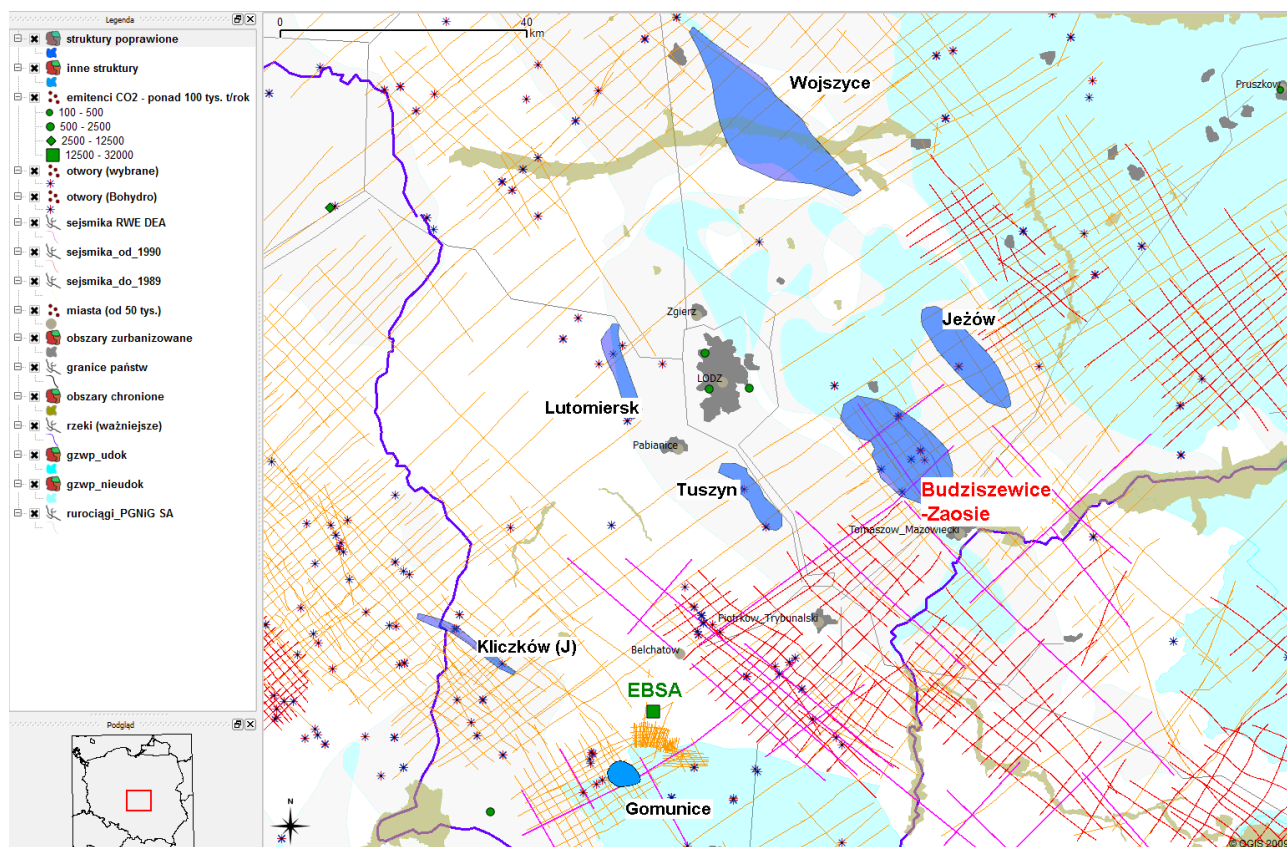


Fig. 1 Struktury analizowane w ramach I segmentu dla rejonu Bechatowa (raport merytoryczny: Wójcicki, 2009 (red.)). Kontury struktur (niebieskie) określono na podstawie map sejsmicznych formacji dolnej jury w skali 1:50 000.

W rezultacie prac wykonanych w ramach I segmentu dla rejonu Bechatowa do dalszych analiz wybrano struktur **Budziszewice-Zaosie** (Fig. 1 ó podstawowy kolektor to formacje piaskowców dolnej jury, drugorzędny pstry piaskowiec), dla której przeprowadzono wszystkie analizy przewidziane w zakresie ramowym dla II segmentu (patrz wyżej), na podstawie dostępnych materiałów archiwalnych. Struktura ta jest najlepiej rozpoznana otworami (6 otworów) i sejsmik (3 profile z lat 1999-2000, 6 profili z lat 1970-tych nadających się do wykorzystania) spośród wszystkich rozpatrywanych w rejonie Bechatowa. Nie spełnia ona idealnie wszystkich podrzeczniczych kryteriów przydatności na potencjalne składowisko dla projektu demonstracyjnego PGE Elektrownia Bechatów S.A., ale tylko dla niej można przeprowadzić wiarygodne analizy przewidziane w ramach II segmentu, w oparciu o dostępne materiały archiwalne.

Jako struktury/obiekty rezerwowe zaproponowano dla PGE EBSA kolejne struktury w rankingu: Lutomiersk i Wojszyce, które wydają się spełniać wspomniane kryteria nawet lepiej niż Budziszewice-Zaosie, ale to wynika z faktu, że są nieporównywalnie słabiej rozpoznane. Dla wspomnianych struktur rezerwowych przewidziano w najbliższym czasie wykonanie rozpoznawczych prac sejsmicznych (Nowak *et al.*, 2009a i 2009b) i odwiertenie po jednym otworze badawczym. Przewidziano w tym wykonanie jednego otworu w rejonie Pabianic, na SE od struktury Lutomiersk, w siedlisku tektonicznym, co umożliwia odpowiedź na pytanie na ile

bezpieczne może być geologiczne składowanie w utworach dolnej jury dla struktury Lutomierskiej i ewentualnie struktury Tuszyn (pomiędzy nimi wg map geologicznych w skali 1:500 000 występuje w rejonie Pabianic niewielkie podniesienie w permie, ale nie wiadomo czy odpowiada temu struktura w dolnej jurze) oraz jednego w szczytowej partii NW części struktury Wojszyce, w obrębie której brak jest otworów nawiercających jurę (siedzi dopiero w jej siedztwie). Po wykonaniu powyższych prac i opracowaniu ich wyników struktury te będą rozpoznane w porównywalnym stopniu jak struktura Budziszewice-Zaosie. Na potrzeby projektu demonstracyjnego zostanie wtedy wybrana przez PGE EBSA jedna z trzech struktur/obiektów, uwzględniając nie tylko informacje geologiczne ale także możliwe konflikty interesów (głębokie rezerwowe zbiorniki wód podziemnych, koncesje naftowe, możliwe i koszty transportu rurociągi, ewentualny opór mieszkańców i właścicieli gruntów).

Jako rozszerzenie niniejszego raportu (a konkretnie zadania **1.1.18**) sporządzono projekt prac geologicznych na potrzeby monitoringu potencjalnego składowiska projektu demonstracyjnego PGE EBSA w Budziszewice-Zaosie, którego szczególne charakterystyki przedstawiono w rozdziałach **1.1.14** i **1.1.17** oraz projekty prac geologicznych na wiercenie otworów do pilota owego zatęszczania dwutlenku węgla (Modliński et al., 2009a i 2009b).

Projekty prac geologicznych na wiercenie otworów do pilota owego zatęszczania dwutlenku węgla sporządzono, zgodnie z prośbą Ministerstwa Środowiska dla lokalizacji w bezpośrednim siedztwie otworów badawczych PGE EBSA przewidzianych do wykonania na strukturach/obiektach Lutomierskiej i Wojszyce. Dla jednej z tych lokalizacji (tam gdzie ruszy wiercenie pierwszego otworu badawczego) zostanie przeprowadzone testowe zatęszczanie dwutlenku węgla (prawdopodobnie do 40 tys. ton), jeszcze przed wyborem optymalnej struktury i składowiska przez PGE EBSA. Testowe zatęszczanie to inicjatywa Ministerstwa Środowiska mająca na celu stworzenie krajowego laboratorium badawczego dla geologicznego składowania CO<sub>2</sub> w poziomach wodonośnych solankowych i analogicznego jak eksperyment Ketzin w Niemczech. Podobnie jak w Ketzin lokalizacja testowego zatęszczania nie będzie odpowiadać lokalizacji na potrzeby projektu demonstracyjnego (jeśli nawet spośród trzech struktur zostanie wybrana przez PGE EBSA docelowo ta sama co do testowego zatęszczania, to będzie to inna część struktury i raczej składowiska niż szczytowa partia), ale za to dostarczy cennych informacji *in-situ*, które będą użyteczne dla wszystkich innych struktur o podobnych warunkach geologicznych występujących w tym rejonie.

## 1.1.14 ZEBRANIE SZCZEGÓŁOWYCH INFORMACJI GEOLOGICZNYCH, GEOFIZYCZNYCH, HYDROGEOLOGICZNYCH, ZÓLOWYCH, GEOMECHANICZNYCH

Prace wykona zespół obejmujący wszystkich partnerów konsorcjum (PIG-PIB, AGH, GIG, IGSMiE PAN, INiG i PBG).

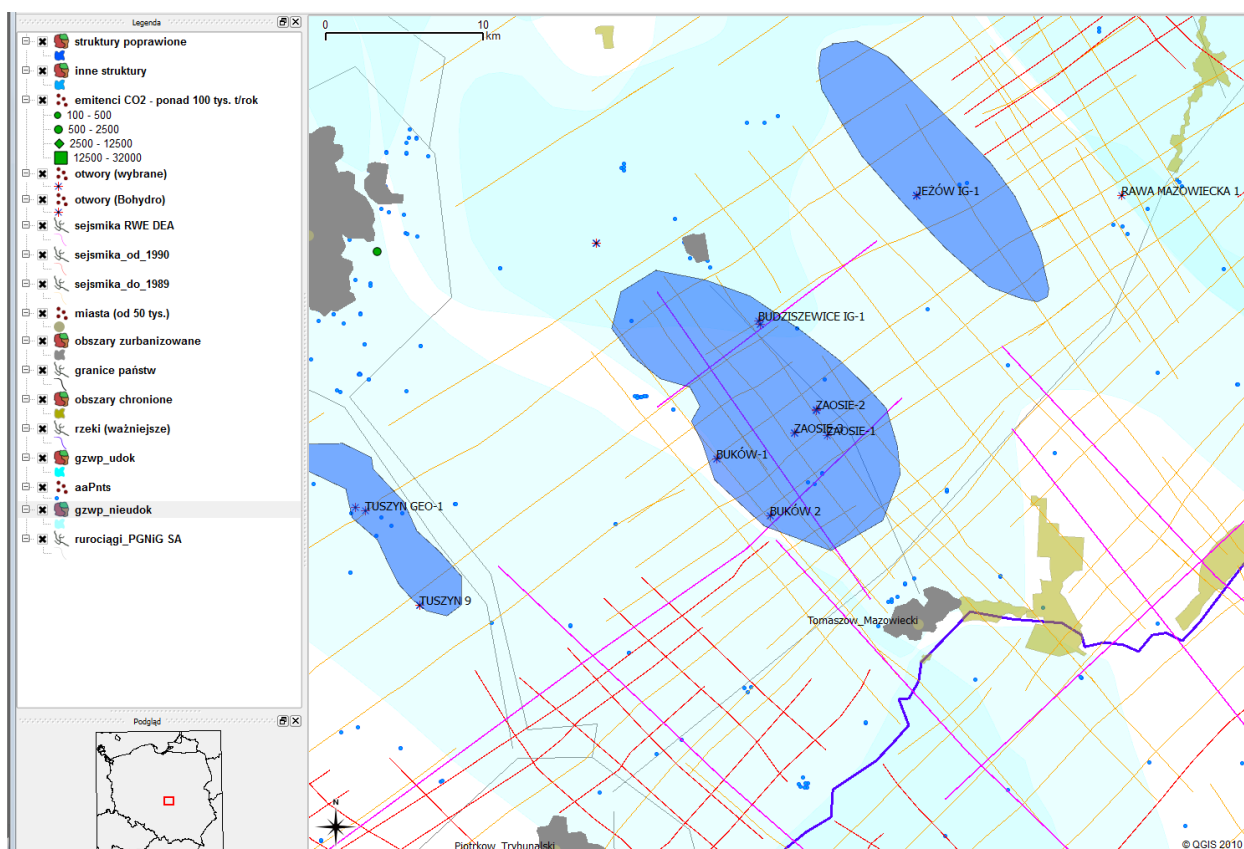
W ramach tego zadania opracowano, na podstawie zgromadzonych informacji geologicznych, geofizycznych, hydrogeologicznych, zólowych, geomechanicznych, wstępnych charakterystyk obszaru potencjalnego składowiska i jego otoczenia. Opracowano przy tym bazę informacji dotyczących struktury Budziszewice-Zaosie i przeanalizowano następujące problemy:

- występowanie zagrożenia sejsmicznego (brak naturalnych trzęsień Ziemi o magnitudzie ponad 4 stopnia w skali Richtera w tym rejonie Niżu Polskiego w ciągu ostatnich 800 lat ów wg. <http://www.staff.amu.edu.pl/~sgp/gw/tzpl/gwtzpl.html>; na obszarze kopalni węgla brunatnego Bełchatów ó 60 km na SE, w roku 1980 wystąpił trzęsienie o magnitudzie 4.6 Richtera spowodowane działalnością górniczą);
- możliwość wycieków dwutlenku węgla ze składowiska (przeanalizowano to generalnie w raporcie z I Segmentu ó Wójcicki, 2009 ó brak wadliwych stref uskokowych przecinających nadkład kolektorów dolnej jury wyklucza wycieki na większą skalę, natomiast problemem może być lokalnie szczelność starych, zlikwidowanych otworów nawierczających dolną jurę oraz jako ich wytrzymałość nadkładu uszczelniającego);
- możliwość oddziaływania wytypowanego podziemnego składowiska dwutlenku węgla na bezpieczeństwo i zdrowie ludzi oraz środowisko (ewentualne awarie na miejscu zatępczenia mogą wpłynąć na bezpieczeństwo i zdrowie ludzi na powierzchni, a niedostateczna jakość wytrzymałości nadkładu uszczelniającego może spowodować przedostanie się dwutlenku węgla do głębszych kolektorów, zawierających wody wydźwignięte i słodkie, a więc potencjalnie użytkowe);
- występowanie konfliktów interesów odnośnie wykorzystywania składowiska (odległość od cennych zasobów naturalnych, w tym chronionych ostoi fauny i flory, zasobów wód użytkowych i wód podziemnych; w rejonie potencjalnego składowiska nie prowadzi się podziemnej eksploatacji zasobów surowców mineralnych; występuje tu górnojurajski niedokumentowany GZWP Koluśki-Tomaszów o głębokości ujęć dochodzącej do 200 metrów ó ale ujęcia te znajdują się poza kulminacją struktury; na SE od obrysu struktury znajduje się obszar zurbanizowany Tomaszowa Mazowieckiego, na NW miasto Koluśki, a w obrysie par mniejszych skupisk miejskich i wiejskich; obszary chronione NATURA 2000 znajdują się poza obrysem struktury, w rejonie Tomaszowa Mazowieckiego ó patrz Rys. 1.1.14.1 i 1.1.14.5), dostępną przemysłową produkcję dwutlenku węgla (będzie to w pierwszej kolejności instalacja demonstracyjna PGE Bełchatów, ale w ścisłym sąsiedztwie potencjalnego składowiska mamy jeszcze aglomerację Łódź);
- możliwość transportu strumienia dwutlenku węgla siecią rurociągową do potencjalnego składowiska (brak jest poważniejszych przeszkód na drodze z elektrowni Bełchatów do rejonu Budziszewice-Zaosie, natomiast ostateczne wytyczenie trasy wymaga będzie uzgodnień pomiędzy inwestorem a właścicielami gruntów).

### **Analizy danych z otworów wiertniczych (PIG-PIB, AGH, GIG)**

W rejonie badań znajduje się 5 otworów o głębokości ponad 3000 metrów, przewierczających całe mezozoikum (Budziszewice IG-1, Buków-1, Buków-2, Zaosie-1, Zaosie-3) oraz jeden sięgający do ródki triasu (Zaosie-2). Otwory te zostały odwiercone w latach 1978-1989. Otwory te są

stosunkowo dobrze opróbowane i dostępne dla nich bogate informacje geologiczne (patrz Tabela 1.1.14.1), zarówno archiwalne jak i nowe, opracowane w ramach niniejszego tematu. Ponadto na siedniej strukturze Je ów mamy doskonale opróbowany otwór Je ów IG-1 (Rys. 1.1.14.1).



Rys. 1.1.14.1 Struktura Budziszewice-Zaosie.

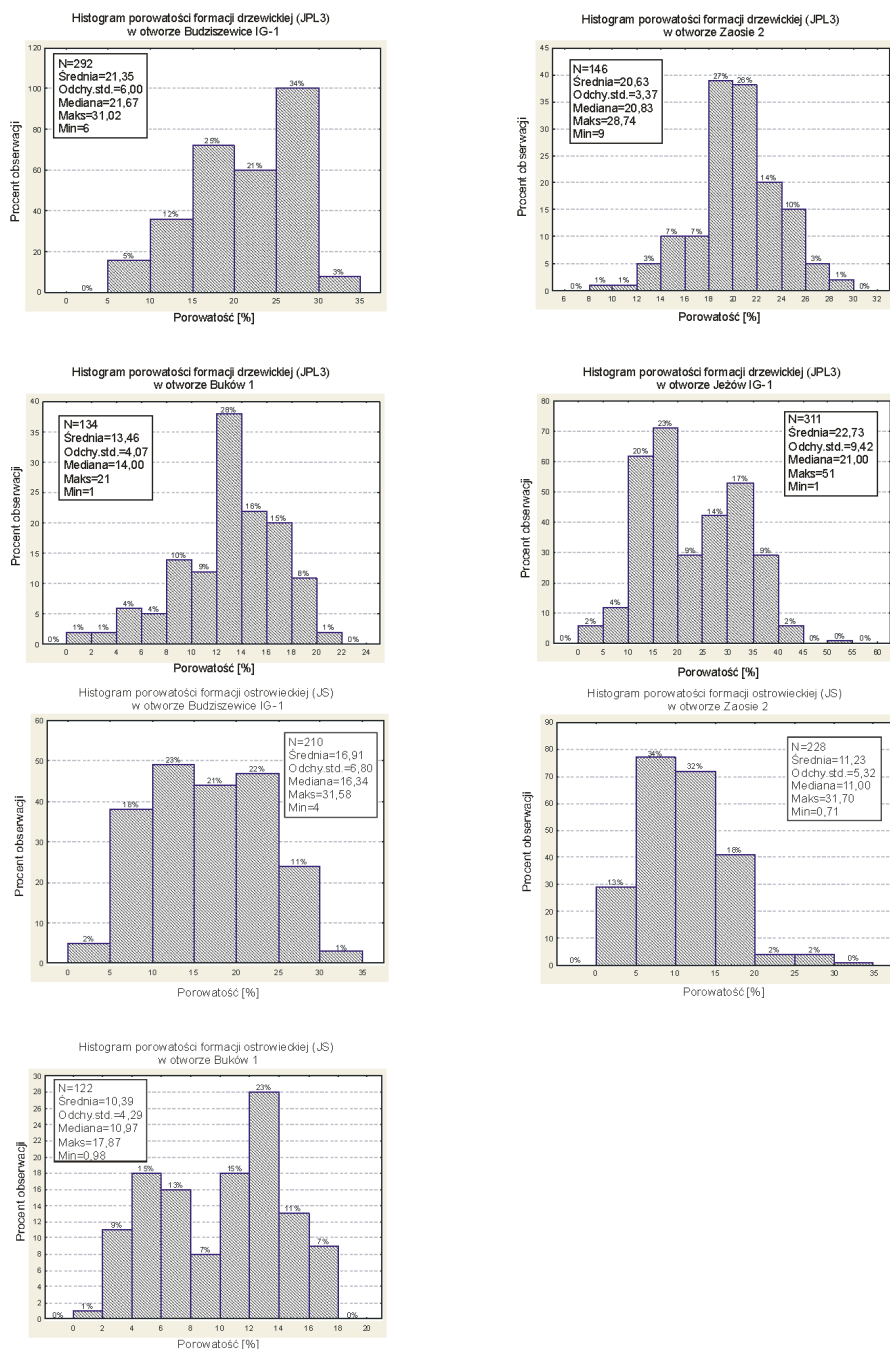
Tabela 1.1.14.1 Baza informacji o otworach.

Otwór	Budziszewice IG-1	Buków-1	Buków-2	Zaosie-1	Zaosie-2	Zaosie-3
Rdzenie			analizowano	analizowano	analizowano	
Geofizyka wiertnicza	archiwalne, reinterpretacja	archiwalne, reinterpretacja	archiwalne	archiwalne	archiwalne, reinterpretacja	archiwalne
Analizy petrofizyczne		archiwalne	nowe	archiwalne, nowe	archiwalne, nowe	archiwalne
Analizy petrograficzne			nowe	nowe	nowe	
Analizy hydrogeologiczne	archiwalne	archiwalne	archiwalne			archiwalne

Otwory Buków-1,2 i Zaosie-1,2,3 odwiercił PGNiG. Dla otworu Buków-1 zainwentaryzowane archiwalne analizy petrofizyczne PGNiG (INiG) nie obejmują podstawowego systemu sekwencyjnego dolnej jury, a jedynie utwory triasu (w tym drugorzędny system triasu dolnego) i permu. Natomiast w przypadku otworu Buków-2 mamy wyniki archiwalnych pomiarów porowatości próbek rdzeni kolektorów dolnej jury oraz dla piaskowców górnego pliensbachu porowatość efektywna wynosi średnio 14%. Piaskowce dolnego triasu mają porowatość i efektywne



wynosz ce rednio 8% a przepuszczalno ci na ogóŁbardzo niskie, w jednym przypadku rz du 20-30 mD. Dla otworu Zaosie-2 porowato ci efektywne piaskowców górnego pliensbachu wynosz rednio 23% a porowato ci ponad 300 mD. Dla piaskowców synemuru i hettangu porowato ci efektywne wynosz 18% a przepuszczalno ci 200-300 mD. W otworze Zaosie-3 piaskowce synemuru i hettangu maj porowato ci efektywne rednio 17% a przepuszczalno ci rz du 300 mD. Natomiast piaskowce dolnego triasu maj porowato ci efektywne wynosz ce rednio 4%. Nowe pomiary parametrów petrofizycznych zostaŁy wykonane przez INiG w ramach zadania 1.3.2 (patrz raport I Segmentu ó Wójcicki, 2009) na próbkach skaŁ rodkowej i dolnej jury oraz górnego triasu z otworów Buków-2, Zaosie-1 i Zaosie-2. W otworze Buków-2 otrzymano dla piaskowców synemuru i hettangu redni warto porowato ci caŁkowitej 14% a w otworze Zaosie-2 ó 20%. Piaskowce górnego pliensbachu maj wedŁg nowych analiz redni warto porowato ci caŁkowitej 25%.

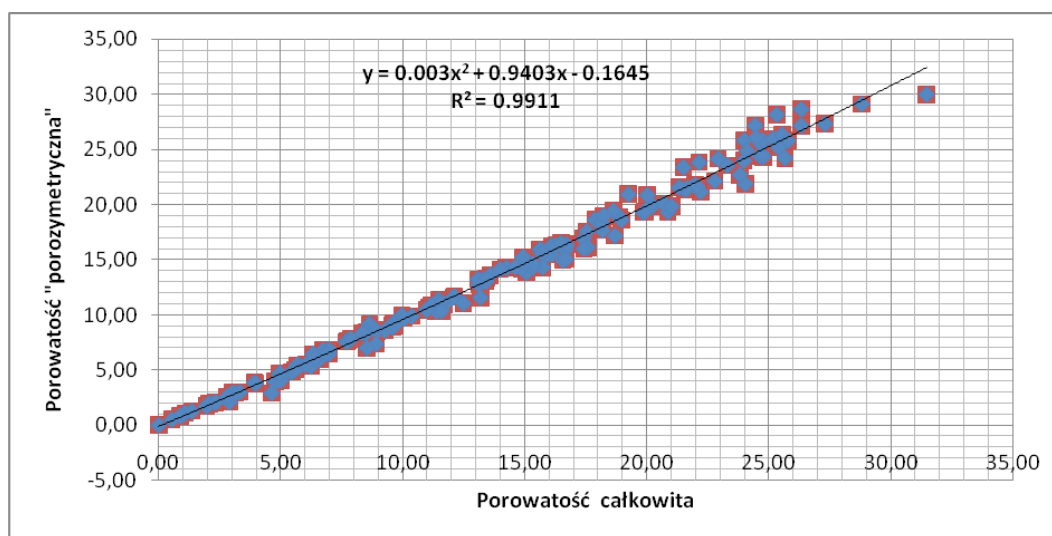


Rys. 1.1.14.2 Wyniki analiz porowato ci caŁkowitej na podstawie krzywych geofizyki wiertniczej.

Z kolei **GIG** wykonał analizy parametrów zbiornikowych (Rys. 1.1.14.2) pod kątem rozprzestrzeniania się CO<sub>2</sub> w mediach złożowych, w oparciu o wyniki interpretacji krzywych geofizyki wiertniczej wykonane przez PIG-PIB (skalibrowane w oparciu o wyniki nowych i archiwalnych analiz laboratoryjnych parametrów petrofizycznych).

Otrzymane wartości porowatości całkowitej wynoszą 18% dla górnego piaskowca i 13% dla syntymuru i hektangu.

Prace **AGH** obejmują wyznaczenie zależności funkcyjnych wartości zbiornikowych jury. Dla szerszego obszaru, obejmującego rejon Budziszewice-Zaosie z szerokim marginesem. Otrzymana zależność pomiędzy porowatością całkowitą ( $x$ ) a wartością porowatości "z porozymetru" (odpowiada ona w przybliżeniu porowatości efektywnej  $\phi$  ( $y$ )) jest prawie liniowa:  $y = 0.003 \cdot x^2 + 0.9403 \cdot x - 0.1645$  (Rys. 1.1.14.3).

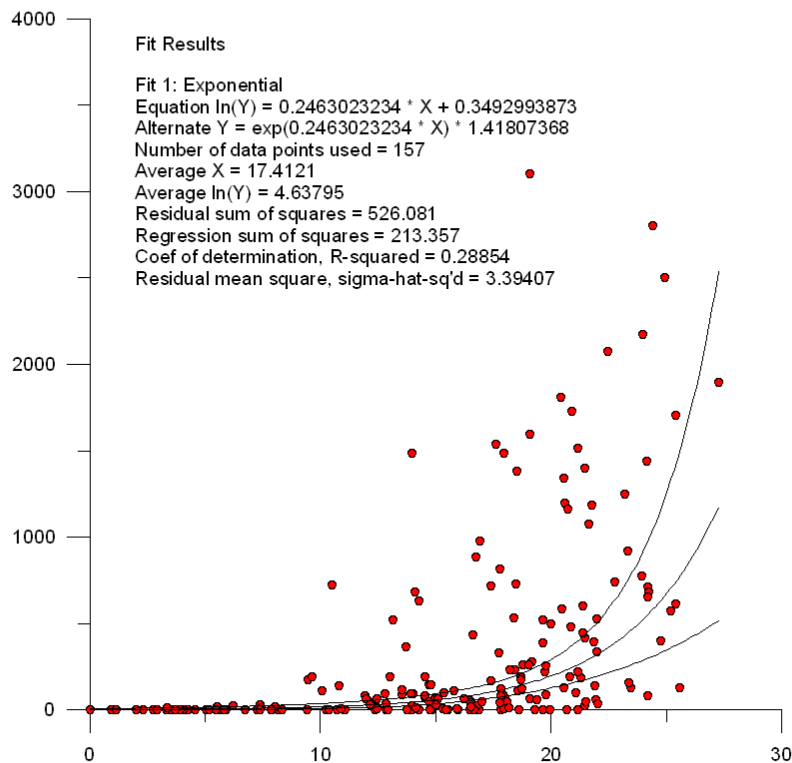


Rys. 1.1.14.3 Wykres zależności pomiędzy porowatością "porozymetryczną" a całkowitą.

Przeprowadzono szereg analiz dopasowania porowatości efektywnej i przepuszczalności poziomej. Dla kolektorów, gdzie występują piaskowce i mułowce nie udało się uzyskać dobrego dopasowania (patrz Rys. 1.1.14.4). Sytuację polepszyło podzielenie populacji próbek na te o niskiej i wysokiej porowatości (krzywe dolna i górna na rysunku, a po średnia to sumaryczna).

Trzecie zagadnienie analizowane przez **AGH** dotyczy zależności porowatości efektywnej  $\phi$  i jeszcze innego parametru  $\phi$  nasycenia resztkowego skały wodnej  $S_{wi}$ , która jest funkcją ciśnienia kapilarnego i zawilżalności skały (Zawisza, 1993). Nasycenie resztkowe skały wodnej zależy przede wszystkim od wielkości porowatości, od konfiguracji porów, od stopnia cementacji (związanej z  $\phi$ ), od rodzaju skały, a także od zawilżalności oraz, w przypadku skał piaszczysto-ilastych, od wielkości zailenia. Dla wartości  $S_{wi}$  zbiornikowych wynosi od 10% do ponad 30%. Przy zastosowaniu specjalnego programu symulacyjnego, w oparciu o dane laboratoryjne oraz dane pochodzące z testów hydrodynamicznych otrzymano następujący model pozwalający na prognozowanie współczynnika przepuszczalności absolutnej dla utworów jury dolnej:  $k = 195 \cdot 10^3 \phi^{3,15} (1 - S_{wi})^2$ .

Spośród parametrów geomechanicznych górotworu najistotniejsze jest wyznaczenie tzw. ciężkości progowej, czyli maksymalnego dopuszczalnego (dodatkowego) ciśnienia wywołanego przez zatępienie dwutlenku w głą do kolektora, które nie powoduje jeszcze przesunięcia się CO<sub>2</sub> przez przestrzenie kapilarne nadciśnieniem (tzw. capillary entry pressure). Wg danych literaturowych istnieje prosta zależność liniowa tego parametru od ilorazu porowatości i przepuszczalności.

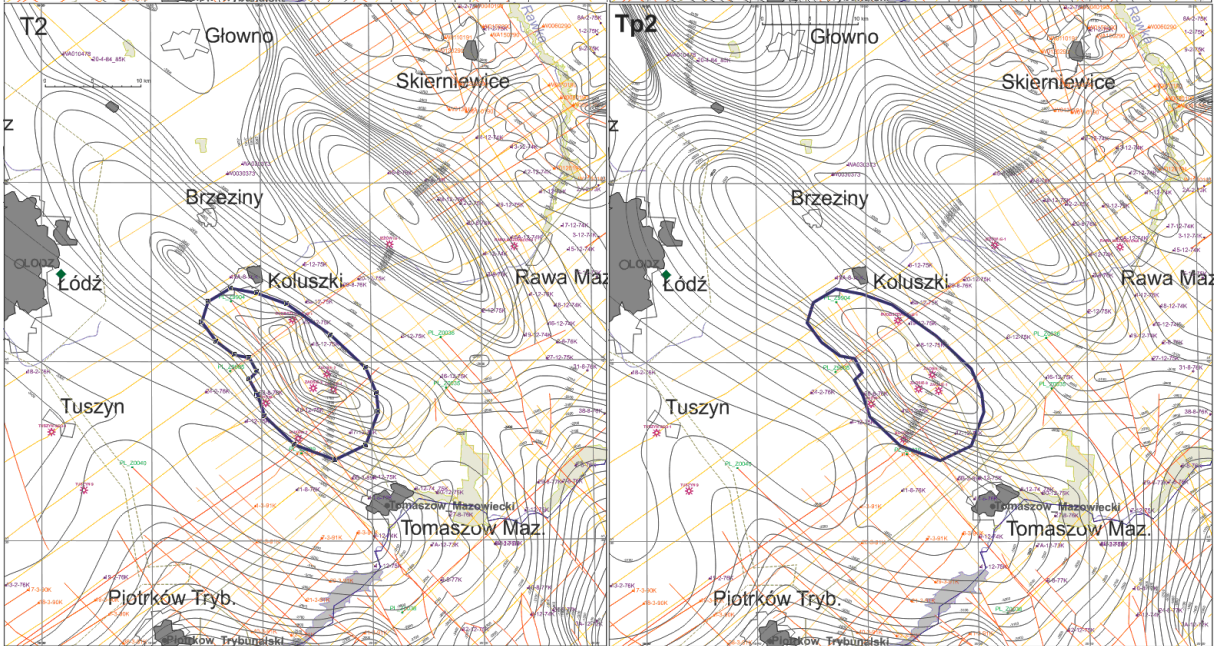
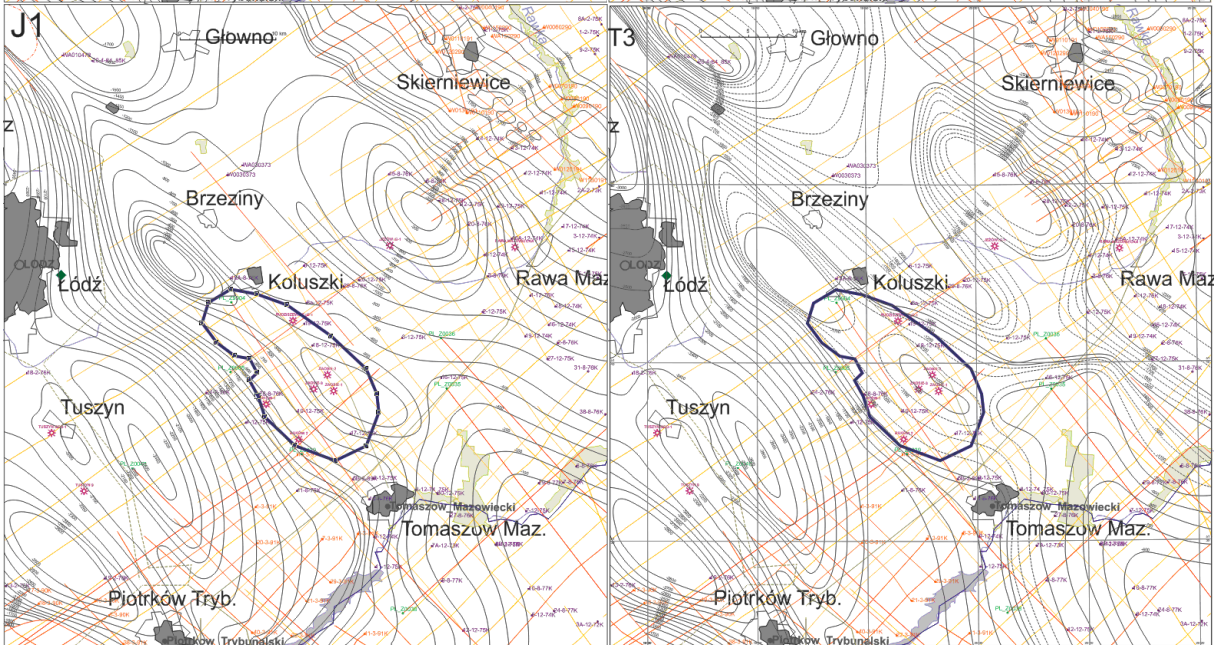
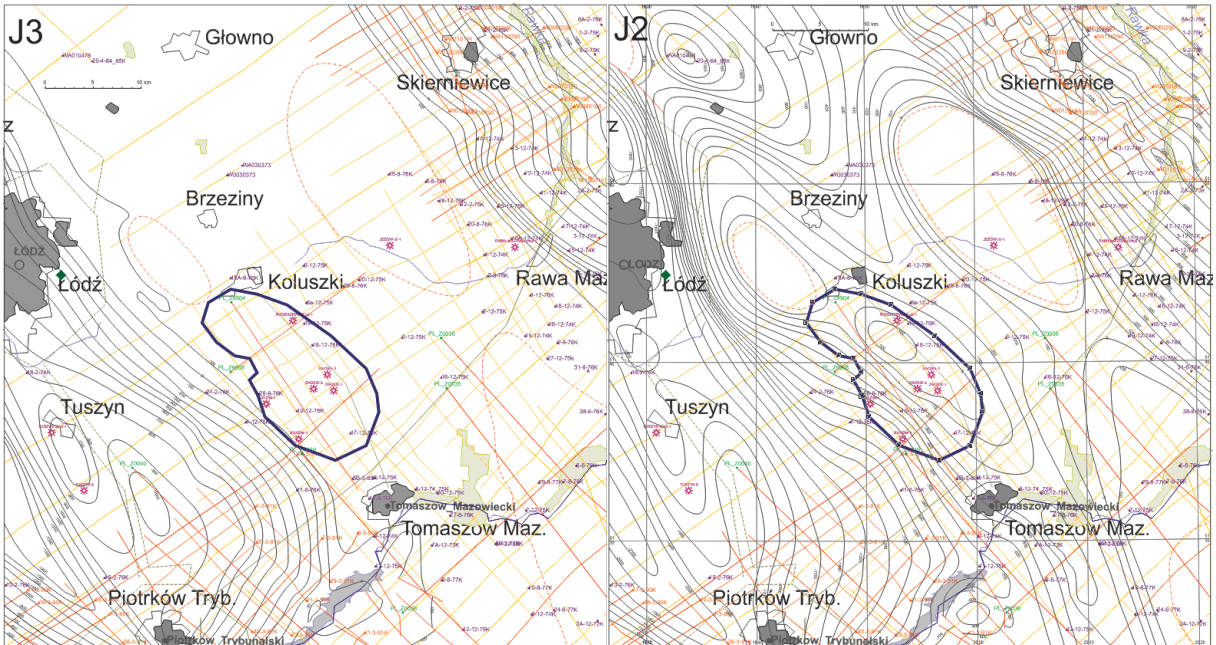


Rys. 1.1.14.4 Korelacja pomiędzy obliczoną porowatością efektywną (X) a przepuszczalnością poziomą (Y) dla utworów jury dolnej i kredowej (piaskowce i mułowce, dopasowanie wykładnicze).

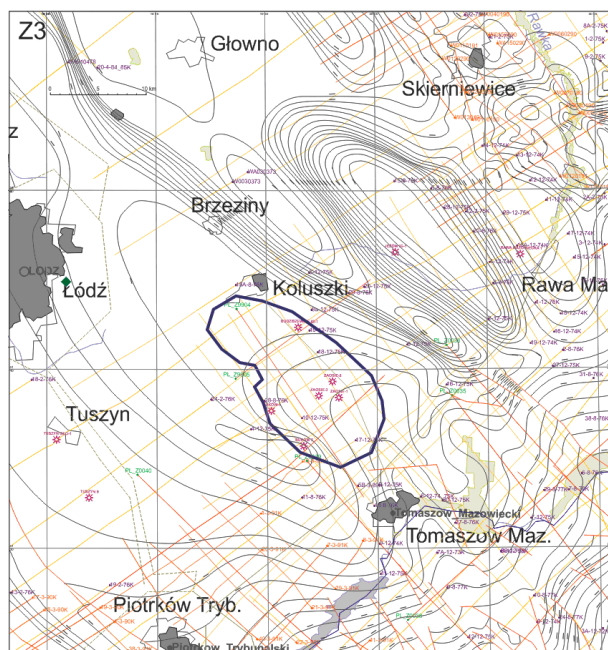
### **Mapy sejsmiczne formacji mezozoiku oraz wyniki innych badań geofizycznych (PIG-PIB, PBG)**

W ramach niniejszego zadania scharakteryzowano również geometrię formacji mezozoiku, tzn. opracowano na podstawie materiałów archiwalnych mapy strukturalne granic sejsmicznych. Komplet map (przedstawiony na Rys. 1.1.14.5) składa się z 7 głębokościowych map strukturalnych powstałych na podstawie map sejsmicznych. Prace związane ze skonstruowaniem tych map dotyczą weryfikacji map sejsmicznych wykonanych wcześniej w ramach Projektu badawczego KBN (Dziwińska & Petecki, 2004) oraz opracowania nowych map poszerzających obszary w kierunku zachodnim i północnym. Obszar badań (Rys. 1.1.14.5) zawarty jest między południkami 19°27' - 21°30' oraz równoleżnikami 51°00' - 52°00'. Podstawowy materiałowy wykorzystany do konstrukcji map stanowi głównie dokumentacja sejsmiczna. Źródłem informacji o głębokościach zalegania poszczególnych pięter geologicznych były dane z otworów wiertniczych znajdujących się w obrębie map ew. w ich najbliższym sąsiedztwie. Najwcześniejsze badania sejsmiczne dotyczą lat 70 i 80-tych. Nowsze, o większej wadze zrealizowane w ramach tematu dotyczącego N-W obrzeżenia Gór Wiatrowskich pochodzą z lat 90-tych. Do najnowszych (r. 1997) należy reinterpretacja materiałów sejsmicznych z rejonu Piotrków Trybunalski-Rawa Mazowiecka wykonana dla potrzeb firmy Amoco oraz prace sejsmiczne na koncesji RWE Dea, których wyniki nie były jednak dostępne w chwili opracowywania niniejszych map. W części N-E sporządzenie map umożliwiło opracowanie z rejonu Skierniewice-Nowy Kawęczyn w ramach tematu Justynów-ychlin-Skierniewice-Jeńców (1990/91) obejmujące oprócz wykonania nowych profili również reinterpretację profili z lat ubiegłych. Mimo braku zaliczonej jako podstawowych materiałów sejsmicznych dokonana analiza pozwoliła na przyporządkowanie poszczególnych granic sejsmicznych odpowiednim utworom geologicznym.









Rys. 1.1.14.5 Mapy strukturalne formacji geologicznych mezozoiku (poziomem odniesienia dla izolinii jest poziom morza).

W kompleksie mezozoicznym zostały skonstruowane następujące mapy:

1. Strop jury górnej (malm - J<sub>3</sub>)
2. Strop jury środkowej (dogger - J<sub>2</sub>)
3. Strop jury dolnej (lias - J<sub>1</sub>)
4. Strop triasu górnego (retyk - Tr)
5. Strop triasu środkowego (wapień muszlowy - Tm)
6. Strop środkowego piaskowca (Tp<sub>2</sub>)
7. Strop cechszyny (Z3); przystropowa czarna anhydrytu głównego cyklotemu Leine, w przybliżeniu sp. g. mezozoiku.

Z powodu bardzo skomplikowanej tektoniki rejonu, informacje sejsmiczne o zmianach miąższości poszczególnych kompleksów geologicznych należy uznać za szczególnie znaczące w procesie konstrukcji map strukturalnych. W szczególności obserwowana jest duża zmienność miąższości poszczególnych pieter triasu, która w największym stopniu dotyczy piaskowca.

Jeśli chodzi o wyniki innych badań geofizycznych to dane grawimetryczne i magnetyczne dostępne na całym obszarze obejmującym strukturę Budziszewice-Zaosie wraz z otoczeniem (analiza **PBG**). Obszar ten zajmuje powierzchnię 43 200 km<sup>2</sup>. Wyniki pomiarów grawimetrycznych obrazują rozkład gęstości ośrodka geologicznego. Pomiarów grawimetrycznych na obszarze badań zostały wykonane w latach 60, 70 i 80 ubiegłego wieku (a nawet przed drugą wojną światową, ale te ostatnie mają obecnie jedynie wartość historyczną). Są to przeważnie pomiary punktowe a lokalnie szczegółowe. Średnia gęstość pomiarów wynosi ok. 3 pkt/km<sup>2</sup>. Pomiarów magnetycznych zostały wykonane w latach 90 ubiegłego wieku i na początku tego wieku biegnącego ze średnią gęstością 2.5 pkt/km<sup>2</sup>. Ich wyniki obrazują rozkład wartości magnetycznych ośrodka geologicznego, co w rejonie struktury Budziszewice-Zaosie może mieć jedynie zastosowanie do ledzenia głębokiego podłoża, a nie formacji mezozoicznych.

Informacje o wartościach elektrycznych są zgromadzone w zbiorach danych geofizyki wiertniczej (tzn. chodzi o wyniki interpretacji krzywych geofizyki wiertniczej). Na oporność skały (podstawowa wartość elektryczna) ma wpływ, obok litologii, zasolenie wód złożonych występujących w przestrzeniach porowych skały. Do przetwarzania danych opornościowych

wykorzystuje się na ogół profilowanie oporności sterowane (laterolog). W przypadku niekompletnych tych danych można także wykorzystać profilowanie oporności sond gradientowych M0.5A0.1B. W rejonie rozpatrywanej struktury Budziszewice odnośne dane profilowa elektrycznych geofizyki wiertniczej zawarte są we wszystkich sześciu otworach: Budziszewice IG-1, Buków-1, Buków-2, Zaosie-1, Zaosie-2, i Zaosie-3.

## **Oddziaływania CO<sub>2</sub>-skała-płynny złoże (IGSMiE PAN)**

Z kolei IGSMiE PAN wykonał analizy dotyczące oddziaływania CO<sub>2</sub>-skała-płynny złoże. Niezbędne przy tym było wykonanie badań mineralogiczno-petrograficznych pod kątem badania modelowania oddziaływania CO<sub>2</sub> na skały zbiornikowe i skały nadkrytycznej, dla 8 próbek z otworów Buków-2 i Zaosie-2. Próbkę pochodzących z kolektorów i nadkrytycznej uszczelniającego w obrębie dolnej jury. Zostały przeprowadzone następujące badania: mikroskopowe badania w świetle przechodzącym, elektronowe badania mikroskopowe SEM z analizą EDS, analizy rentgenowskie próbek skalnych oraz wydzielonych z nich frakcji ilastych, analizy morfologii ziarn wybranych do badania próbek skalnych, analizy planimetryczne oraz analizy rednicy ziarn. Wyniki badania wykorzystano do modelowania geochemicznych procesów oddziaływania CO<sub>2</sub>-skała-płynny złoże przy użyciu programu Geochemist's Workbench 7.0.1 (GWB).

Obserwacje mikroskopowe w świetle przechodzącym przeprowadzono przy użyciu mikroskopu polaryzacyjnego JENALAB firmy Karl Zeiss Jena. Do obserwacji wykorzystano teleskopowy mikroskop elektronowy z emisją polową Hitachi S-4700 wyposażony w system do analizy w mikroobszarze EDS typu Vantage Noran, jak również w detektor elektronów wstecznie rozproszonych (YAG BSE). Do obserwacji w SEM-EDS wykorzystano uniwersalne polerowane próbki cienkie (o standardowej grubości 0,02 mm). Probki te przed obserwacjami napylono w glem. Probki skał do analizy rentgenowskiej pokruszono, uśredniono a następnie niewielką ilość z próbek utarło w moździerzu. Z tak przygotowanego materiału sporządzono preparaty do rentgenowskiej analizy dyfrakcyjnej, z zastosowaniem dyfraktometru DRON-3.0. Stosowano promieniowanie Cu K $\alpha$  ( $\lambda = 1,54062 \text{ \AA}$ ) oraz filtr niklowy. Analizy dla frakcji ilastych zarejestrowano w warunkach powietrznie suchych (Na), po nasyceniu parami glikolu etylenowego (glikol) (12h w temp 60°C) jak również po wygrzaniu (min. 1h) w temperaturze 550°C. Frakcję ilastą wydzielono metodą sedymentacyjną.

Zasadnicze znaczenie dla procesów oddziaływania CO<sub>2</sub>-skała-płynny złoże ma reakcja pomiędzy CO<sub>2</sub> a wodami podziemnymi, prowadząca do powstawania kwasu węglowego. Jest to uzasadnione faktem, iż głównie fazy znajdujące się w roztworze, nie zaś cząsteczkowa (nadkrytyczna/ciekła) forma CO<sub>2</sub>, mogą oddziaływać z matrycą skalną poziomów wodonośnych. Kolejne zjawisko - dysocjacja kwasu węglowego powoduje obniżenie pH roztworu, którego maksymalna wartość osiągnięta jest przy temperaturze około 50°C (Rosenbauer et al, 2005), zatem przy odpowiednio niskich temperaturach podwyższona dostępność jonów H<sup>+</sup> umożliwia intensywniejszy hydrolyz minerałów matrycy skalnej. Dysocjacja kwasu węglowego zapoczątkowuje kolejne reakcje (w których uczestniczą matryca skalna oraz płynny złoże) prowadzące do wiązania CO<sub>2</sub> w fazach mineralnych, będących znajdujących się w roztworze.

Na podstawie tych danych dokonano modelowania kinetycznego zachodzących w środowisku geologicznym formacji reprezentowanych przez próbki, pobrane z otworów Zaosie 2 i Buków 2, podczas zatłaczania CO<sub>2</sub> oraz w okresie po zakończeniu tego procesu. Posłużono się metodami sprawdzonymi w realizacji innych prac o zbliżonym charakterze (np. Labus, 2008 a,b,c; Labus 2009). Dopuszczalnym uproszczeniem, dla przyjętych temperatur oraz wartości ciśnienia, okazało się nieuwzględnianie w reakcjach fazy nadkrytycznej CO<sub>2</sub> (która i tak praktycznie nie reaguje z matrycą skalną). Rozpatrywano jedynie fazy gazową oraz CO<sub>2</sub> (aq) rozpuszczoną w wodzie. W modelowaniu reakcji kinetycznych uwzględniono, że szybkość reakcji oparta na odpowiednich wartościach stałych reakcji. Procedura ta umożliwia obliczenie czasu w jakim system

(skała-gazówoda) rozpoczyna blokowanie wprowadzonego do niego CO<sub>2</sub> w formie faz mineralnych oraz oszacowanie momentu w jakim osiągnie stan ustalony lub równowag dynamicznych.

Przedstawione obliczenia nie biorą pod uwagę, mogącego wynikać z gradientów ciśnienia lub gęstości, przepływu mediów w obrębie poziomu wodonośnego. Uzyskane rezultaty pozwalają na prześledzenie wpływu kolejnych parametrów m.in. Aktywności ciśnieniowej, składu matrycy skalnej, tempa reakcji, na wiązanie CO<sub>2</sub> oraz jego efekty (krystalizacja oraz rozpuszczanie faz mineralnych i transformacje przestrzeni porowej) w górotworze. Wykorzystane oprogramowanie wymaga aby wartości ciśnienia CO<sub>2</sub> zostały wprowadzone jako aktywność ciśnieniowa -  $f_{CO_2}$  (*fugacity*). Zakładano wartości ciśnienia CO<sub>2</sub> dla odpowiednich głębokości przyjęto na poziomie odpowiadającym stanowi hydrostatycznemu, a wartości aktywności ciśnieniowej obliczono na podstawie równania stanu wg Duan et al. 1992.

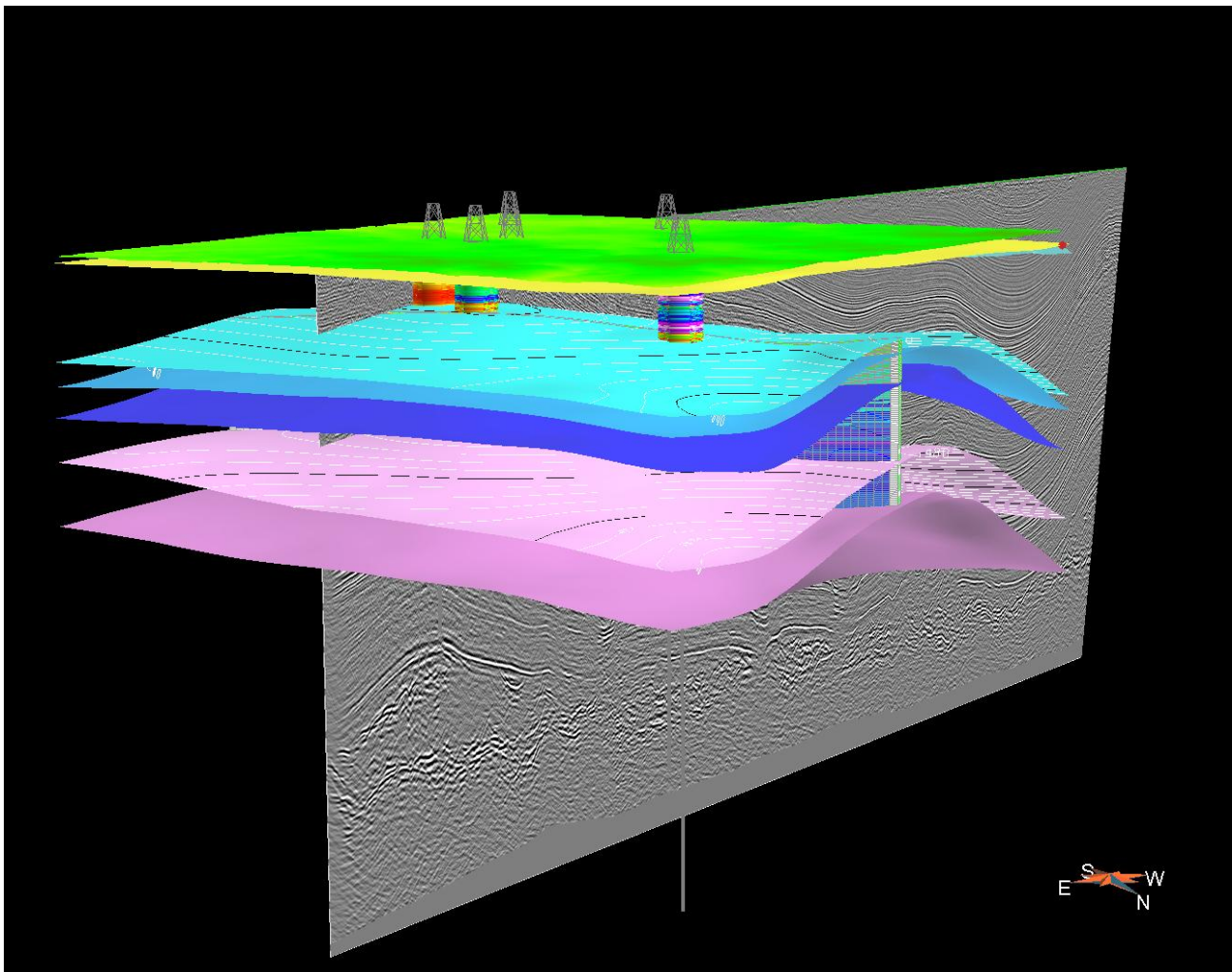
Modelowanie geochemiczne miało na celu określić oddziaływanie CO<sub>2</sub> na badane skały. W badaniach tych uwzględniono dwa etapy. Pierwszy odpowiadający reakcjom krótkotrwałym (100 dni), drugi odpowiadający długotrwałym reakcjom kinetycznym CO<sub>2</sub> z matrycą skalną odbywającej się po zatępieniu dwutlenku w głąb.

W rozpatrywanych układach gaz-woda-skała, w objętym modelowaniem przedziale czasu równym 20 000 lat, fazami mineralnymi umożliwiającymi przechwytywanie CO<sub>2</sub> są dawsonit, syderyt, kalcyt lub dolomit (dla początkowych 100 dni od rozpoczęcia zatępienia występują na niewielka skalę reakcje rozkładu kaolinitu, anortytu i goethytu zależnie od litologii próbki óczy (czy mamy przewagę piaskowców czy mułowców i iłowców). Mineralna pojemność sekwestracyjna obliczona na podstawie rezultatów modelowania wynosi dla piaskowców od 0,0 do 11,1 kg/m<sup>3</sup> formacji. Dla analizowanych skał drobnoklastycznych mineralna pojemność sekwestracyjna wynosi od 0,9 do 15,4 kg/m<sup>3</sup> formacji (Tabela 1.1.14.2). Zmiany porowatości skał obserwowane dzięki badaniom modelowym są niewielkie w przypadku piaskowców. Znacznie wyraźniej zaznacza się wzdłużny spadek porowatości w skałach drobnoklastycznych ó dla dwóch próbek iłowców (Zaosie-2) sięgający odpowiednio 40 i 30%. Zjawisko to może mieć korzystne znaczenie z punktu widzenia węższości uszczelniających wymienionych skał. Otrzymane wyniki dowodzą, iż w obrębie analizowanych formacji występuje poziomy o wysokiej pojemności sekwestracyjnej - perspektywiczne z punktu widzenia składowania dwutlenku w głąb. Pełna ocena przydatności analizowanej przestrzeni geologicznej do składowania CO<sub>2</sub> wymaga jednak określenia zmienności jej cech petrofizycznych i petrologicznych.

Tabela 1.1.14.2 Sekwestracyjna pojemność mineralna i w roztworze dla formacji reprezentowanych przez analizowane próbki skał

		Zaosie 2						Buków 2	
		6870	6871	6872	6873	6874	6877	6892	6893
		piaskowiec	piaskowiec	piaskowiec	iłowiec	iłowiec	mułowiec	piaskowiec	mułowiec
		1	2	3	4	5	6	7	8
Porowatość	$n_p$ - początkowa - 0 ka	27,17	27,15	26,05	6,05	6,09	1,68	21,47	6,46
	$n_r$ - końcowa - 20 ka	28,6	28,4	25,7	3,8	5,3	1,64	22,49	6,7
Krystalizujące minerały mol/UVR	Dawsonit	-	0,250	0,106	-	-	-	0,104	-
	Dolomit	-	-	-	-	0,120	0,010	0,014	-
	Syderyt	-	-	-	-	3,630	0,020	-	1,227
	Kalcyt	-	-	3,065	0,711	-	-	0,070	-
Pojemność sekwestracyjna - mineralna *	mol/UVR	-	0,250	3,171	0,711	3,750	0,210	0,188	1,227
	kg/m <sup>3</sup>	-	0,801	10,320	2,938	15,499	0,924	0,651	5,051
Pojemność sekwestracyjna w roztworze CO <sub>2</sub> *	mol/l	0,050	0,068	0,071	5,3E-06	0,020	0,007	0,086	4,58E-04
	kg CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	0,632	0,845	0,799	8,86E-06	0,048	0,005	0,855	0,001
SUMA [kg CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> ]		0,632	1,646	11,119	2,938	15,547	0,929	1,506	5,052
*) - objaśnienia w tekście									

## 1.1.15 OPRACOWANIE SZCZEGÓŁOWYCH STATYCZNYCH MODELI O RODKA GEOLOGICZNEGO SKŁADOWISK



Rys.1.1.15.1 Model strukturalny w rejonie Budziszewice-Zaosie (cz. centralna; widoczna lokalizacja otworów i sekcja sejsmiczna wzdłuż jednego z profili sejsmicznych przecinających struktur).

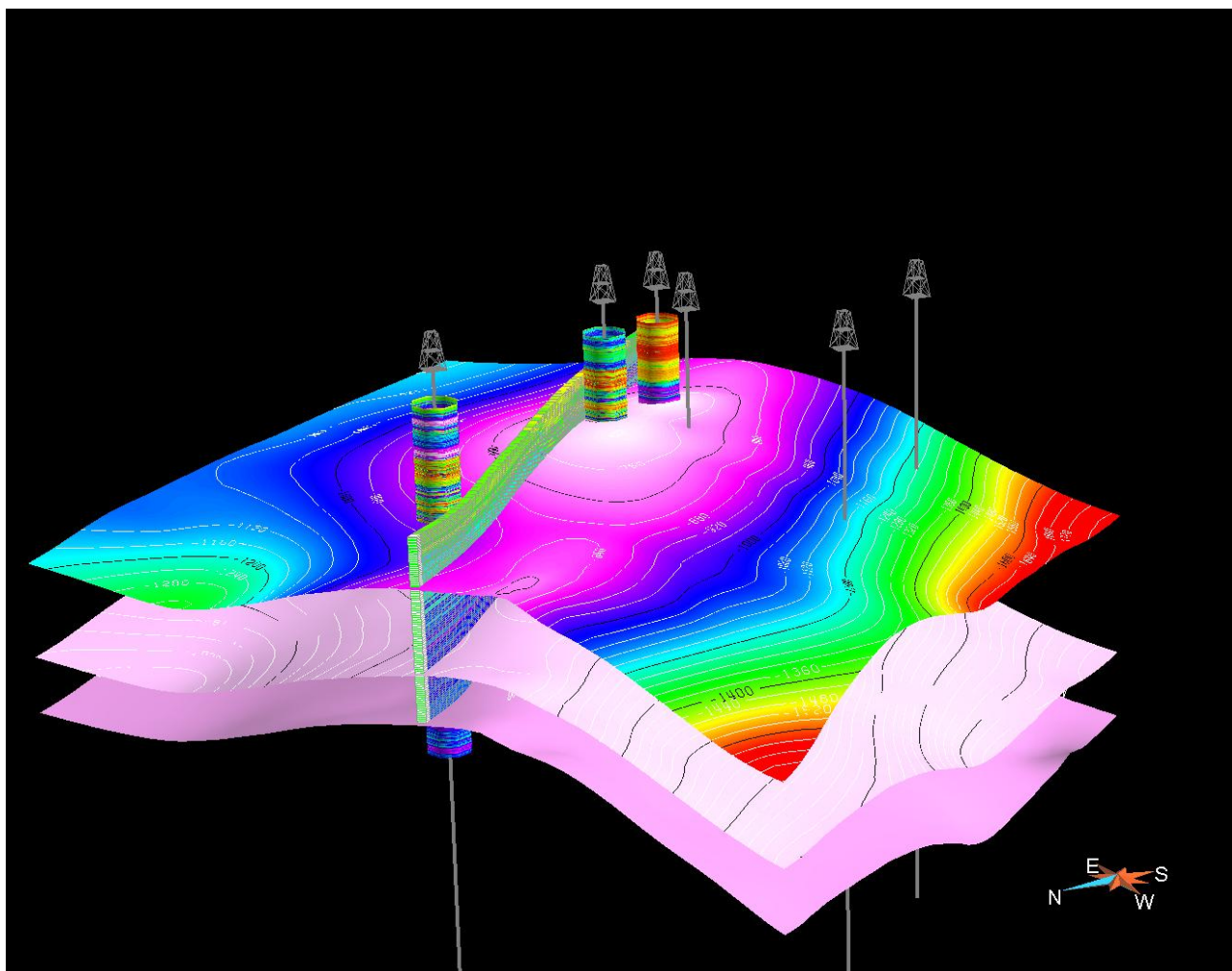
Przedmiotem prac było opracowanie modelu strukturalno-parametrycznego dla kompleksu składowania struktury (potencjalnego składowiska) Budziszewice-Zaosie, uwzględniającej budowę strukturalną kolektorów i nadkładu, w tym również geochemiczne solanek, obecność i charakter uskoków oraz rozkład parametrów zbiornikowych. Wykorzystano do tego celu model regionalny z rejonu Bełchatowa wykonany w ramach I Segmentu (Wójcicki (red.), 2009: rozdziały 1.1.3 i 1.1.8) uzupełniony o bardziej szczegółowe mapy sejsmiczne opracowane w rozdziale 1.1.14 (**Opracowanie modeli formacji mezozoiku** – Rys. 1.1.14.5).

Model sporządzono w PIG-PIB przy pomocy oprogramowania GOCAD, w sposób umożliwiający wymianę danych z programami stosowanymi przez innych partnerów konsorcjum (AGH & INiG – Petrel, GIG – Tough2). Model obję powierzchnie strukturalne odpowiadające mapom sejsmicznym (Rys. 1.1.15.1) J3, J1, J1, T2, T2, Tp2 i Z1 oraz mapom spługu kenozoiku i mapom terenu. Ponadto model wypełniono dostępnymi parametrami z otworów: Budziszewice IG-1, Zaosie-1,2,3 i Buków-1,2 omówionymi w poprzednim rozdziale (Tab. 1.1.14.1). Tak opracowany



model strukturalno-parametryczny (Rys.1.1.15.2) został wykorzystany przez partnerów konsorcjum do realizacji ich zadań, omówionych poniżej (wybrane elementy modelu były przepracowywane i uszczelniane przez poszczególnych partnerów konsorcjum, a wyniki dostarczali oni do PIG-PIB w formatach umożliwiających ich wprowadzenie do modelu sporządzonego w oprogramowaniu GOCAD). Z tego AGH opracowała model statyczny (strukturalno-parametryczny) utworów jury dolnej, INiG sporządził model statyczny utworów triasu dolnego a GIG ó model hydrogeologiczny.

Model statyczny był następnie podstawą do konstrukcji szczegółowego modelu kolektorów i uszczelnienia na potrzeby modelowania procesów zatęszczania dwutlenku w głą do potencjalnego składowiska (rozdział 1.1.16).



Rys.1.1.15.2 Model strukturalno-parametryczny w rejonie Budziszewice-Zaosie (cz. centralna; widoczna lokalizacja otworów i rozkład parametrów petrofizycznych modelu wzdłuż wybranego przekroju oraz model wygenerowany jest parametrami zależnie od posiadanych informacji z otworów wiertniczych, ale zwiualizowana to mo na wzdłuż przekrojów).

## Model statyczny utworów dolnej jury (AGH)

Przedmiotem opracowania, wykonanego przez AGH (Katedra Surowców Energetycznych WGGiO), jest przestrzenny 3D model komputerowy obrazujący zmienność litologiczną i zbiornikową klastycznych utworów jury, tzn. statyczny model parametryczny dla obszaru badań z szerokim marginesem (obejmującym praktycznie cały obszar modelu regionalnego z I Segmentu). Prezentowany model opracowano z wykorzystaniem programu Petrel (Schlumberger IS).

Styczne trójwymiarowe modelowanie parametryczne stanowi cząść procedury modelowania przestrzennego i symulacji procesów złoźowych. Metodologia ta rozwinęła się przede wszystkim dla potrzeb inżynierii złoźowej w poszukiwaniach naftowych. Obecnie jest ona stosowana także dla celów sekwestracji dwutlenku węgla. Współczesne nietyczne oprogramowanie komputerowe prezentuje urozmaicony sposób konstrukcji modeli przestrzennych (3D). Obok oprogramowania bazującego na idei gridów 3D, budowanych na podstawie regularnych siatek interpolacyjnych- gridów 2D (Tipper 1992, Cosentino 2001, Dubrule 1998, 2003), istnieją programy należące do rodziny CAD, program GoCad w których osnowa stratygraficzna budowana jest w oparciu o parametryczne powierzchnie które dla danej lokalizacji X,Y mogą wykazywać jedną wartość Z, a budowa modelu przestrzennego wykorzystuje algorytm Discrete Smooth Interpolation (Mallet 2002, Mallet 2008). Konstrukcja statycznego modelu w formie grida 3D obejmuje generalnie:

- Opracowanie map strukturalnych w formie regularnych siatek interpolacyjnych [RSI] (gridów 2D) na podstawie danych:
  - sejsmicznych i otworowych;
  - cyfrowanych map archiwalnych i danych otworowych;
  - danych otworowych (na ogół tylko mapy przed i po interwałowych w przypadku potrzeby dokonania konwersji czasowo-głębokościowej).
- Stworzenie przestrzennego (3D) modelu strukturalnego z wykorzystaniem opracowanych RSI i interpretacji tektoniki nieciągłości:
  - Opracowanie modelu uskoku (*Fault Model*)
  - Opracowanie szkieletu grida (*skeleton*) w wyniku zastosowania procedury tzw. *pillar gridding*
  - Utworzenie sekwencji stratygraficznych (*Zone*) w rezultacie wprowadzenia do modelu powierzchni stratygraficznych (*Surface = grid 2D*) i ich przekształcenie w formę nieregularnych przestrzennych siatek *Horizons*, w których kształt jest uwarunkowany wynikami procedury (*pillar gridding*)
  - Wprowadzenie warstwowania wewnątrz sekwencji stratygraficznych (*layers*)
- Utworzenie modelu facjalnego lub litologicznego (*Facies Modeling*) na podstawie danych otworowych:
  - Uśrednienie danych litologicznych w profilach utworów (*wells upscaling, well model*);
  - Przestrzenne modelowanie zmienności facjalnej w wydzielonych sekwencjach i warstwach, z zastosowaniem algorytmów deterministycznych i stochastycznych.
- Modelowanie zmienności parametrów petrofizycznych (porowatość, zailenia przepuszczalności) z wykorzystaniem wyników modelowania strukturalnych i litologiczno-facjalnych (*Petrophysical Modeling*):
  - Tworzenie podstawowych modeli jak np. modele porowatości i zailenia dla poszczególnych sekwencji i litologii;
  - Tworzenie modeli pochodnych, takich jak np. jako uszczelnienie czy jako skał zbiornikowych w sekwencjach stratygraficznych.

Wyniki modelowania 3D można przedstawić w postaci rysunków pseudo trójwymiarowych i map

i tzw. diagramów płotowych (*fence diagrams*) będą w formie dwuwymiarowych map odzwierciedlających uśrednione wartości wybranych parametrów i sekwencji/warstw/facji.

### **Modele strukturalne stropu jury rodkowej i dolnej**

Podstawowe dane wejściowe do opracowania stycznego modelu parametrycznego utworów jury dolnej i rodkowej stanowiły szczegółowe siatki interpolacyjne (Grid 2D), zreambulowane w ramach realizacji I Segmentu dla rejonu Bełchatowa (Wójcicki (red.), 2009) tematu. Obrazują one tektonikę i ukształtowanie powierzchni stropowych utworów jury rodkowej, jury dolnej oraz triasu górnego. Opracowano je w programach Zmap+ i Petrel w formie gridów 2D o spacjowaniu 500 - 500 m. Opracowanie ich oparto na materiałach będących wynikiem realizacji Atlasu geotermalnego mezozoiku (Górecki et al. 2006) oraz Atlasu basenu południowo permskiego (Peryt et al. 2008).

Przeprowadzona reambulacja dzięki zastosowaniu nowoczesnego oprogramowania i większej gęstości siatki interpolacyjnej pozwoliła dokładniej uwzględnić wyniki interpretacji regionalnych przekrojów sejsmicznych, a tym samym dokładniej odwzorować tektonikę. W większym stopniu odwzorowania tektonicznego zapewnił m.in. wprowadzenie w SW części obszaru badań sieci dyslokacji biegnących kierunku NW-SE na podstawie Mapy geologicznej Polski bez utworów kenozoiku (Dadlez et al. 2000).

### **Dane wejściowe i modele wyjściowe**

Opracowanie modelu przestrzennego stanowi cego przede wszystkim osnowę dla dynamicznego modelowania symulacji wymaga wprowadzenia dokładniejszej stratyfikacji pionowej modelu. W obrębie interwału jura dolna-rodkowa postanowiono wydzielić 6 interwałów stratygraficznych, obejmujących utwory o podobnych cechach litologicznych:

- Kelowej
- Baton óbajos górny
- Bajos rodkowy ótoark górny
- Toark rodkowy (formacja ciechocińska)
- Pliensbach
- Hetang - synemur

Estymację siatek interpolacyjnych przeprowadzono z zastosowaniem kombinacji technik przetwarzania znanych z literatury: (Davis 1986; Watson 1992; Swan, Sandilands 1996; Jones et al. 1992; Beyer 1993, 1994; Gousie 1998; Gousie, Franklin 1998, 2003) i przystosowanych do potrzeb modeli regionalnych z zastosowaniem metodologii rozwijanej w KSE AGH (Papiernik 1998; Papiernik et al. 2005; Górecki et al. 1998, 2002, 2006a,b).

Estymację wstępnych modeli wyjściowych wykonano w programie Petrel stosując jako podstawowe dane wejściowe ómiejscowe dane określone w odwiertach. Proces interpolacji wspomagano stosując jako trendy sterujące odpowiednio modele wyjściowe jury dolnej i rodkowej, które uzyskano metodą superpozycji na podstawie wyżej opisanych szczegółowych modeli strukturalnych. Technika ta działa w nieco podobny sposób do algorytmu *Trend Form Gridding* (Zoraster 1996) stosowanego z powodzeniem do opracowywania map wyjściowych czy modeli prędkości w różnych basenach naftowych Polski (Papiernik 2001, 2002, Papiernik et al. 2005). Za najbardziej adekwatny algorytm estymacyjny uznano technikę *Isochore Interpolation* odmian algorytmu *Convergent Gridder*.

Wykorzystanie takiej procedury przetwarzania pomimo słabej przestrzennej kontroli danymi wejściowymi, umożliwia stworzenie, realistycznych trendów rozkładu wyjściowych w których rozkład depocentrowy jest uwarunkowany tektoniką oraz ukształtowaniem głównych powierzchni strukturalnych (strop T<sub>3</sub>, J<sub>1</sub> i J<sub>2</sub>), które zrekonstruowano na podstawie danych otworowych i sejsmicznych.

Modele wynikowe uzyskano w wyniku zastosowania dodatkowego przetwarzania



umożliwiający w przybliżeniu poprawne odzwierciedlenie zasięgu kompleksów. Generalnie modele te pomimo gęstego spacjowania horyzontalnego (500m x 500m) należy traktować jako rozwiązania trendowe o ograniczonej dokładności. Ich uszczegółowienie wymaga wykonania szczegółowej interpretacji sejsmicznej.

Model miąższości *keloweju* opracowano na podstawie 146 odwiertów. Cztery z nich jest poza obszarem modelu. Wykorzystano je aby zminimalizować tzw. efekty brzegowe w procesie estymacji modelu miąższości. Miąższości *keloweju* przybliżone modelem nie osiąga 50m.

Model miąższości utworów *interwał bajos górny ó baton* opracowano na podstawie danych z 98 odwiertów. Przedstawione niżej miąższości stanowią sumaryczną miąższość wymienionych poziomów stratygraficznych. Na obszarze badań, przybliżone modelem miąższości *interwał bajos góry- baton* zmieniają się w zakresie od 0 do niemal 650 m, osiągać maksymalne wartości na obszarze antyklinorium rodkowopolskiego.

Dane wejściowe do opracowania modelu *interwał toark górny ó bajos dolny* zebrano w 89 odwiertach. Reprezentują one pogranicze jury dolnej i rodkowej, obejmujące zsumowane miąższości utworów bajosu dolnego (warstwy kościeliskie), *aalenu* dolnego i górnego oraz *toarku* górnego (formacja *borucicka*). Przybliżone modelem miąższości *interwał* zmieniają się w zakresie od 0 do ok. 650 m. Osiągać maksimum w rejonie Budziszewic i SE od Jędrzowa. Wyraźny wzrost miąższości można zaobserwować w rowach triasowych, gdzie w rejonie Chrusty ó Niechmirów miąższość przekracza 200m. Wyraźny spadek miąższości można zaobserwować na obszarze niecki mogileńsko-łódzkiej.

Model miąższości utworów *formacji ciechocińskiej* oparto na danych uzyskanych z 76 odwiertów położonych na obszarze badań. Model odzwierciedla miąższość jednorodnego kompleksu obejmującego tzw. formację *ciechocińską* (*toark* dolny) zidentyfikowaną na niemal całym obszarze badań jako potencjalne uszczelnienie. Przybliżone modelem miąższości formacji *ciechocińskiej* nie przekracza 150 m, osiągać maksimum w rejonie na SE i NW od Jędrzowa IG1.

Model miąższości utworów *pliensbachu* ten reprezentuje sumaryczną miąższości utworów *pliensbachu* dolnego i górnego obejmujące, w różnych częściach obszaru badań formacje *blanowicką*, *drzewiecką*, *gielniowską* i *Łbesk*. Opracowano go na podstawie 93 danych otworowych. Miąższości przybliżone modelu zmieniają się w zakresie od 0 do 550 m. maksymalne miąższości występują na obszarze antyklinorium rodkowopolskiego, w rejonie Wojszyc. Znaczne miąższości w tej strefie występują również w rejonie Jędrzowa. W siedzztwie Budziszewic miąższość *pliensbachu* spada do ok. 200m w rejonie *Bełchatowa* ulegając w tym miejscu wyklinowaniu (dotyczy to całego profilu jury dolnej). Kolejna strefa związkowanych miąższości (do 200m) rozciąga się w rejonie rowów triasowych pomiędzy Chrustami i Kaliszem.

*Interwał* obejmujący utwory *hetangu - synemuru* jest połączony najgłębiej i w związku z tym jego miąższości rozpoznano jedynie w 59 odwiertach. W jego skład wchodzi osady zaliczane do formacji *zagajskiej*, *przysuskiej* i *skóbskiej*. Przybliżone modelem miąższości *interwał* zmieniają się w zakresie od 0 do ponad 650 m. Obserwowany na mapie rozkład depocentrow generalnie przypomina obraz widoczny na mapach pozostałych kompleksów dolno jurajskich. Strefa regionalnego wzrostu miąższości występuje w rejonie Wojszyc w obrębie antyklinorium rodkowopolskiego, lokalne maksimum występuje w strefie rowów jurajskich (Chrusty) i rygla radomszczańskiego (Gidle). Obszar monokliny przedludeckiej i niecki mogileńsko-łódzkiej cechuje się zredukowanymi miąższościami.

### **Model strukturalny**

Wykorzystując szczegółową regularną siatkę interpolacyjną (*gridy 2d*) powierzchni strukturalnej stropu jury rodkowej, uskoki uwzględnione na tych mapach oraz modele miąższości superpozycyjnie zrekonstruowano granice kompleksów stratygraficznych jury rodkowej i dolnej. Powierzchni tych użyto do opracowania modelu 3D, składającego się z sześciu sekwencji

stratygraficznych (*zones*).

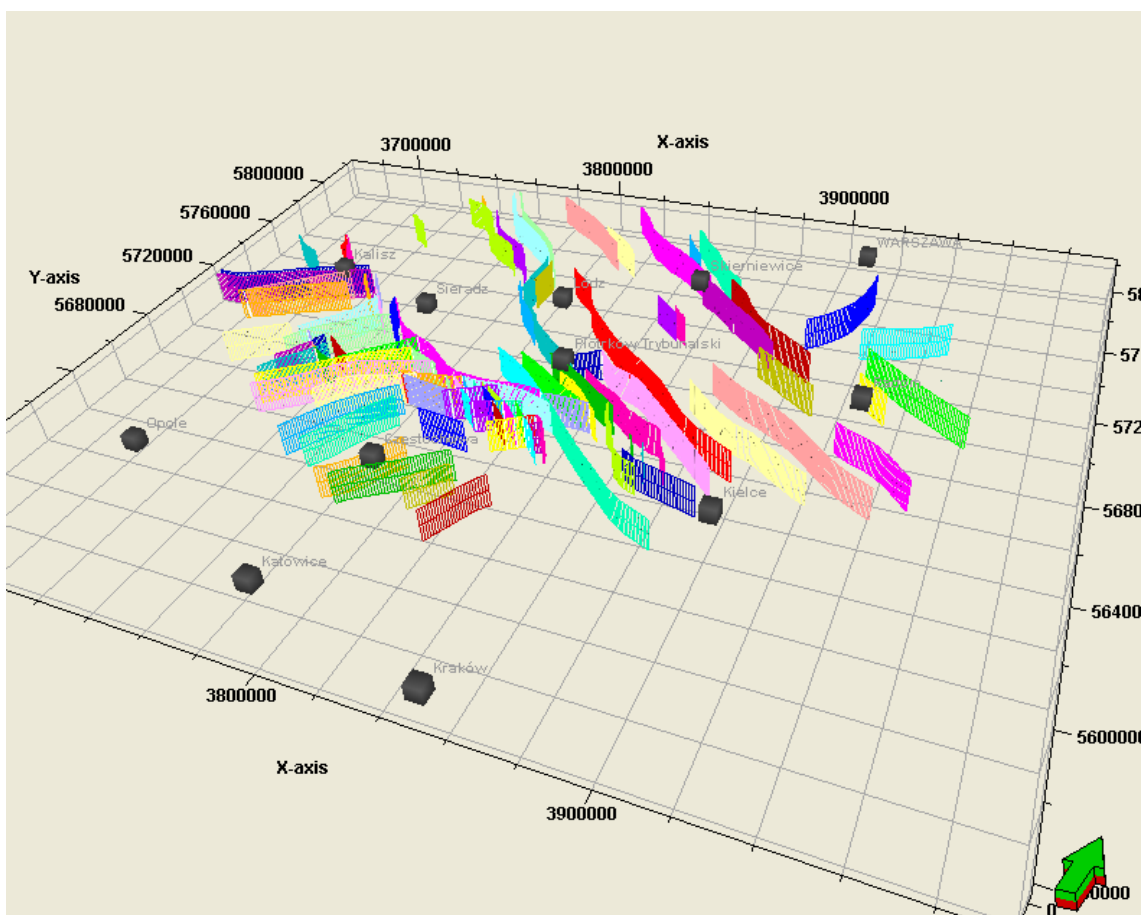
### Model uskokowy

Ze względu na regionalny charakter modelu i brak interpretacji sejsmicznych opracowano stosunkowo uproszczony model uskokowy *Fault Model*, zakładający, że wszystkie uskoki są pionowe i mają liniowo nachyloną powierzchnię (Rys. 1.1.15.1).

Dane wejściowe stanowią sieci geologiczne uwzględnione na szczegółowych mapach strukturalnych. Pozwoliły one na opracowanie modelu (regionalnego) obejmującego 118 uskoków - składających się z 3340 linii kształtowania (pillars). 69% sieci geologicznych to uskoki pionowe, 30% liniowe.

Due do ilości uskoków, ich skomplikowane relacje przestrzenne, połączone ze słabymi danymi sprawiają, że procedura modelowania uskoków była czasochłonna, a powstał model lokalnie np. w strefie ryglu Radomska ma ograniczoną dokładność.

Na etapie modelowania szczegółowych systemów sekwencyjnych niezbędne jest opracowanie dla wytypowanych stref modelu uskokowego, który z jednej strony będzie bardziej precyzyjnie oddawał geometrię stref uskokowych, a z drugiej będzie mniej skomplikowany jeżeli chodzi o ilość dyslokacji.

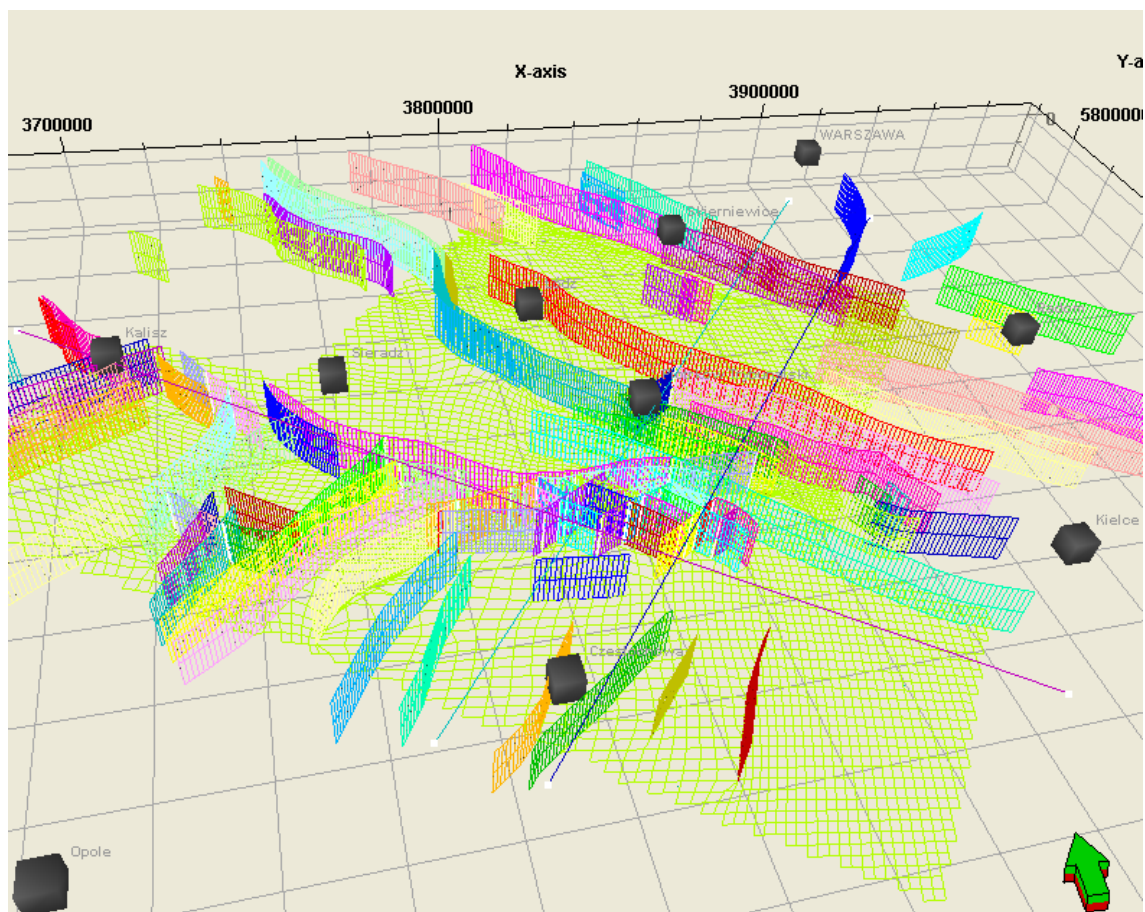


Rys. 1.1.15.1 Model uskokowy (Fault model).

### Model przestrzenny (Pillar gridding)

Przedstawiony model uskokowy kształtuje wewnątrz budowy modelu 3D. Dalszy etap jego horyzontalnego podziału stanowi procedura tzw. *pillar gridding*, - obliczenia 3 powierzchni szkieletowych składających się z oczek o nieregularnym kształcie, uwarunkowanym przebiegiem dyslokacji i zależnym od wielkości wstępującego spacjiowania współrzędnych stratygraficznych (I, J)

przestrzennego modelu. W pierwszym podejściu autorzy opracowali bardzo sztywny model 3D o spacji 500m x 500m. Odzwierciedla on kształt granic sekwencji stratygraficznych stopu  $J_1$ ,  $J_2$  i  $T_3$ , zgodnie z wejściowymi gridami 2D, jednak składa się on z ponad 7 000 000 komórek. By dostosować model statyczny do potrzeb późniejszych symulacji dynamicznych ostatecznie opracowano pillar grid o spacji 2000m (Rys. 1.1.15.2).



Rys. 1.1.15.2 Model uskokowy i grid szkieletowy wynikowej osnowy geometrycznej.

W rezultacie powstał model w kierunkach I, J (zrotowanych o 22 stopnie względem X,Y) składający się z 116 x 111 wzdłuż Z.

Takie skrócenie modelu zwiększa szybkość elastycznego modelowania zarówno statycznego jak i dynamicznego. Jednak ma ono także konsekwencje negatywne w postaci znaczącego uproszczenia relacji strukturalno - mechanicznych w strefach przyskokowych oraz zdecydowanie słabszą precyzję zdefiniowania granic stwierdzanych w otworach i modelu.

Z drugiej strony w sytuacji, gdy dane wejściowe do modelowania zmienności litologii parametrów zbiornikowych są nieliczne zastosowanie dużego oczka modelu 3D daje możliwość stworzenia bardziej ciągłych (trendowych) modeli parametrycznych.

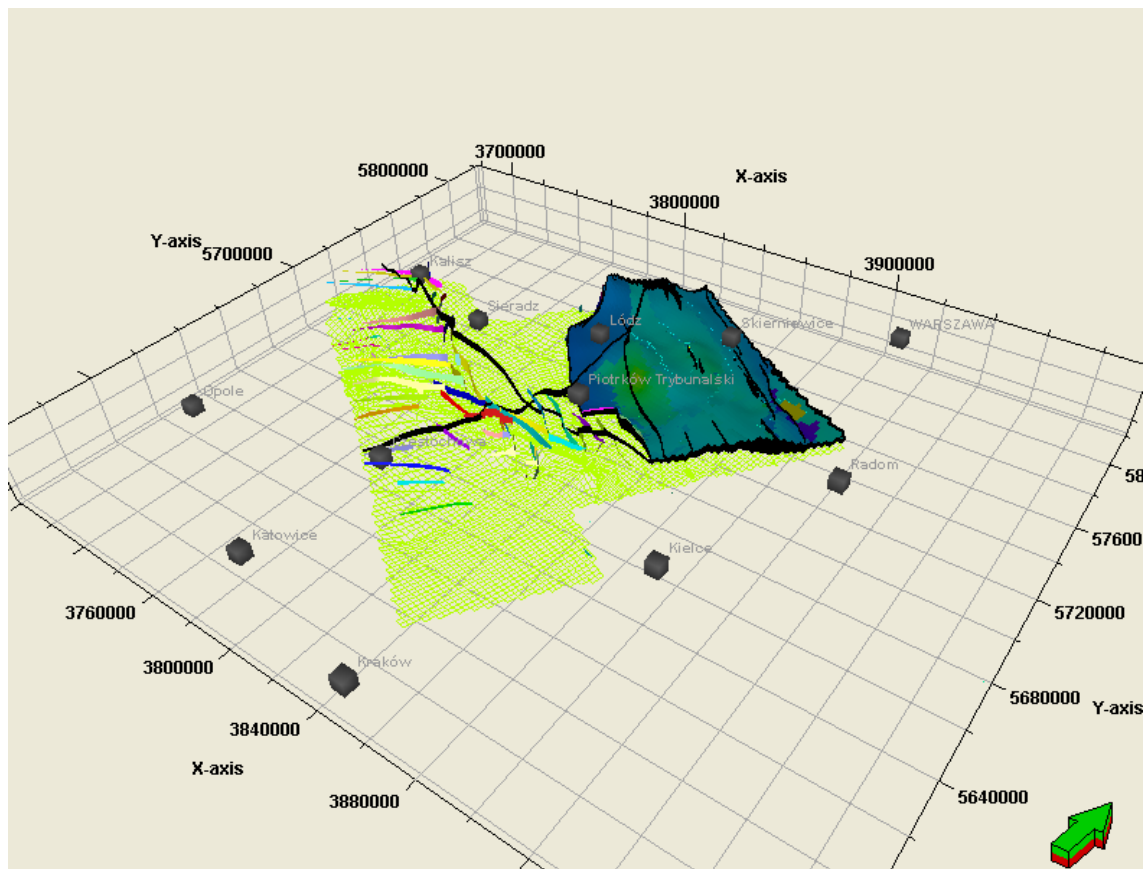
### Wprowadzenie sekwencji stratygraficznych (*layers*) i warstw (*zones*)

Po zakończeniu procedury modelowania uskoków i opracowaniu modelu szkieletowego dokonano podziału pionowego przestrzeni na sekwencje stratygraficzne. W wyniku zastosowania procedury *Make horizons*. Na podstawie regularnych modeli strukturalnych (grid 2D) obliczono nieciągłe horyzonty, stanowiące granice sekwencji. Sekwencje podzielono wewnętrznie na proporcjonalne warstwy (*proportional layering*), przyjmując, że minimalna grubość odwzorowana w warstwie nie może być mniejsza niż 1m.

Ostatecznie powstał model obejmujący następujące sekwencje podzielone na warstwy:

- Kelowej (podzielony na dwie warstwy)
- Białobajowy górny (5 warstw)
- Białobajowy dolny (5 warstw)
- Toark dolny (formacja ciechocińska) (6 warstw)
- Pliensbach (5 warstw)
- Hetangowy synemur (5 warstw)

Powstał model jest podzielony na kilka segmentów. Istotne znaczenie dla realizacji tego etapu tematu ma segment północny (Rys. 1.1.15.3) położony na obszarze antyklinorium rodkowopolskiego obejmujący antykliny Budziszewic i Jeżowa. Powierzchnia modelu na obszarze segmentu 1 wynosi  $8.6634 \times 10^9 \text{m}^2$ .



Rys 1.1.15.3 Lokalizacja północnego segmentu modelu.

### Model parametryczny zmienności litologiczno-facjalnej

Wewnętrzna zmienność litologiczno-facjalna modelu 3D może być zrekonstruowana według dwóch podstawowych schematów. W prostszym zmienność litologiczna i facjalna oraz parametry zbiornikowe są modelowane niezależnie. Współcześnie modelowanie zmienności litologiczno-facjalnej najczęściej odbywa się jednak według schematu dwuetapowego. Pierwszym krokiem jest na ogół stworzenie modelu litologiczno-facjalnego, który wraz z wcześniej przyjętym typem warstwowania będzie w dalszej części sterował procesem interpolacji parametrów zbiornikowych. Niezależnie od przyjętego schematu modelowania, przestrzenna estymacja modelu 3D, odbywa się względem wyznaczonych warstw (*layers*), wg zasad interpolacji numerycznej znanych od lat 60-tych (Davis 1986, Swan, Sandilands 1992, Isaaks, Srivastava 1991, Jones et al. 1992).

## Modelowanie litologiczne

Model litologiczno - facjalny (b d tylko litologiczny lub facjalny) jest konstruowany na podstawie bezpo rednich informacji geologicznych uzyskiwanych w trakcie wiercenia ó zwiercin i rdzenia. Na ogó€wspomagaj c , cho czasami jedyn , informacj ilo ciow stanowi kalibrowane danymi laboratoryjnymi wyniki interpretacji litologiczno-facjalnej krzywych geofizycznych. Dane litologiczne (facjalne) niezale nie od tego czy s to punktowe obserwacje laboratoryjne czy ci g€ zapis krzywych geofizycznych, s przetwarzane do postaci dyskretnej. Poszczególne typy litologii, facji czy wydzielenia stratygraficzne s kodowane w postaci liczbowej. (Dubrule 1998, 2003, Papiernik, 2003, Papiernik, Zaj c 2003, Mastalerz et al., 2006). Dyskretny format danych litologicznych nak€da znacz ce ograniczenia na proces interpolacji. Nie mo na go wykona z u yciem ci g€ch technik obliczeniowych. By unikn tego rodzaju zafa€zowa do wykonania symulacji przestrzennej zmienno ci litologiczno - facjalnej u ywanych jest szereg specjalnie dostosowanych algorytmów deterministycznych i stochastycznych.

Do algorytmów deterministycznych zalicza si nadzwyczaj prosta metoda najbli szego s siada (*Assign Value*) opieraj ca si na topologicznym podziale przestrzeni modelu na pentagonalne lub heksagonalne strefy wp€wu odwiertów, zwane poligonami Voronoia, Thiessena (Davis 1986, Mallet 2002). Do algorytmów deterministycznych zaliczymy tak e u ywanych do modelowania zmienno ci facjalnej i litologicznej, tzw. kriging wska nikowy (*Indicator Kriging*). Algorytm ten podobnie jak inne odmiany krigingu, opiera procedur estymacji na wspó€zynnikach wa cych, okre lonych dla danego zbioru danych na podstawie tzw. semiwariogramu czy wariogramu eksperymentalnego i modelowanego. Kriging wska nikowy umo liwia tworzenie bardzo wyg€dzonych model na podstawie dyskretnych danych (Deutsch, Journel 1992).

Pozosta€ algorytmy dost pne w Petrele to zró nicowane stochastyczne. Pierwsz grup stanowi algorytmy sekwencyjne, takie jak *Sequential Indicator Simulation* (Podr cznik u ytkownika Petrel, 2009; Deutsch, Journel 1992) stosowane s z du ym powodzeniem zarówno w modelowaniach obiektowych jak i wska nikowych. Algorytmy z grupy *Transition Gaussian Simulation* jest zbli ony do tzw. algorytmów bezpo rednich. Mo na je stosowa tylko w przypadku modelowania wska nikowego (Dubrule 1998).

Petrel umo liwia równie tzw. modelowanie obiektowe (np. koryt rzecznych) czy modelowania wspomagane sieci neuronow . W przedstawianym przypadku najbardziej adekwatnymi metodami wydaj si by kriging wska nikowy i stochastyczna metoda SIS.

Dane wej ciowe do opracowania regionalnego model stanowi€ wyniki interpretacji litologiczno-z€ owych krzywych geofizycznych opracowane w poprzednim etapie niniejszego tematu (I Segment). Podstawowy materia€wej ciowy obejmowa€krzywe litologiczne, krzywe zailenia i porowato ci ca€owitej i efektywnej z 34 odwiertów dla ca€ego modelu regionalnego i 9 litologii (Tabela 1.1.15.1).

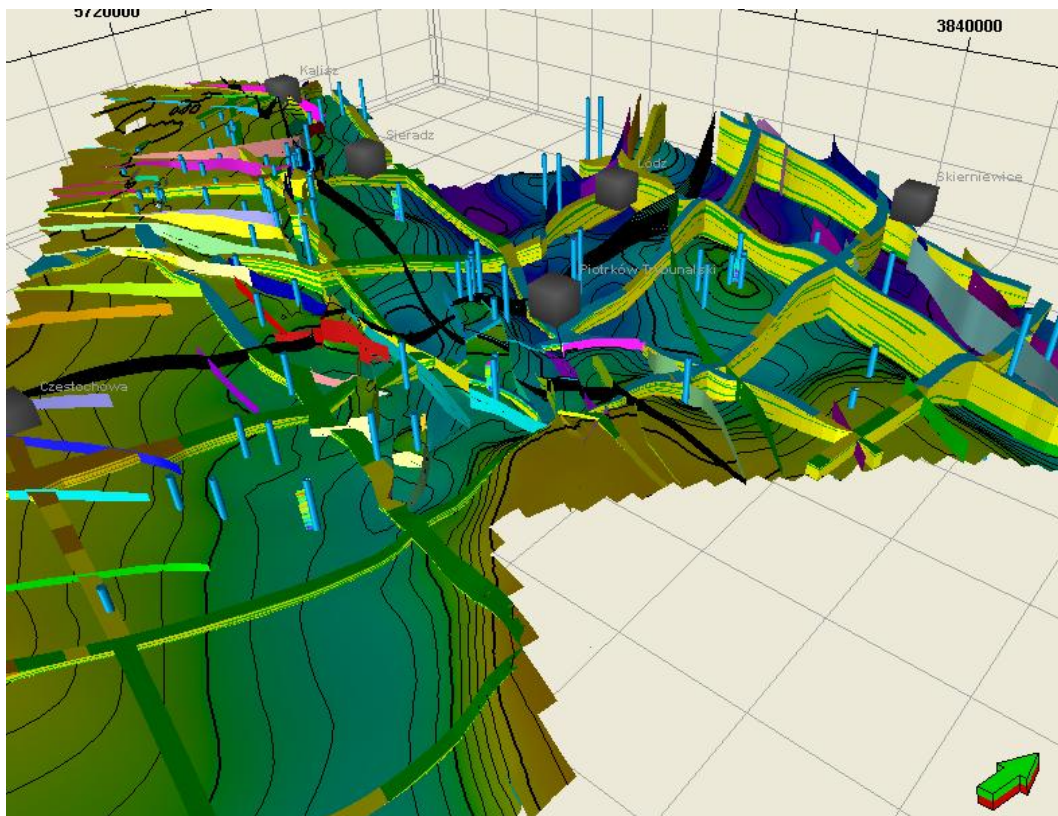
Tab. 1.1.15.1 Zestawienie wydzielenia litologicznych przyj tych do konstrukcji modelu.

Kod	Litologia
0	I€wce
1	Mu€wce
2	Piaskowce
3	W glany
4	Margle
5	wiry brekcje
6	Osady chemiczne
7	Opoki
8	Pozosta€
9	Pozosta€



Na podstawie przekodowanych danych opracowano litologiczne modele otworowe (procedura petreła *Scale up*) z wykorzystaniem statystycznego algorytmu Najcz stszy przypadek *most of* u ywanego dla danych typu dyskretnego. Dok adno dopasowania litologii w krzywych i modelu jest w tym przypadku uzale niona od g sto ci pionowego podzia i sekwencji stratygraficznych (*zones*) na warstwy (*layers*). W przedstawianym przypadku g sto ta nie jest zbyt wysoka ze wzgl du na wymogi modelowa dynamicznych. Dla wi kszo ci profili osi gni ta dok adno modelu otworowego jest odpowiednio wysoka, jednak w niektórych strefach, zw aszcza tam, gdzie wyst puj liczne przewarstwienia o ma eej mi szo ci przybli ona modelem litologia jest statystycznie najlepszym przybli eniem.

W przypadku modelu uk adu sekwencyjnego kompleksów jurajskich istotne znaczenie maj tylko litologie klastyczne (poza marginalnie reprezentowanymi wirami). W glany pojawi si przede wszystkim w obr bie kompleksu keloweju, oraz w przystopowych partiach innych kompleksów w rejonie Gomunic i na obrze eniu Gór wi tokrzyskich (a wi c poza obszarem modelu szczegó owego). W z e te s stosunkowo nieliczne, s oczywistymi artefaktami, jednak ich pojawienie si jest konsekwencj dostosowania rozdzielczo ci modelu do potrzeb symulacji dynamicznych.



Rys. 1.1.15.4 Model litologiczny utworów jury dolnej i rodkowej ó diagram p etowy na tle mapy stropu triasu.

Wyniki modelowania litologicznego przedstawia Rys. 1.1.15.4. Bardziej precyzyjny wyniki modelowania mo na prze ledzi wzd i przekroju na Rys 1.1.15.8. Statystyczne podsumowanie wyników modelowania przedstawia Tab. 1.1.15.1.

Tab. 1.1.15.2 Statystyczne podsumowanie modelu litologicznego.

Model litologiczny ca								
Code	Name	%	N	Intervals	Min	Mean	Max	Std
0	i	30.23	49299	21920	0.0 (1)	50.0 (2.25)	892.2 (11)	63.65
1	mu	2.46	4017	2797	0.1 (1)	45.4 (1.44)	883.8 (5)	80.97
2	piaskowce	65.78	107269	22305	0.0 (1)	135.2 (4.81)	1176.6 (25)	174.4
3	w glany	1.5	2447	2234	0.3 (1)	24.3 (1.1)	353.5 (26)	22.26
4	margle	0.02	31	30	0.3 (1)	18.2 (1.03)	53.6 (2)	15.53
Kelowej								
Code	Name	%	N	Intervals	Min	Mean	Max	Std
0	i	34.92	1849	1849	0.3 (1)	47.9 (1)	892.2 (1)	135.6
1	mu	5.53	293	293	0.3 (1)	105.9 (1)	883.8 (1)	220.4
2	piaskowce	18.13	960	960	0.3 (1)	36.3 (1)	764.7 (1)	80.11
3	w glany	40.89	2165	2165	0.3 (1)	21.5 (1)	353.5 (1)	20.08
4	margle	0.53	28	28	0.3 (1)	18.2 (1)	53.6 (1)	16.26
Baton grn bajos								
Code	Name	%	N	Intervals	Min	Mean	Max	Std
0	i	31.46	8661	5869	0.0 (1)	46.5 (1.48)	242.4 (4)	40.94
1	mu	4.17	1147	937	0.1 (1)	35.0 (1.22)	104.9 (2)	21.06
2	piaskowce	63.47	17475	7334	0.1 (1)	98.4 (2.38)	593.4 (5)	119
3	w glany	0.91	250	203	2.1 (1)	36.2 (1.23)	169.2 (5)	18.92
4	margle	0	1	1	6.3 (1)	6.3 (1)	6.3 (1)	0
Bajos dln. Toark grn								
Code	Name	%	N	Intervals	Min	Mean	Max	Std
0	i	23.88	7743	4348	0.1 (1)	33.9 (1.78)	163.9 (6)	31.06
1	mu	0.68	220	215	0.1 (1)	10.5 (1.02)	42.1 (3)	4.589
2	piaskowce	75.4	24449	7681	0.0 (1)	85.2 (3.18)	635.6 (6)	99.89
3	w glany	0.04	12	4	14.2 (1)	45.3 (3)	78.8 (6)	24.55
4	margle	0	1	1	14.2 (1)	14.2 (1)	14.2 (1)	0
Fm. ciechoci ska ( dln.toark)								
Code	Name	%	N	Intervals	Min	Mean	Max	Std
0	i	36.21	12722	4924	0.0 (1)	26.0 (2.58)	124.2 (6)	18.6
1	mu	3.13	1100	545	0.9 (1)	18.3 (2.02)	40.1 (4)	10.67
2	piaskowce	60.64	21306	7735	0.0 (1)	34.3 (2.75)	149.8 (6)	30.46
3	w glany	0.02	6	1	39.6 (6)	39.6 (6)	39.6 (6)	0
4	margle	0	1	1	16.5 (1)	16.5 (1)	16.5 (1)	0
Pliensbach								
Code	Name	%	N	Intervals	Min	Mean	Max	Std
0	i	8.28	2698	2125	0.1 (1)	22.0 (1.27)	113.5 (5)	14.05
1	mu	0.26	85	80	1.7 (1)	23.7 (1.06)	128.2 (2)	19.03
2	piaskowce	91.44	29799	6199	0.0 (1)	120.3 (4.81)	540.3 (6)	108
3	w glany	0.02	6	1	96.1 (6)	96.1 (6)	96.1 (6)	0
Hetang-synemur								
Code	Name	%	N	Intervals	Min	Mean	Max	Std
0	i	51.94	15626	6175	0.0 (1)	66.7 (2.53)	443.0 (6)	68.18
1	mu	3.9	1172	813	0.2 (1)	60.4 (1.44)	213.6 (3)	45.03
2	piaskowce	44.14	13280	5295	0.0 (1)	112.2 (2.51)	549.7 (6)	102.9
3	w glany	0.03	8	3	5.4 (1)	10.5 (2.67)	20.5 (6)	7.093

### Modele parametrów petrofizycznych

Dane wejściowe do modelowania przestrzennej zmienności parametrów zbiornikowych wykazują zmienność gęstości, w modelowaniu ich zmienności stosowane, inne algorytmy niż w przypadku modelu facjalnego. Na tym etapie pracy stosunkowo często wykorzystywane są techniki deterministyczne. Do najprostszych należą algorytm najbliższego sąsiada (*Closest, Closest Neighbour*). Nieco bardziej złożone są algorytmy z grupy średniej odległości (*Moving Average* (Petrel 2007 Manual), *Weighted Average*). Jako technika wspomagająca inne algorytmy, aplikowane są tzw. algorytmy funkcyjne - na ogólnie trendy wielomianowe (Davis 1986, Goodman 1999, Petrel

2007 Manual). Najbardziej z $\epsilon$ one algorytmy deterministyczne wykorzystywane do opracowania modelu petrofizycznego to kriging uniwersalny (Deutsch, Journel 1998) stosowany z (lub bez) trendem zewn $\epsilon$ trznym (*Extrenal Drift*) (Dubrule 2003), wspomagany wykorzystaniem wariogramów analizowanych parametrów, b $\epsilon$ d procedurami co-krigingu, transformacj $\epsilon$  danych oraz krzywymi prawdopodobie $\epsilon$ stwa zmian modelowanego parametru.

Oprócz metod deterministycznych do modelowania zmienno $\epsilon$ ci parametrów zbiornikowych wykorzystywane s $\epsilon$  równie $\epsilon$  algorytmy stochastyczne oparte na podej $\epsilon$ ciu iteratywnym, sekwencyjnym lub bezpo $\epsilon$ rednim (Dubrule 1998). Niezale $\epsilon$ nie od podej $\epsilon$ cia, algorytmy stochastyczne umo $\epsilon$ liwiaj $\epsilon$  tzw. modelowanie warunkowane (*Conditional*), które gwarantuje, e $\epsilon$  w takiej ka $\epsilon$ dej symulacji statystycznej modele 3D i otworowy, w miejscu przeci $\epsilon$ cia zawsze b $\epsilon$ d zgodne. Do najcz $\epsilon$ ściej stosowanych algorytmów stochastycznych współ $\epsilon$ cznie nale $\epsilon$ y sekwencyjny *Sequential Gaussian Simulation* SGS (Gomez-Hernandez, Journel 1993, Dubrule 1998 (Petrel 2007 Manual).

Na podstawie wyników interpretacji krzywych geofizyki wiertniczej z 34 odwiertów opracowano modele otworowe pomimo u $\epsilon$ rednienia wykazuj $\epsilon$ ce zadowalaj $\epsilon$ c zgodnie z krzywymi wej $\epsilon$ ciowymi (Rys. 1.1.15.5). Wszystkie modele otworowe obliczono stosuj $\epsilon$ c u $\epsilon$ rednianie arytmetyczne w warstwach, po $\epsilon$ czone ze statystycznym sterowaniem przy pomocy krzywej litologicznej. (testowano te $\epsilon$  inne metody np. algorytm medianowy lub krzywe geometryczne) ale uznano e $\epsilon$  nie daj $\epsilon$  one znacz $\epsilon$ co lepszych wyników modeli otworowych.

Przestrzenne modele zailenia (Vsh) oraz porowato $\epsilon$ ci efektywnej (PHIE-m) obliczono stosuj $\epsilon$ c Kriging w odmianie Gslib. W obu przypadkach dla zwi $\epsilon$ kszenia ci $\epsilon$  g $\epsilon$ ci lateralnej w procedurze estymacji stosowano kriging zwyczajny (*ordinary*) a nie prosty (*simple*). Wst $\epsilon$ pne analizy statystyczne pokaza $\epsilon$  e $\epsilon$  dla zgromadzonego zestawu danych wej $\epsilon$ ciowych.

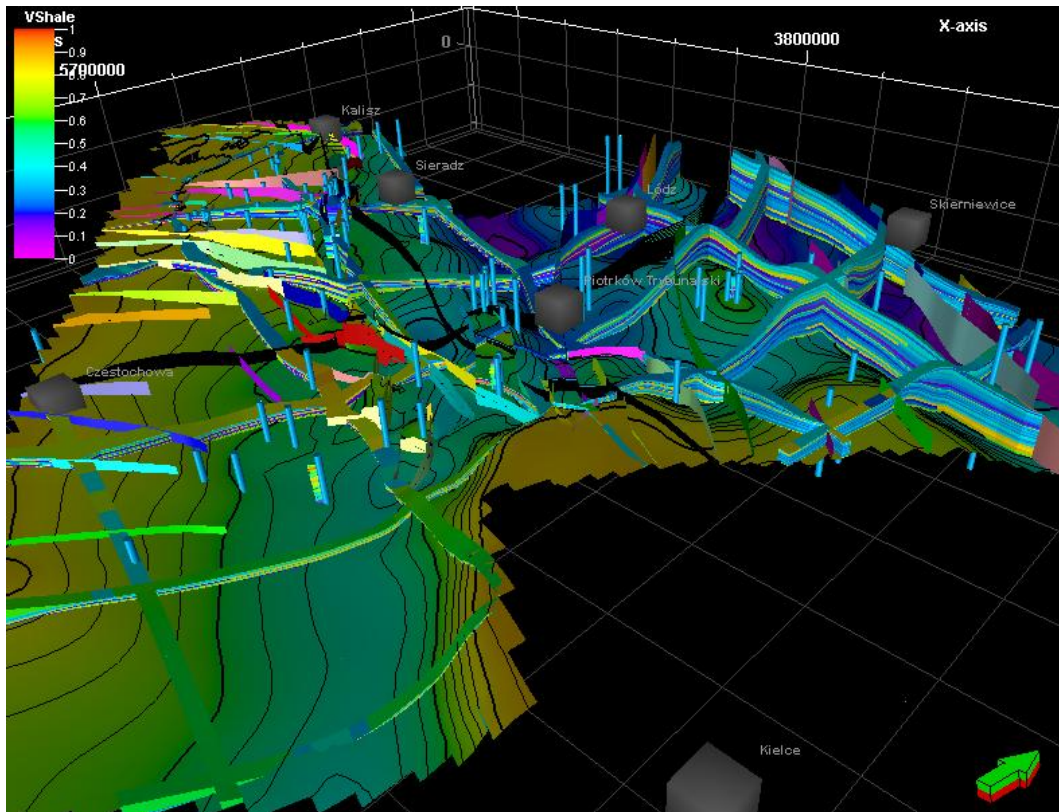
W obu przypadkach zdecydowano si $\epsilon$  zastosowa $\epsilon$  metody deterministyczne aby w bardziej ci $\epsilon$  g $\epsilon$  sposób zrekonstruowa $\epsilon$  rozprzestrzenienie potencjalnych zbiorników i uszczelnie $\epsilon$ . Zastosowanie technik stochastycznych nie daje takiej mo $\epsilon$ liwo $\epsilon$ ci gdy $\epsilon$  metody te $\epsilon$  z za $\epsilon$ enia $\epsilon$  nie uznaj $\epsilon$  istnienia w pe $\epsilon$ ci ci $\epsilon$  g $\epsilon$  zmienno $\epsilon$ ci parametrów. Zdaniem autorów wykorzystanie technik stochastycznych przyniesie po $\epsilon$  dany efekt w nast $\epsilon$ pnym etapie pracy, gdy dane wej $\epsilon$ ciowe zostan $\epsilon$  uzupełnione atrybutami sejsmicznymi.

Jednak e $\epsilon$  na tym etapie w procesie estymacji przyj $\epsilon$ to mo $\epsilon$ liwe silne za $\epsilon$ enia geologiczne, przekraczaj $\epsilon$ ce dok $\epsilon$ adno analizy statystycznej le $\epsilon$ cej u $\epsilon$  podstaw geostatystycznego okre $\epsilon$ lenia kształ $\epsilon$ u wariogramów. Analizuj $\epsilon$ c bardzo siln $\epsilon$  anizotropi $\epsilon$  strukturaln $\epsilon$  dla map strukturalnych i mi $\epsilon$ szo $\epsilon$ ciowych w procesie estymacji za $\epsilon$ ono wyst $\epsilon$ powanie bardzo zwi $\epsilon$ zku mi $\epsilon$ dzy danymi na bardzo du $\epsilon$ ych dystansach (range) w kierunku NW- SE (200 km) i znacznie mniejszego (120 km) w kierunku SW-NE. Zabieg ten mia $\epsilon$  z za $\epsilon$ enia redukowa $\epsilon$  negatywny wp $\epsilon$ w spowodowany nierównomiern $\epsilon$  i skupion $\epsilon$  dystrybucj $\epsilon$  otworów oraz ma $\epsilon$ liczebno $\epsilon$ ci danych.

Dzi $\epsilon$ ki zastosowaniu opisanej procedury w nieznacznym stopniu podniesiono lateraln $\epsilon$  ci $\epsilon$  g $\epsilon$  modelowanych parametrów (zarówno litologii, jak i parametrów zbiornikowych). Nale $\epsilon$ y jednak zauwa $\epsilon$ y e $\epsilon$  ten mocno trendowy obraz mo $\epsilon$ e ulec drastycznej zmianie w przypadku zwi $\epsilon$ kszenia jego szczegó $\epsilon$ wo $\epsilon$ ci np. w wyniku wykorzystania atrybutów sejsmicznych z profili 2D.

Model zailenia powsta $\epsilon$  jako pierwszy, modelowanie wykonano z zastosowaniem algorytmu Kriging Gslbi, arbitralnie kształ $\epsilon$ uj $\epsilon$ c wariogram. Modelowanie wykonano oddzielnie dla poszczególnych sekwencji (*zones*). Procedura modelowania by $\epsilon$  sterowana modelem litologicznym. Syntetyczne wyniki modelowania zailenia przedstawia Rys. 1.1.15.5, Natomiast bardziej szczegó $\epsilon$ wej analizie rozmieszczenia warstw potencjalnie zbiornikowych i uszczelniaj $\epsilon$ cych w profilu mo $\epsilon$ na dokona $\epsilon$  na przekrojach (Za $\epsilon$  1.1.15.8). Statystyki modelu zailenia kompleksów jurajskich zebrano w Tab. 1.1.15.3.





Rys. 1.1.15.5 Model zailenia utworów jury rodkowej i dolnej (Diagram pŁtowy na tle mapy stropu triasu).

Tab. 1.1.15.3 Podstawowe statystyki 3D modelu zailenia.

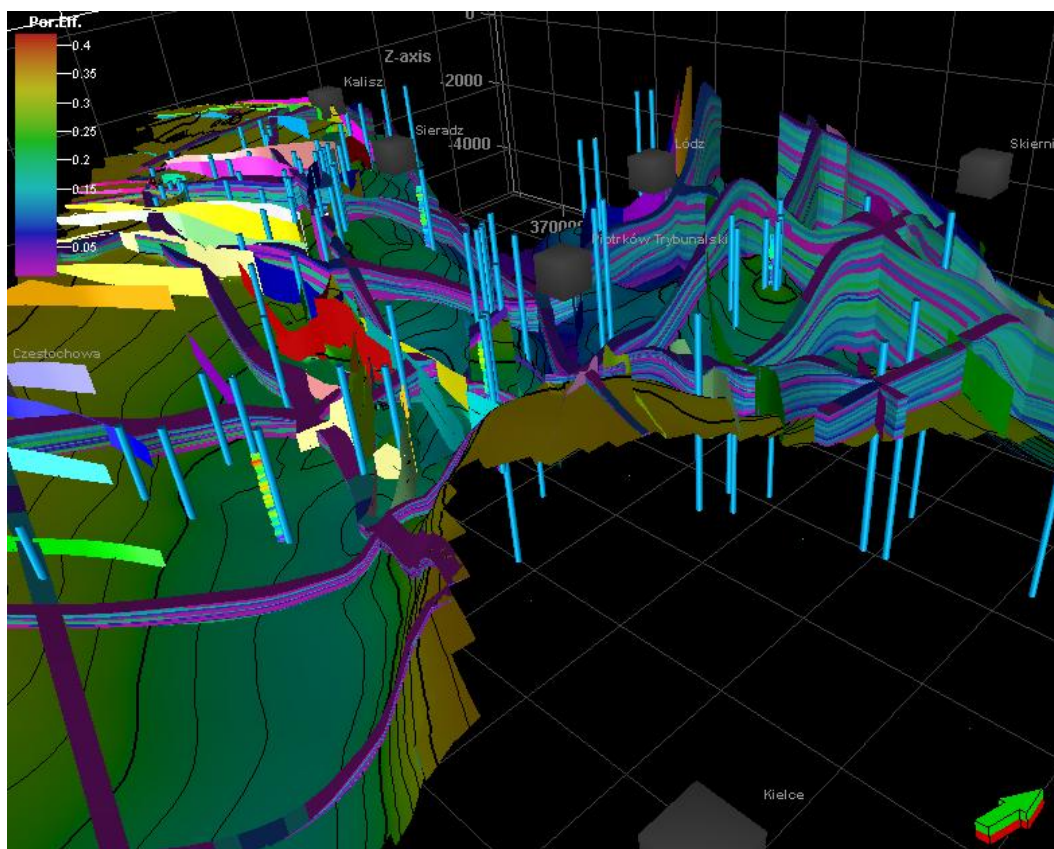
Nam e	Type	Min	Max	Delta	N	Mean	Std	Var
rednie zailenie Jura dolna- rodkowa								
	Cont.	0.01	1	0.99	163063	0.44	0.24	0.06
Srednie zailenie: kelowej								
	Cont.	0.03	0.94	0.9	5295	0.44	0.16	0.03
rednie zailenie: bajos gÓrny -baton								
	Cont.	0.02	1	0.98	27534	0.48	0.22	0.05
rednie zailenie: bajos dolny - toark gÓrny								
	Cont.	0.02	1	0.98	32425	0.4	0.26	0.07
rednie zailenie: formacja ciechoci ska (toark dolny)								
	Cont.	0.02	1	0.97	35135	0.5	0.26	0.07
rednie zailenie: pliensbach								
	Cont.	0.05	0.93	0.88	32588	0.3	0.15	0.02
rednie zailenie: hetang - synemur								
	Cont.	0.01	0.97	0.97	30086	0.54	0.24	0.06

Model porowato ci efektywnej powstał jako drugi model parametrów zbiornikowych. Modelowanie wykonano z zastosowaniem algorytmu Kriging Gslib, stosując generalnie takie same parametry modelowania jak zastosowane do obliczenia modelu zailenia. Tak e w tym przypadku modelowanie wykonano oddzielnie dla poszczegÓlnych sekwencji (*zones*) przy zastosowaniu

sterowania modelem litologicznym. Dodatkowo w procesie interpolacji zastosowano co-kriging pomi dzy modelem otworowym PHIE-m, modelem 3D zailenia. Syntetyczne wyniki modelowania przedstawia Rys. 1.1.15.6. Generalne statystyki porowato ci efektywnej kompleksów jurajskich zebrano w tabeli Tab. 1.1.15.4.

Tab. 1.1.15.4 Podstawowe statystyki modelu porowato ci efektywnej.

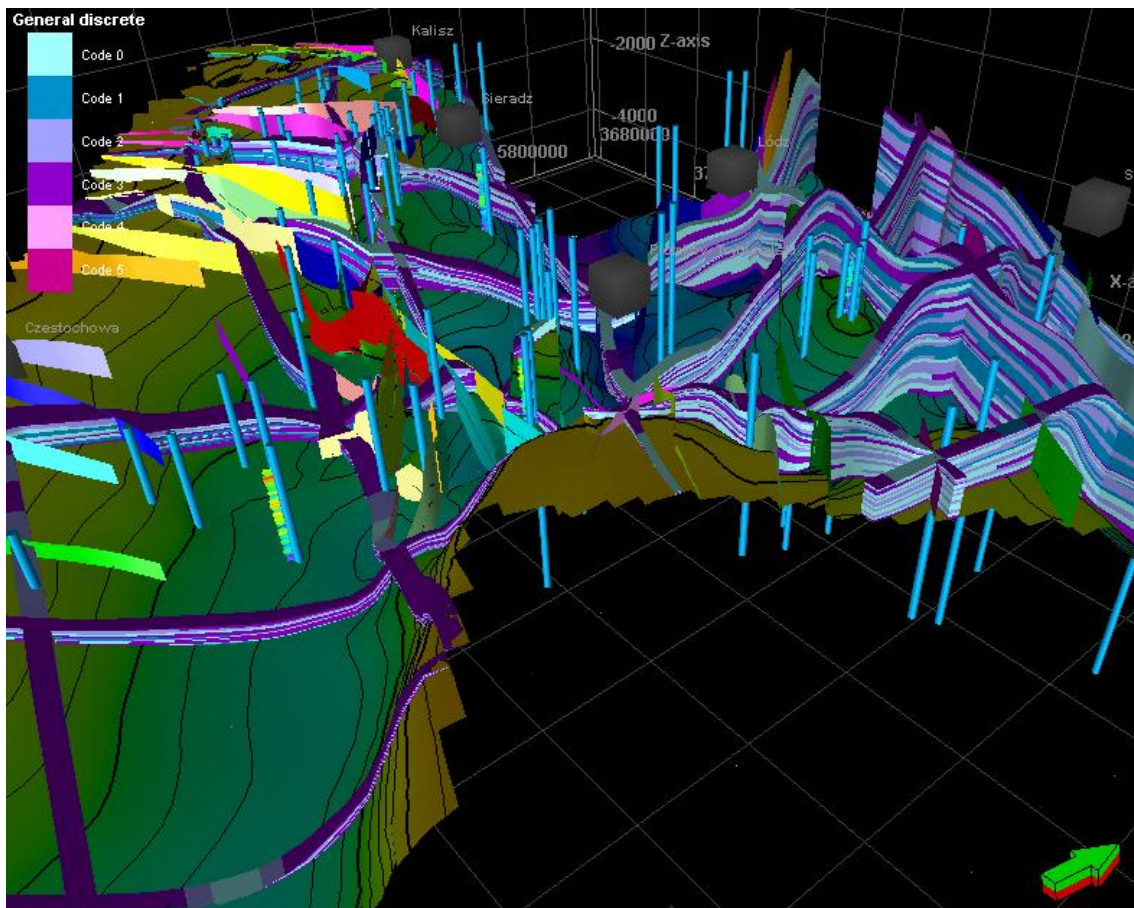
Name	Type	Min	Max	Delta	N	Mean	Std	Var
Srednie zailenie Jura dolna- rodkowa								
Property	Cont.	0	0.36	0.36	163063	0.1	0.08	0.01
Srednie zailenie: kelowej								
Property	Cont.	0	0.2	0.2	5295	0.03	0.04	0
rednie zailenie: bajos górny -baton								
Property	Cont.	0	0.28	0.28	27534	0.09	0.07	0
rednie zailenie: bajos dolny - toark górny								
Property	Cont.	0	0.27	0.27	32425	0.12	0.07	0.01
rednie zailenie: formacja ciechoci ska (toark dolny)								
Property	Cont.	0	0.24	0.24	35135	0.08	0.07	0
rednie zailenie: pliensbach								
Property	Cont.	0	0.356	0.356	32588	0.146	0.066	0.004
rednie zailenie: hetang - synemur								
Property	Cont.	0	0.214	0.214	30086	0.055	0.063	0.004



Rys. 1.1.15.6 Model porowato ci efektywnej utworów jury rodkowej i dolnej. (Diagram pętowy na tle mapy stropu triasu).

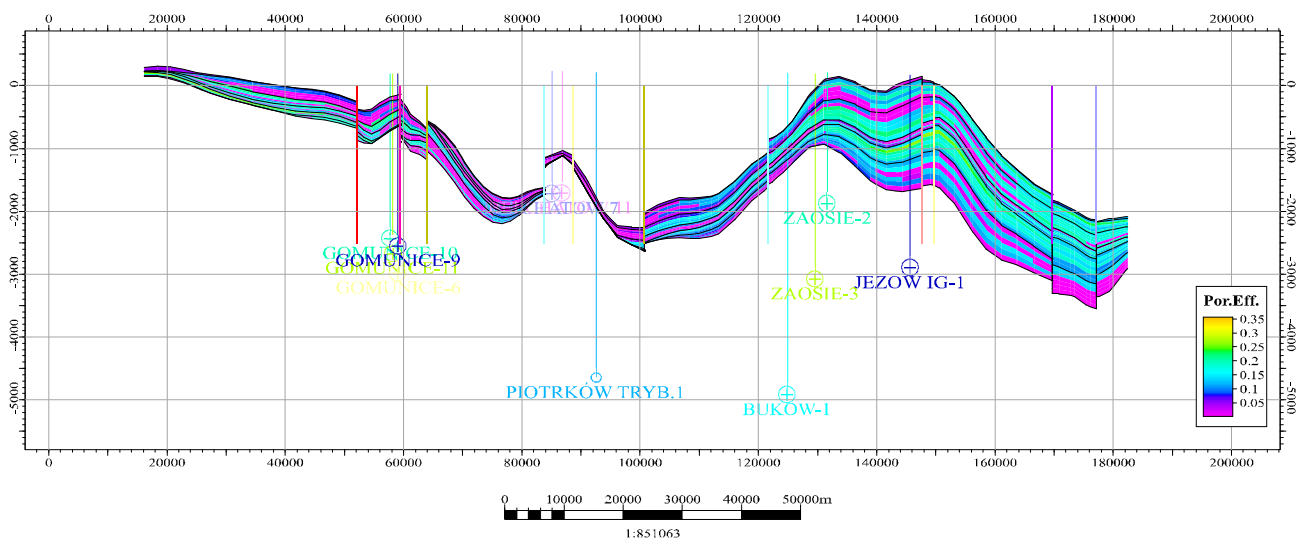
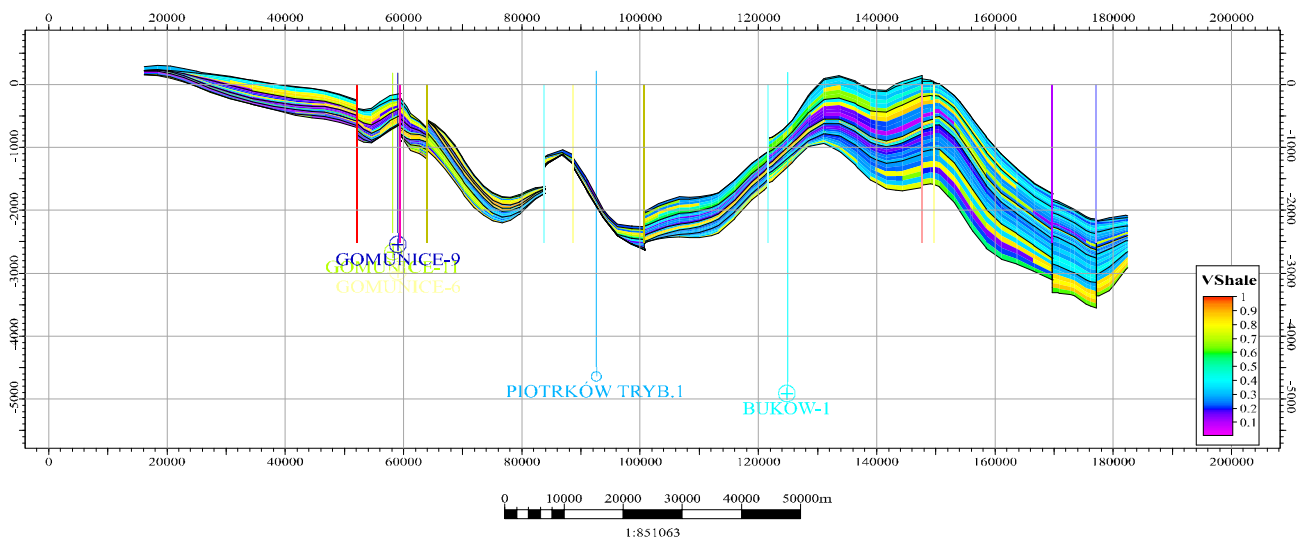
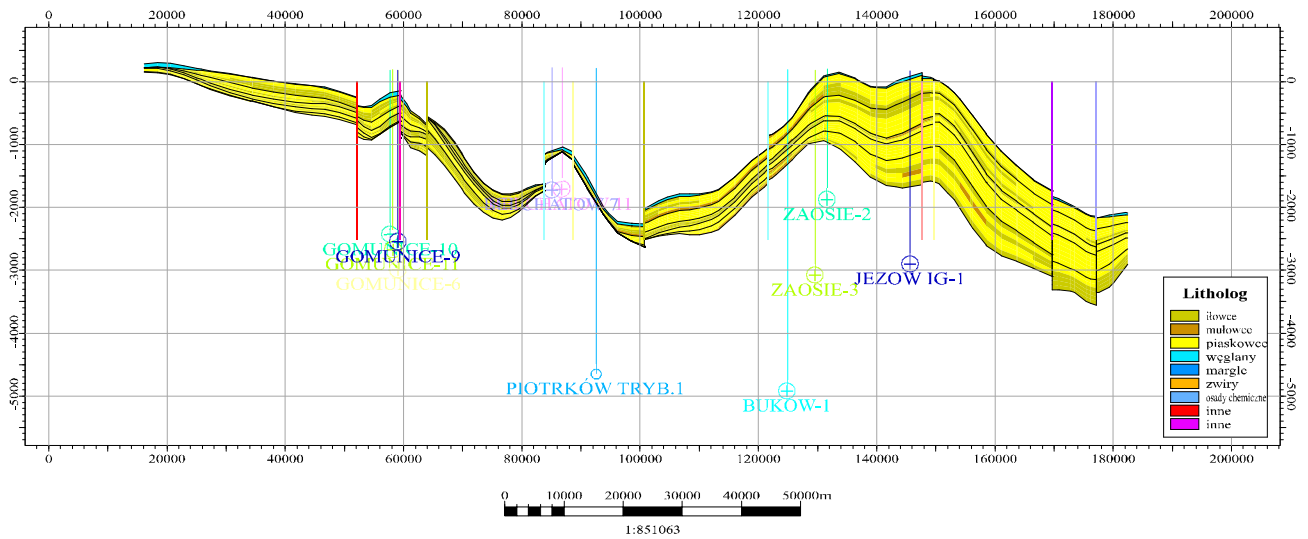
### Klasyfikacja pojemnościowy

Ostatnim etapem pracy stanowi opracowanie modelu pochodnego stanowiącego próbę statystycznej klasyfikacji pojemnościowej badanego ołowia. Na podstawie modeli porowatości efektywnej i zaimpermeabilizacji opracowano dyskretny model pokazujący rozprzestrzenienie dyskretnych klas skał wyznaczonych z wykorzystaniem sieci neuronowych w programie Petrel. Klasyfikacje te należy traktować jako rozwiązanie wstępne wartości dalszego opracowania, generalizując z pewnym uproszczeniem klasa oznaczona kodem 0 może być określona jako uszczelnienie, kod 1 mógłby w przybliżeniu odpowiadać uszczelnieniu wspomagającemu, utwory zaliczone do klasy 2 reprezentują skały o średnim zaimpermeabilizacji i średniej porowatości, natomiast utwory należące do klasy 3 stanowią dobre zbiorniki. Poglądowo przestrzenną dystrybucję klas pojemnościowych przedstawia diagram pętlowy (Rys. 1.1.15.7).



Rys. 1.1.15.7 Rozprzestrzenienie statystycznych klas pojemnościowych w profilu utworów jury środkowej i dolnej. (Diagram pętlowy na tle mapy stropu triasu).





Rys. 1.1.15.8 Rozkład litologii (górnica), zailenia (rodek) i porowatości efektywnej (dół) w utworach jury.

## **Modele gstości i oporności (PBG)**

Zadaniem **PBG** było opracowanie modeli gstości i oporności wzdłuż czterech profili sejsmicznych przecinających struktur Budziszewice-Zaosie. Były to profile: K0011276, K0041274, K0051275 o kierunku SW-NE i K0081274 o kierunku NW-SE o łącznej długości ok. 125 km. Gstości wyznaczono w kompleksach: kreda, jura górna, jura rodkowo-dolna, trias rodkowy, trias dolny i cechsztyń. Modele zbudowano do głębokości 5 km tj. poniżej stropu cechsztyń. Do wykonania zadania wykorzystano oprogramowanie komercyjne: LCT-FUGRO i SURFER, a także programy własne: GRID\_GV, WYKRES, PLOTVIEW.

### **Modele gstości.**

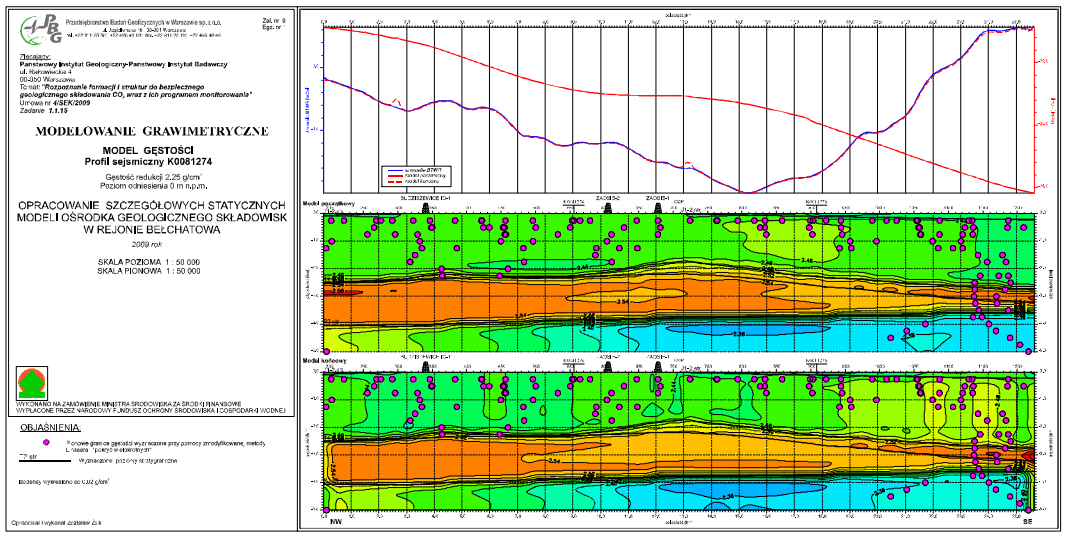
Do konstrukcji modeli strukturalno-gstościowych wykorzystano mapy strukturalne opracowane w ramach niniejszego opracowania (patrz też Rys. 1.1.14.5) i mapy rozkładów gstości zawarte w opracowaniu p.t. *Interpretacja badań geofizycznych w obszarze mapo-polsko-gielniowskim ó projekt badawczy nr 9T12B01919, L. Dziewińska, 2003 rok*, co zapewniało ciągłość ledzenia zmian gstości wzdłuż profili. Skonstruowane modele wprowadzono do systemu LCT-FUGRO i poddano modelowaniu gstości metodą inwersji przy założeniu, że zmiany gstości w procesie modelowania nie mogą przekraczać  $0.05\text{g/cm}^3$ .

Modele wstępne i końcowe przedstawione zostały na Rys. 1.1.15.10. Dodatkowo na przekroje gstości naniesiono przebieg pionowych granic gstości wyznaczonych przy pomocy zmodyfikowanej metody Linssera i metody śpokry wielokrotnych. Można zauważyć na modelach wynikowych, że granice te dość dobrze okonturowują zmiany gstości wzdłuż profili o kierunku SW-NE prostopadłych do rozcięcia struktury Budziszewice-Zaosie. Rozkład gstości można wiązać z litologią (np. piaskowce o wysokiej porowatości mają gstości niższe niż piaskowce o małej porowatości) i stopniem kompaktacji skały. Na przekrojach (Rys. 1.1.15.10) można zaobserwować kilka kompleksów gstościowych: największy, kenozoicznie-kredowy (kreda występuje lokalnie na NW skraju obszaru badań z Rys. 1.1.14.2), jurajsko-górnotriasowy, cechsztyńsko-triasowy i czerwonego spągowca wraz z jego podłożem.

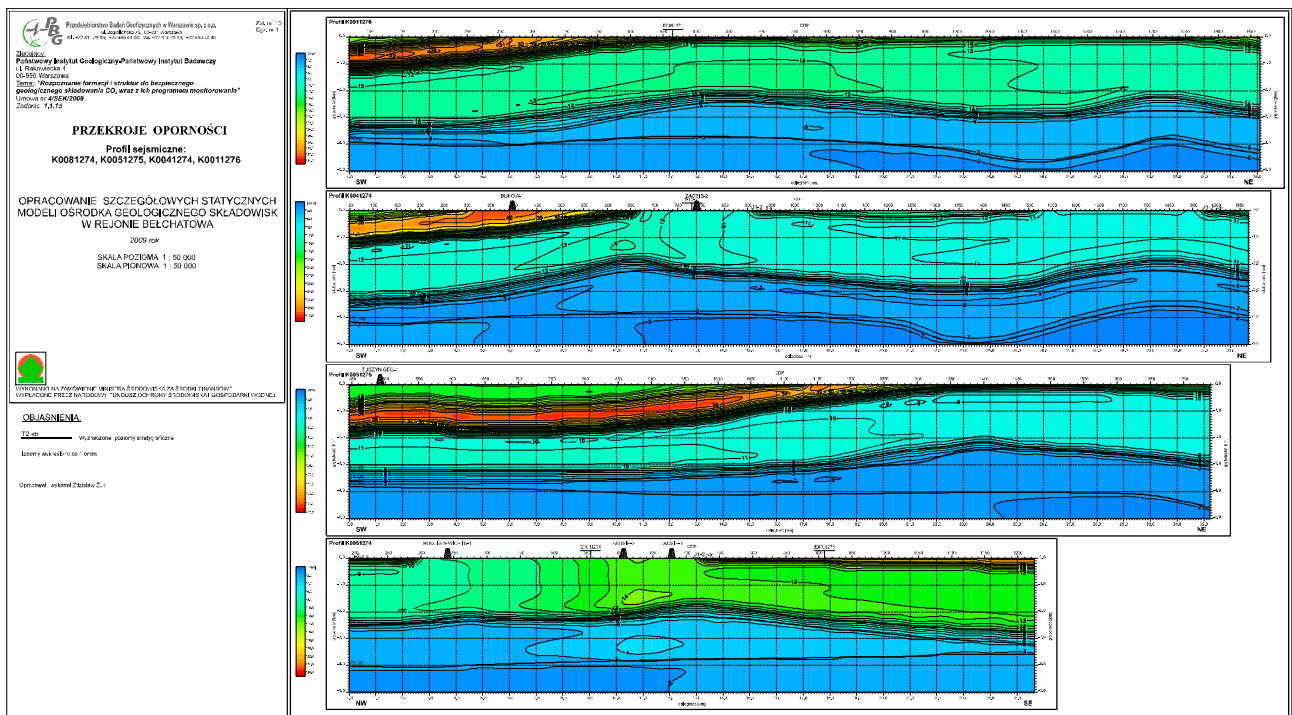
### **Modele oporności**

Do opracowania modeli oporności wykorzystano mapy strukturalne opracowane w ramach niniejszego opracowania, a także dane geofizyki wiertniczej zawarte w zbiorach w formacie LAS. W omawianym obszarze dostępnych były sześć otworów: Budziszewice IG-1, Zaosie-1, Zaosie-2, Zaosie-3, Buków-1 i Buków-2. Trudno sprawić brak występowania tego samego typu krzywej oporności we wszystkich otworach. Z tego powodu w opracowaniu nie uwzględniono otworu Zaosie-2. Do wyznaczenia wartości oporności wybrano dane z pomiaru sond gradientów spągów M0.5A0.1B (mnemonik EL02) ponieważ tylko te dane miały prawie pełną reprezentację we wszystkich otworach. Wyznaczono średnie wartości oporności w tych samych kompleksach jakiej przyjęto w modelach grawimetrycznych i wiąc te oporności w każdym kompleksie i w każdym otworze z mapami strukturalnymi uzyskano przestrzenny model oporności. Pozwoliło to na sporządzenie rozkładów oporności wzdłuż profili sejsmicznych (tych samych co przy modelach gstości). Zbiorcze zestawienie modeli oporności przedstawiono na Rys. 1.1.15.11. Niskie oporności oznaczone są odcieniami koloru niebieskiego a wysokie ółtego i czerwonego. Przy zbliżonej litologii niskie oporności mogą świadczyć o wzroście zasolenia, co potwierdzają informacje z kart otworów (analizy wód złoowych) - trias ma wody złoowe bardziej zasolone niż jura.





Rys.1.1.15.10 Wyniki modelowania grawimetrycznego wzdłuż wybranych profili sejsmicznych.



Rys.1.1.15.11 Rozkład oporności wzdłuż wybranych profili sejsmicznych.

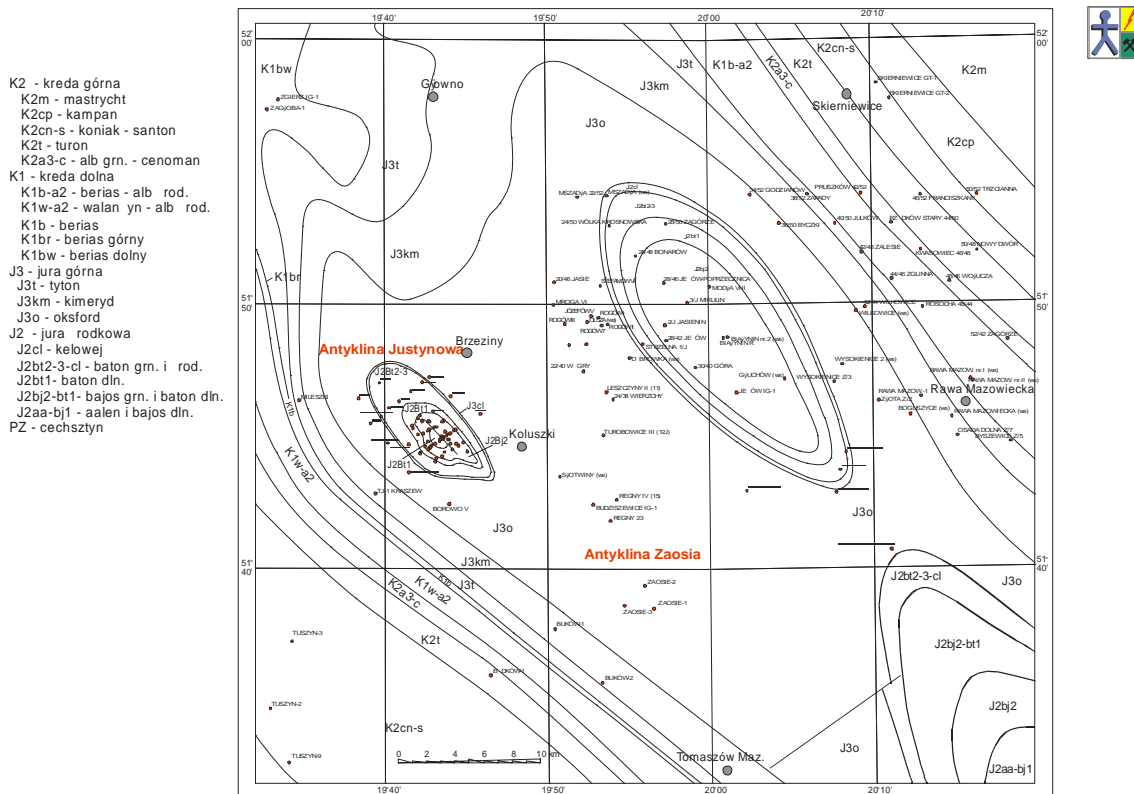
## Charakterystyka antyklin Zaosia i Justynowa, w tym utworów triasu dolnego (IGSMiE PAN)

IGSMiE PAN wykonał charakterystykę antyklin Zaosia i Justynowa (antyklina Zaosia nazywana jest w niniejszym opracowaniu strukturą Budziszewice-Zaosie, za antyklina Justynowa sięga od NW, w rejonie Koluszek), w szczególności dla utworów triasu dolnego. Dla tych struktur przedstawiono zarys budowy geologicznej oraz charakterystykę parametrów zbiornikowych.

### Charakterystyka rejonu bada

Zespół struktur solnych Rogoń-Justynów-Zaosie ciągnie się wzdłuż południowo-zachodniej krawędzi wałku kujawskiego (jednostki strukturalnej Rawy Mazowieckiej) pomiędzy Zgierzem na północy a Tomaszowem Mazowieckim na południu (Dadlez, red. 1988; Marek, Znosko 1972) (Rys. 1.1.15.12). Ten ciąg strukturalny jest reprezentowany przez wysad solny w Rogońcu oraz poduszki solne Justynowa i Zaosia, rozdzielone uskokami Tomaszów Mazowiecki-Buków.

Na mapie geologicznej Polski bez utworów kenozoicznych (Dadlez, Marek, Pokorski, 2000) rozważany zespół solny manifestuje się wychodniami cechsztynu a antyklina Justynowa - wychodniami jury rodkowej, a poduszka solna Zaosia zaznacza się wychodniami oksfordu, które stanowi trzon wałku kujawskiego (Rys. 1.1.15.12).



Rys. 1.1.15.12 Mapa geologiczna obszaru/ód -Justynów-Zaosie-Je ów (bez utworów kenozoiku)

Wgłębna budowa regionu Justynowa i Zaosia jest rozpoznana regionalnym i północnym zdjęciem sejsmiki refleksyjnej (Biaćk, Grzesik, Hać 1992; / obaziewicz, Misiewicz, Majewska 1976) oraz kilkoma głębokimi otworami wiertniczymi badającymi kompleks cechsztyński mezozoiczny i jego podłoża. Słone m.in. otwory: Zgierz IG-1, głębokość 4667,0 m - piaskowiec rodkowy; Budziszewice IG-1, głębokość 5601,0 m - karbon; Buków 1, głębokość 5105,0 m - cechsztyń Z1; Buków 2, głębokość 5143,0 m - karbon; Zaosie 1, 3530,0 m - cechsztyń

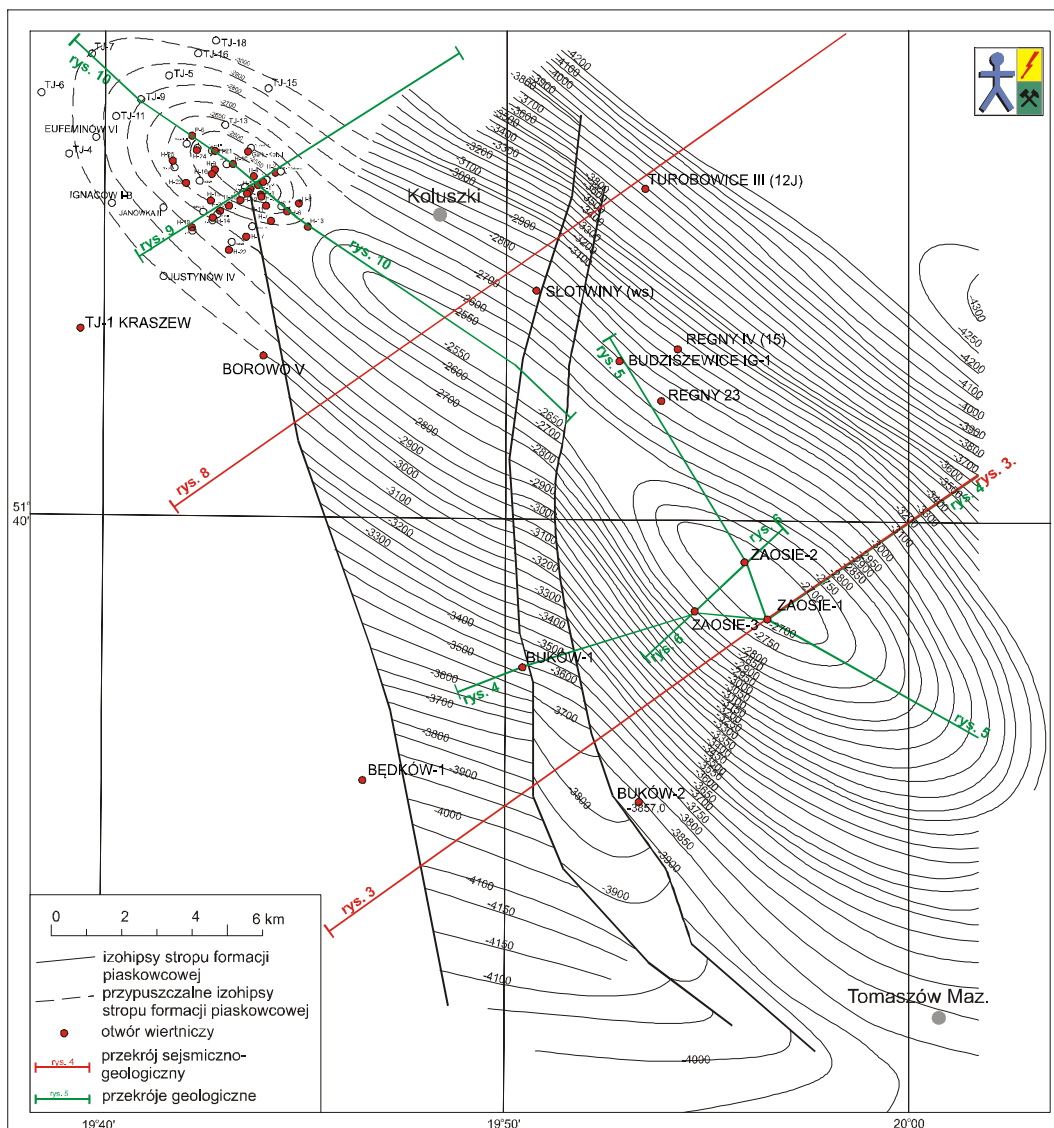


Z4; Zaosie 2, głębokość 2071,0 m - wapie muszlowy i Zaosie 3, głębokość 3255,0 m - pstry piaskowiec dolny oraz Je ów IG-1, głębokość 3062,0 m - pstry piaskowiec dolny. Dla rozpoznania antykliny Justynowa istotne znaczenie miały także punktowe otwory kartujce pod powierzchnią kenozoiku oraz wiercenia o głębokości do około 500 m w rejonie Gałówka wykonane przez Instytut Geologiczny na zlecenie Przedsiębiorstwa Przemysłu Gazowniczego.

Otwory te realizowane były w latach sześćdziesiątych i siedemdziesiątych dla określenia możliwości wykorzystania antykliny Justynowa jako podziemnego zbiornika w gwałtownych utworach jury środkowej i jury dolnej (toarku) (Marek 1959; Tyski, Calikowski i in. 1965).

Wyniki przeprowadzonych prac geofizycznych i geologicznych znalazły swój wyraz w licznych dokumentacjach oraz w opracowaniach monograficznych i kartograficznych, m.in.: Bloch 1979; Bojarski 1996; Dadlez red. 1998; Dadlez 2001; Dziwińska, Marek, Jówiak 2001; Marek red. 1971, 1973, 1977, 1983; Wysocka-Kudłowska 1989.

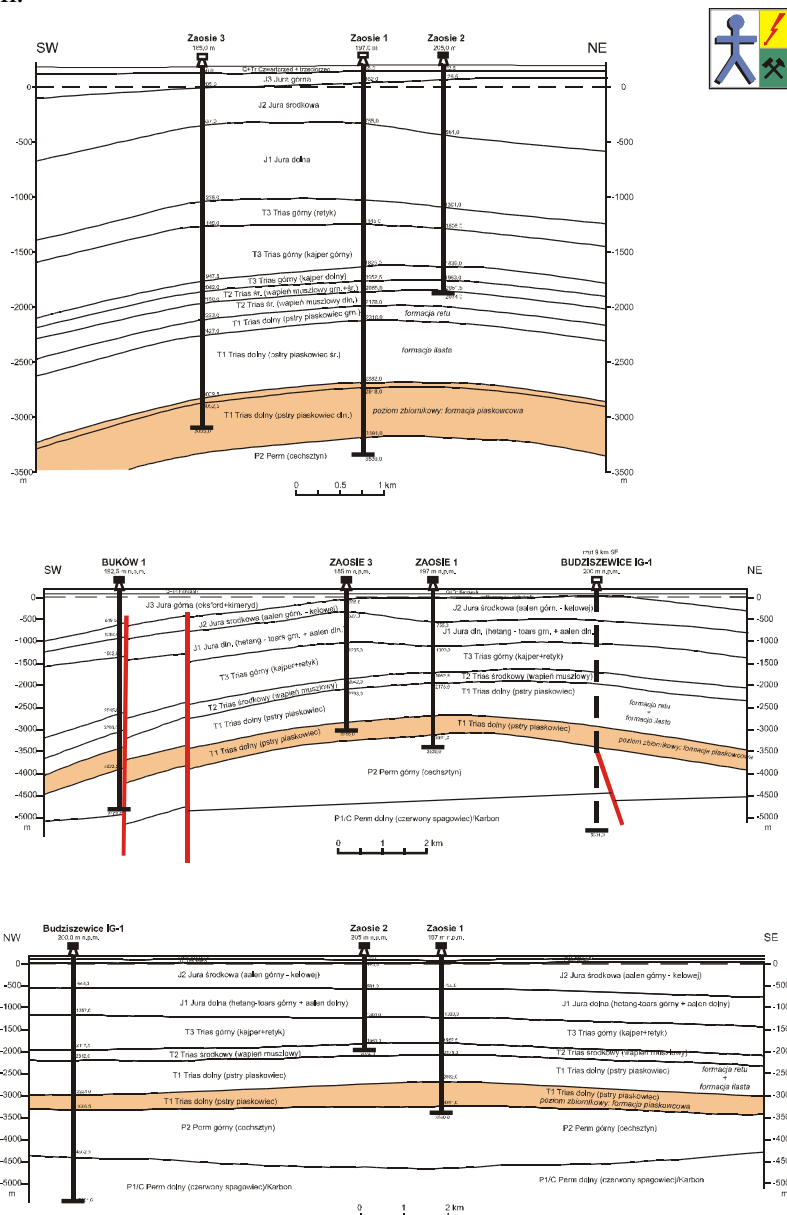
Z rozpoznania budowy geologiczno-strukturalnej kompleksu cechsztyńsko-mezozoicznego regionu Justynów-Zaosie można stwierdzić, że głównym poziomem zbiornikowym dla składowania CO<sub>2</sub> w rejonie Justynowa jest formacja piaskowca triasu dolnego, natomiast dla rejonu Zaosia otwory jury dolnej (szczególnie scharakteryzowane w innych podrozdziałach) i triasu dolnego.



Rys. 1.15.13 Mapa strukturalna stropu formacji piaskowcowej pstręgo piaskowca dolnego i spłogowej części pstręgo piaskowca środkowego w rejonie Justynów-Zaosie.

## Budowa i poziomy zbiornikowe antykliny Zaosia

Antyklina Zaosia leży na południowo-zachodnim krańcu wałku kujawskiego, około 5-6 km na północ od Tomaszowa Mazowieckiego. Jest ona przebadana szczególnie zdjęciem sejsmicznym oraz czterema głębokimi otworami wiertniczymi: Zaosie 1 i 2 w strefie centralnej, Zaosie 3 na bliskim skrzydle południowo-zachodnim i Budziszewice IG-1 na skrzydle północno-wschodnim (Rys. 1.1.15.13 i 14). W synklinie od strony południowo-zachodniej - niecki mogile skołdzkiej - profil kompleksu cechszty sko-mezozoicznego rozpoznano otworami Buków 1 i Buków 2. W przekroju poprzecznym poduszka solna Zaosia według ukształtowania powierzchni strukturalnych triasu dolnego jest formą owalno-elipsoidalną (Rys. 1.1.15.14). W planie strukturalnym pogranicza piaskowca dolnego i rodowego (stropu formacji piaskowcowej) wysoko poduszki Zaosia w stosunku do towarzyszących jej synklin wynosi ~300 m (od strony NE) i ~350-400 m (od strony SW). W osi podziemnej (NW-SE) amplituda struktury (obciętej od północno-zachodu uskokami Tomaszów Maz.-Buków) jest znacznie mniejsza i wynosi około 200 m.



Rys. 1.1.15.14 Przekroje geologiczne przez antyklinę Zaosia.

W mędszych powierzchniach strukturalnych antyklina Zaosia stopniowo ulega spęszczeniu. Amplituda antykliny na powierzchni strukturalnej sp gu jury rodkowej mierzona w stosunku do synkliny od strony półocno-wschodniej wynosi ~150 m, a od strony połdniowo-zachodniej ~200 m.

W obrazie intersekcyjnym podkenozoicznych wychodni mezozoiku (Rys. 1.1.15.13) antyklina Zaosia nie zaznacza si wyra nie bowiem znajduje si ona w polu oksfordu stanowi cego trzon wać kujawskiego. Wychodnie oksfordu s otulone tylko od strony połdniowo-zachodniej - niecki uniejowskiej - wychodniami mędszej jury górnej. Gęboko zakorzenione uskoki ograniczaj ce poduszk soln Zaosia (o maćj kilkudziesi ciu metrowej amplitudzie przesuni ) tn dolne partie kompleksu i utykaj gćwnie w górnym triasie i najni szej jurze. Dolno-triasowa formacja zostać rozpoznana w wierceniu Zaosie 1, gęb. 2882,0-3391,0 m, Zaosie 3, gęb. 3000,5-3255,0 m i w otworze Budziszewice IG-1, gęb. 3231,0-3605,5 m. Szacunkowo rednia mi szo formacji piaskowcowej w antyklinie Zaosia wynosi okoć 450 m.

Formacja piaskowcowa zbudowana jest z piaskowców drobno i rednio-ziarnistych, miejscami przek tnie warstwowanych, partiami nieco wapnistych, zawieraj cych otoczaki ićwców oraz nieliczne laminy ićwcowo-mućwcowe (Szyperko-Teller, Moryc 1988; Szyperko-Teller 1997). Nale y podkre li , e w dolnej cz ci profilu wzrasta zailenie, a w górnej cz ci odnoszonej do pstrego piaskowca rodkowego wzrasta wapnisto osadów w formie wkćdek wapieni i dolomitów. Udziać piaskowców w formacji przekracza 60% ( $\times 270$  m). Porowato piaskowców dochodzi do 10% a przepuszczalno 10-100 mD. Mineralizacja wód zć owych jest wysoka - osi ga 250 g/dcm<sup>3</sup>. S to solanki chlorkowo-wapniowe klasy IV-V, przy czym stopie metamorfizmu  $Na^+:Cl = 0,50-0,52$  (Bojarski 1996). Gradient cienia zć owego  $G_c = 0,93-1,0 \times 10^3$  hPa/10m, a gradient geotermiczny  $G_t = 2,2^\circ C/100$  m (Majorowicz 1983).

Formacja piaskowcowa jest uszczelniona kompleksem skać formacji ilastej pstrego piaskowca rodkowego i formacji retu pstrego piaskowca górnego. S to odpowiednio gćwnie osady ilasto-mućwcowe i ilasto-wapienno-ewaporytowe. / czna mi szo skać nadkćdu ksztaćuje si w granicach 704,0 m (Zaosie 1) do 912,0 m (Zaosie 3). rednia mi szo nadkćdu wynosi zatem okoć 830 m.

### **Budowa wewn trzna i poziomy zbiornikowe antykliny Justynowa**

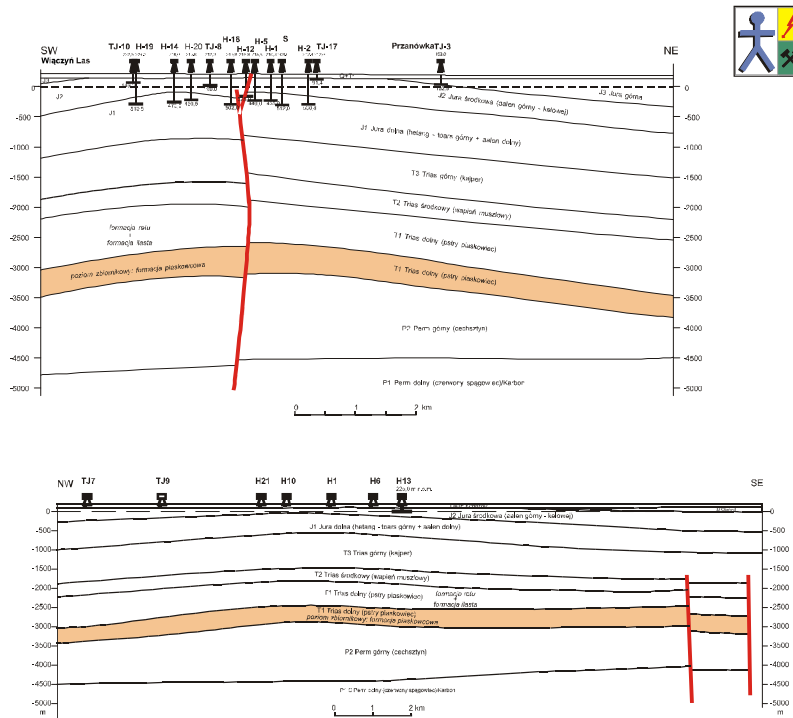
Antyklina Justynowa (poduszka solna) jest poć ona okoć 15 km na półocny wschód od/ odzi na zachodnim brzegu wać kujawskiego (Rys. 1.1.15.12). Jej ewolucja i budowa wewn trzna s podobne jak antykliny Zaosia. Jednak e najgćbsze wiercenie w obr bie antykliny Justynowa si gn ć tylko do stropowych warstw jury dolnej - toarsu. W zwi zku z tym interpretacj budowy geologicznej gćbszych partii kompleksu cechszy sko-mezozoicznego, warunków hydrogeologicznych i hydrochemicznych oraz parametrów fizyko-chemicznych skaćoparto przede wszystkim na regionalnych badaniach geologicznych i geofizycznych.

Na mapie geologicznej bez utworów kenozoicznych (Rys. 1.1.15.12) antyklina Justynowa zaznacza si jako elipsoidalne wypi trzenie utworów jury rodkowej wynurzaj cych si spod jury górnej. Przyjmuj c umownie zarys podkenozoicznych wychodni kontaktu jury rodkowej i górnej dćgo antykliny wynosi 11,5 km a szeroko 4,5 km.

Uksztaćowanie powierzchni strukturalnej sp gu pstrego piaskowca rodkowego (strop formacji piaskowcowej) ilustruj przekroje geologiczne (Rys. 1.1.15.15) oraz mapa strukturalna (Rys. 1.1.15.13). W kulminacji antykliny Justynowa strop formacji piaskowcowej jest przewidywany na gęboko ci -2500 m. Wedćg izohipsy stropu formacji piaskowcowej o warto ci -3000 m dćgo antykliny wynosi 14-15 km a jej szeroko wynosi okoć 8 km. Pierwszoplanowym poziomem zbiornikowym dla skćdowania CO<sub>2</sub> jest wspomniana dolnotriasowa formacja piaskowcowa. Mi szo formacji wynosi okoć 400 m, udziać piaskowców 60%, a ich porowato okoć 10%.

Utwory dolnej jury wystepuj tu zbyt pćtko aby mo na je w ogóle bra pod uwag jako

poziomy kolektorskie (w kulminacji struktury wszystkie na głębokości znacznie mniejszej niż 800 metrów).



Rys. 1.1.15.14 Przekroje geologiczne przez antyklin Zaosia.

### Pojemność składowania CO<sub>2</sub> struktur Zaosia i Justynowa

Dla antyklin Zaosia i Justynowa oszacowano wolumetryczną pojemność składowania oraz pojemność składowania wynikającą z rozpuszczenia CO<sub>2</sub> w wodzie złoowej. Wolumetryczną pojemność składowania CO<sub>2</sub> wyraża się następującym wzorem:

$$M_{CO_2s} = A \times h \times \varphi \times \rho_{CO_2} \times C_{efs}$$

gdzie:

$M_{CO_2s}$  – pojemność składowania CO<sub>2</sub> w strukturze geologicznej,

$A$  – powierzchnia,

$h$  – efektywna miąższość,

$\varphi$  – porowatość,

$\rho_{CO_2}$  – gęstość CO<sub>2</sub> w warunkach złoowych,

$C_{efs}$  – współczynnik efektywności składowania CO<sub>2</sub>.

Do obliczeń wykorzystano dane przedstawione w tabeli 8. Gęstość CO<sub>2</sub> w warunkach złoowych oszacowano na podstawie tabel (Span i Wagner, 1996). Współczynnik efektywności składowania CO<sub>2</sub> ( $C_{efs}$ ) przyjęto na poziomie 20%.

Pojemność składowania CO<sub>2</sub> z rozpuszczenia w wodzie złoowej oszacowano przy wykorzystaniu kalkulatora on-line (*Sequestration Calculators*), umożliwiając wyliczenie ilości dwutlenku węgla, jaka może rozpuścić się w wodzie zawartej w danej strukturze.

Wolumetryczną pojemność składowania CO<sub>2</sub> w utworach piaskowca wynosi odpowiednio dla antykliny Zaosia - 769,0 Mt; a dla antykliny Justynowa - 683,5 Mt.

Pojemność składowania z rozpuszczenia CO<sub>2</sub> w wodzie złoowej wynosi odpowiednio dla antykliny Zaosia - 68,4 Mt; a dla antykliny Justynowa - 70,7 Mt.

Całkowita pojemność składowania CO<sub>2</sub> w antyklinie Zaosia wynosi 837,3 Mt, w antyklinie Justynowa 754,2 Mt.

## **Model statyczny utworów triasu dolnego (INiG)**

Praca, wykonana przez INiG, przedstawia wynik wstępnego rozpoznania charakterystyki litologiczno-petrofizycznej utworów dolnego triasu (Tp2 i Tp1). Wykonanie bardziej szczegółowej, oraz obarczonej mniejszą niepewnością analizy uniemożliwia niewielka ilość danych charakteryzujących ten poziom; dotyczy to zarówno danych otworowych, jak również danych sejsmicznych w postaci wyniku inwersji sejsmicznej czy też atrybutów sejsmicznych. Z tego powodu konieczne było zastosowanie dwuetapowego procesu rozpoznania analizowanych struktur wodonośnych w obrębie utworów rodzowego i dolnego piaskowca. Podyktowane to polegało na budowie, w pierwszym etapie, modelu regionalnego obejmującego zestaw przestrzennych modeli litologicznych i parametrycznych (zależności, porównań - jakościowej i efektywnej, oraz przepuszczalności, którego segment stanowił obszar podlegający szczegółowemu rozpoznaniu. W drugim etapie prac element modelu regionalnego (obszar wyznaczonego modelu szczegółowego) poddano bardziej szczegółowej analizie, w której wykorzystane zostały wyniki realizacji etapu regionalnego, w szczególności informacje o charakterystyce zmienności litologiczno - petrofizycznej, wyrażonej podstawowymi parametrami statystycznymi.

## **Model regionalny utworów triasu dolnego (Tp2+Tp1)**

Osnowę geometryczną konstruowanego modelu regionalnego stanowiły powierzchnie stropu utworów rodzowego piaskowca (Tp2) oraz stropu utworów cechsztynu, a także interpolowane z danych otworowych, przy wykorzystaniu trendu powierzchni Tp2 i Pz, strop Tp1.

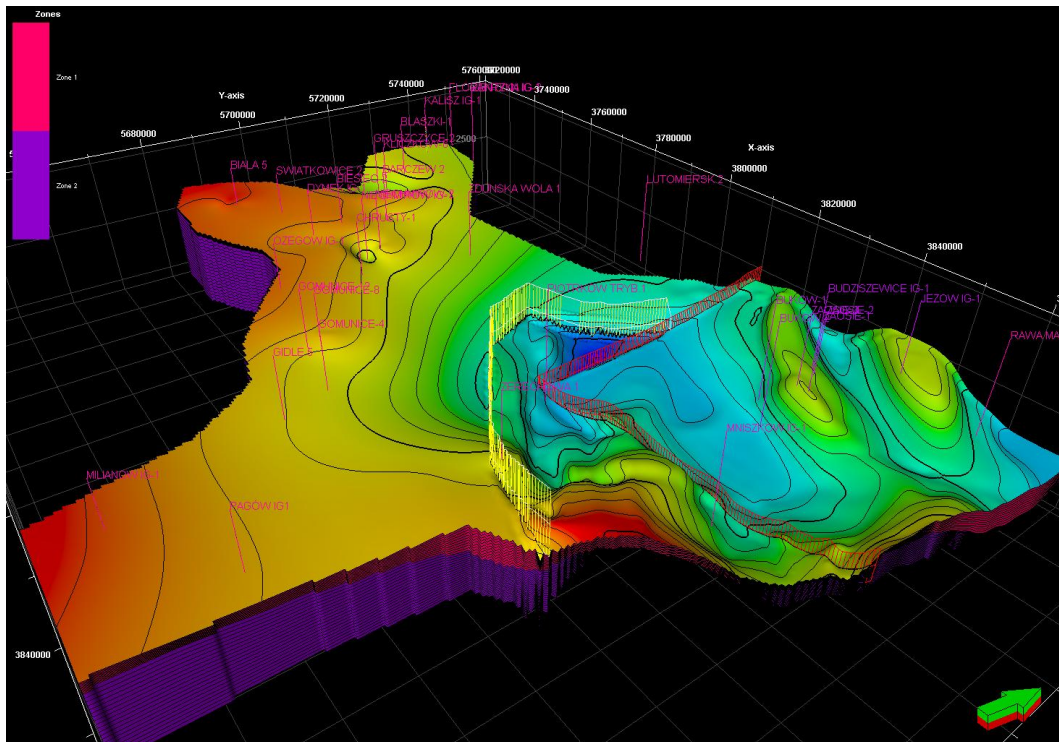
W tym celu poza obszarem modelu szczegółowego (rejon struktury Budziszewice-Zaose z szerokim marginesem - patrz Rys. 1.1.14.2), wykorzystano wycinkowo powierzchnie stropu Tp2 i Pz z modelu regionalnego I Segmentu, a w przypadku tego modelu regionalnego zastosowano interpolację danych otworowych w celu odwzorowania powierzchni strukturalnych Tp2 oraz Pz. Obszar docelowy przestrzennego modelu petrofizyczno - litologicznego utworów rodzowego i dolnego piaskowca stanowił segment modelu regionalnego, w związku z czym zachowując geometrię podyktowaną przez powierzchnie modelu szczegółowego Tp2 i Pz, możliwe było scharakteryzowanie zmienności petrofizycznej i fałdowej utworów triasu dolnego, jako wycinka większej części, oraz prześledzenie regionalnych trendów zmienności analizowanych parametrów.

Nieprecyzyjne odwzorowanie powierzchni strukturalnych Tp2, Tp1 oraz Pz poza obszarem szczegółowego modelu 3D, nie ma istotnego znaczenia, gdyż celem tego etapu prac było określenie charakterystyki statystycznej analizowanych parametrów (średnia, odchylenie standardowe, min, max, charakter anizotropii (parametry wariogramów), oraz prześledzenie trendów zmienności petrofizyczno-litologicznej.

W procesie konstrukcji regionalnego modelu utworów Tp2 i Tp1 wykorzystano dane z 31 otworów wiertniczych. Poszerzona baza danych dla modelu regionalnego pozwoliła scharakteryzować poziom triasu dolnego na analizowanym obszarze, pod kątem zmienności statystycznej. Zasięg obszaru, jaki analizowano w ramach modelu regionalnego przedstawiono na Rys. 1.1.15.15 (kolorem czerwonym zaznaczono obszar modelu szczegółowego, natomiast kolorem różowym obszaru dla której powierzchnie strukturalne przyjęto za modelem regionalnym I Segmentu; krawędzie modelu wskazują podział na dwie strefy Tp2 i Tp1 - strop Tp1 interpolowany z danych otworowych przy zachowaniu trendu powierzchni Tp2 i Pz).

Wyniki interpretacji profilowa geofizyki otworowej, oraz dostępnymi wynikami pomiarów petrofizycznych poddano analizie geostatystycznej (na kilku etapach poprzedzających obliczanie rozkładu przestrzennego) obejmującej m.in. (modelowanie kształtów histogramów, analizę wariogramiczną - anizotropia, analizę istniejących korelacji pomiędzy analizowanymi parametrami).





Rys.1.1.15.15 Zasięg modelu regionalnego oraz szczegółowego utworów triasu dolnego (Tp2+Tp1)

### Analiza geostatystyczna modelu regionalnego utworów triasu dolnego (Tp2, Tp1)

Dla modelu regionalnego analizowano te same parametry co w przypadku modelu szczegółowego, tj: zailenie, litologia, porowatość całkowita, porowatość efektywna, przepuszczalność.

Pierwszy etap analizy statystycznej obejmował up-scaling wyników interpretacji otworowych; przyjęto rozdzielczość pionową modelu regionalnego równą 35 m dla Tp2 oraz 62 m dla Tp1 i uśredniono logi petrofizyczne i litologiczne w interwałach pionowej rozdzielczości modelu. W przypadku parametrów takich jak: zailenie, porowatość całkowita i porowatość efektywna stosowano uśrednianie arytmetyczne, dla przepuszczalności średni geometryczny natomiast w przypadku profili litologicznych - "most of" czyli typ litologiczny najliczniej reprezentowany w danym interwale uśredniania został przyjmowany dla całości danego interwału.

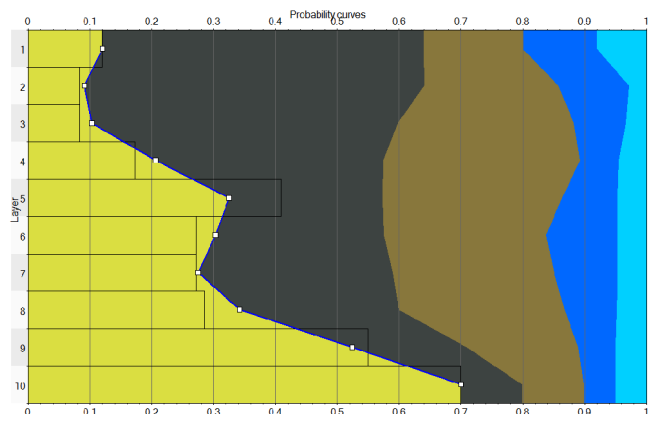
Efekt uśredniania objawia się ograniczeniem udziału ekstremalnych wartości zarówno minimalnych jak i maksymalnych na logach uśrednionych w stosunku do danych wejściowych. Z uwagi na fakt, iż konstruowany model regionalny ma na celu dostarczenie informacji nt. regionalnych trendów zmienności analizowanych parametrów, dopuszczano do wysokiego stopnia uśrednienia (smoothing).

Kolejne etapy analizy statystycznej obejmowały:

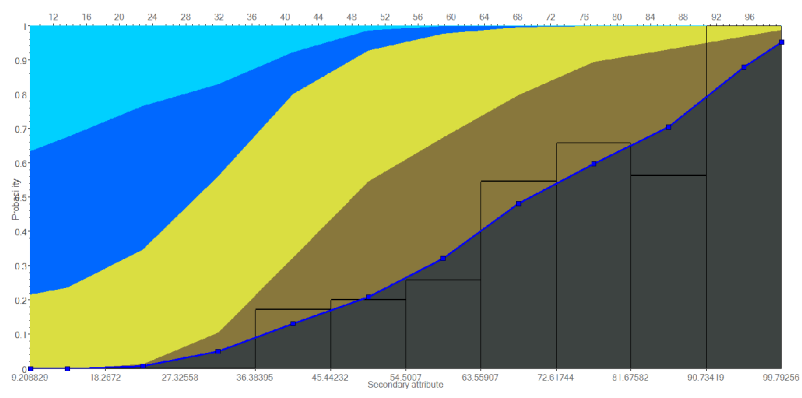
a) **profile litologiczne** - analiza krzywych proporcji poszczególnych typów litologicznych wzdłuż profilu triasu dolnego (w oparciu o dane otworowe - Rys. 1.1.15.16).

Dla profili litologicznych analizowano także korelację z parametrem zailenia (Vsh) wykorzystując funkcję Attribute Probability Curve - krzywe prawdopodobieństwa występowania danego typu litologicznego w zakresie wartości parametru zailenia (Rys. 1.1.15.17).

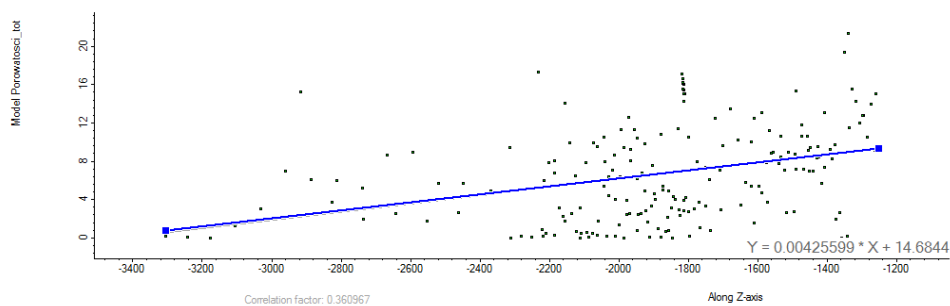
b) **porowatość całkowita, porowatość efektywna, zailenie**: definiowanie zakresów zmienności wyników obliczeń modeli przestrzennych, definiowanie trendów analizowanych parametrów (w przypadku porowatości całkowitej oraz porowatości efektywnej, obserwuje się trend 1D w kierunku pionowym polegający na wzroście wartości tych parametrów wraz ze spadkiem głębokości, natomiast w przypadku zailenia wraz ze wzrostem głębokości obserwuje się wzrost zawartości minerałów ilastych) (Rys.1.1.15.18-9).



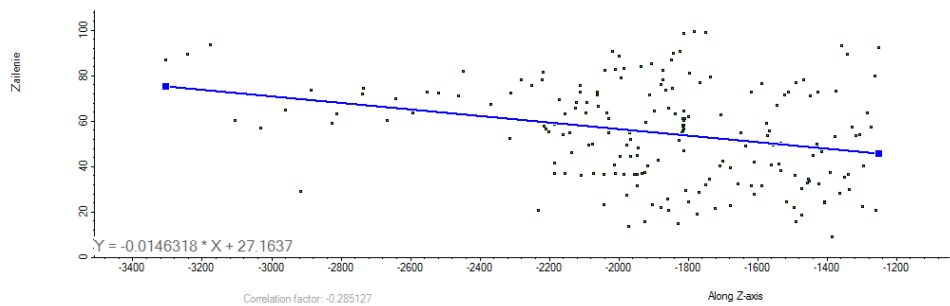
Rys.1.1.15.16 Pionowe krzywe udziału poszczególnych typów litofacjalnych w profilu Tp2



Rys. 1.1.15.17 Krzywe prawdopodobieństwa wystąpienia danego typu litologicznego w zakresie zmienności Vsh.



Rys. 1.1.15.18 Trend 1D w kierunku pionowego wzrostu porowatości wraz ze spadkiem głębokości (dla Tp2).



Rys. 1.1.15.19 Trend wzrostu zailenia wraz ze wzrostem głębokości (dla Tp2).

c) **przepuszczalno** : definiowanie zakresu zmienności przepuszczalności na modelu przestrzennym, transformacja do rozkładu logarytmicznego.

W przypadku wszystkich parametrów oprócz litologii dane wejściowe transformowano do rozkładów normalnych (wymóg zastosowania algorytmów sequential Gaussian simulation i Gaussian random function simulation).

Znormalizowane populacje danych otworowych poddano analizie wariograficznej w celu oszacowania regionalnego charakteru anizotropii analizowanych parametrów. Określano azymuty wyznaczające kierunki o największej korelacji w płaszczyźnie zbliżonej do horyzontalnej oraz zasięg korelacji (range wariogramu) w kierunkach horyzontalnych oraz pionowym. W oparciu o profile otworowe wyznaczono punkty początkowe wariogramów (nugget) odzwierciedlające zmienność danego parametru dla skali odpowiadającej odległościom mniejszym niż odległości pomiędzy punktami, dla których dysponowano danymi.

Wykorzystanie danych z 31 otworów pozwoliło na w miarę możliwości jednoznaczne określenie kierunków anizotropii poszczególnych parametrów, co w przypadku danych z jedynie kilku otworów nie byłoby możliwe. Parametry wariogramów mają kluczowe znaczenie na etapie obliczania rozkładów przestrzennych, gdy decydujemy o przestrzennej korelacji modelowanych parametrów, a więc o sposobie ekstrapolacji i interpolacji danych otworowych oraz skali ich wpływu na wynik symulacji/estymacji pomiędzy i poza otworami wiertniczymi.

### **Konstrukcja modeli przestrzennych**

Obliczanie rozkładów przestrzennych wykonywano metodami stochastycznymi (algorytmy Gaussian random function simulation oraz sequential Gaussian simulation - dla danych ilościowych (porowatość, zailenia, itp., oraz sequential indicator simulation - podczas konstrukcji modelu architektury litofacjalnej).

Zastosowanie metodyki stochastycznej wynika z ograniczonej ilości danych (dane literaturowe zalecają stosowanie metody deterministycznej w przypadku dostępnego zestawu około 100 odwiertów z danymi) oraz braku, na tym etapie realizacji projektu, deterministycznej koncepcji sedimentologicznej, która stanowiłaby osnowę konstruowanych modeli petrofizycznych (zarówno w sensie geometrycznym jak i ograniczenia przedziałów zmienności poszczególnych parametrów w ramach pojedynczego wydzielenia litologicznego lub facjalnego).

Elementem przypadkowości wyników obliczania modeli przestrzennych, charakterystyczny dla pojedynczej realizacji procesu obliczeniowego wykonanego metodami stochastycznymi, ograniczono poprzez realizowanie wielokrotnych obliczeń, a następnie obliczanie modeli będących średnimi arytmetycznymi wygenerowanych realizacji danego parametru. W ten sposób modelom litologiczno - parametrycznym (obliczanym metodami statystycznymi) nadawano cechy deterministyczne, zbliżające je do wyniku estymacji (kriging).

Należy zaznaczyć, iż niepewność uzyskanego odwzorowania zmienności petrofizyczno - litologicznej jest znacznie wyższa w przypadku utworów dolnego piaskowca (Tp1), szczególnie w obrębie wyznaczonym do badań, z uwagi na niedostępność, na tym etapie projektu, interpretacji litologiczno - petrofizycznej niektórych profili triasu dolnego.

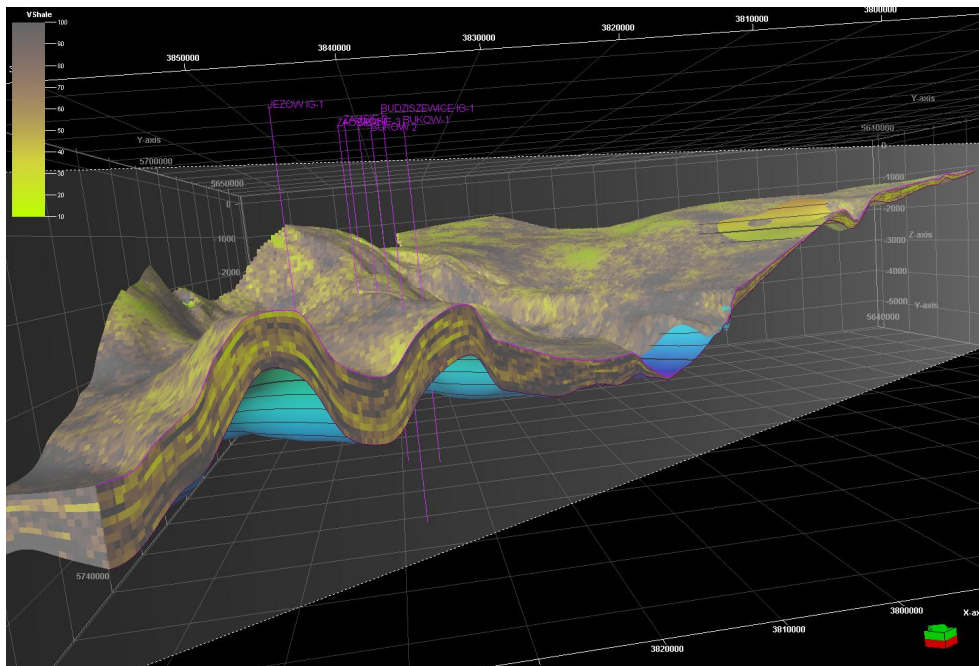
### **Zailenie**

Przestrzenny stochastyczny regionalny model 3D zailenia, wykonano wykorzystując otworowe profile zailenia uprzednio poddane analizie geostatystycznej (Rys.1.1.15.20).

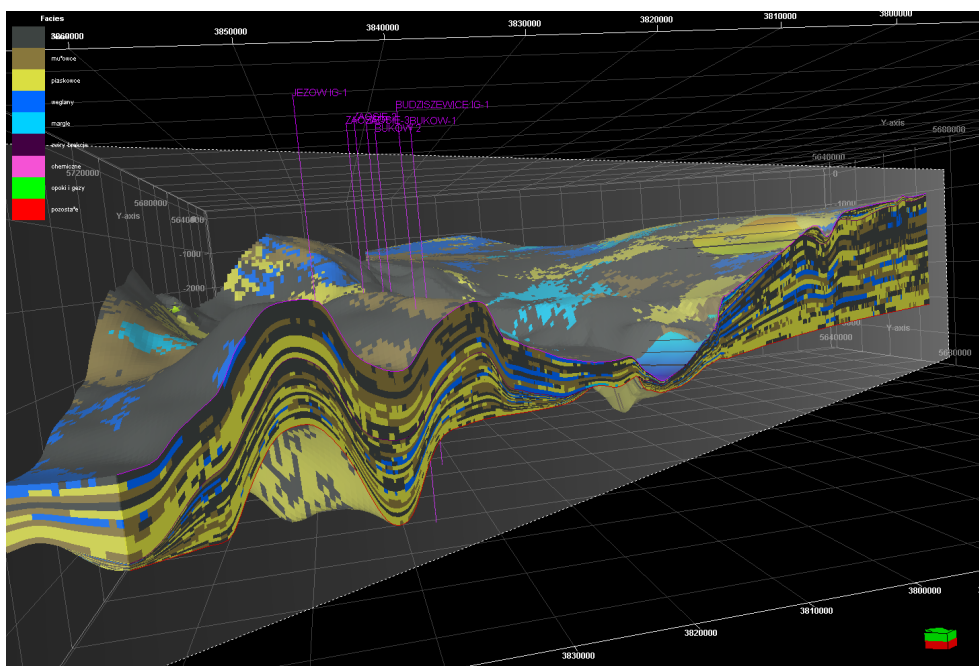
### **Litologia**

Model litologiczny obliczono (Rys.1.1.15.21) za pomocą dwóch nieco różniących się od siebie metod, tj. wykorzystując krzywe proporcji litologicznych w kierunku pionowym jako element optymalizacji modeli przestrzennych oraz wykorzystując opracowany model zailenia jako parametr sterujący rozkładem przestrzennej zmienności litologicznej w opcji attribute probability curve

(powinno być: powiązanie danych jakościowych - litologia, z danymi ilościowymi - zailenie, poprzez krzywe określające prawdopodobieństwo wystąpienia danego typu litologicznego w zakresie wartości parametru sterującego (zailenia).



Rys.1.1.15.20 Wizualizacja modelu zailenia utworów Tp2 (przekrój N-S przez antykliny Budziszewic i Jezowa).



Rys. 1.1.15.21 Przestrzenny regionalny model litologiczny Tp2+Tp1.

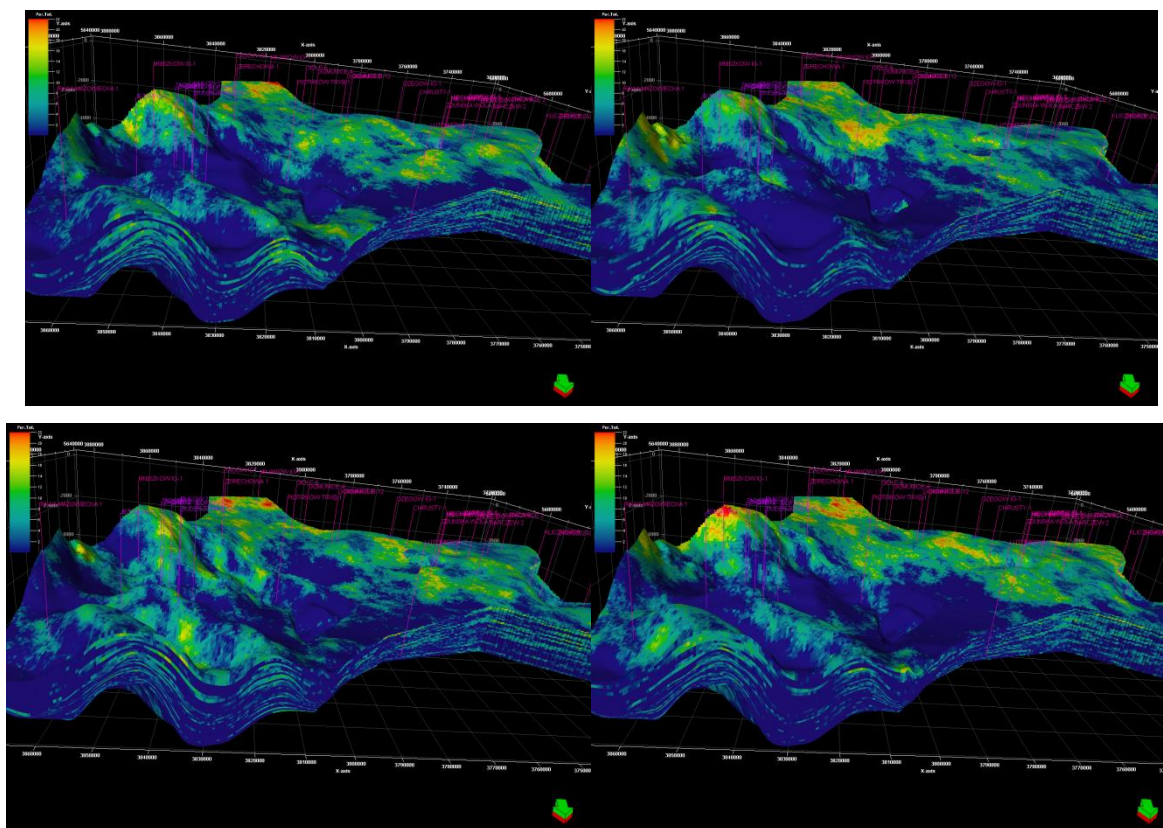
### Porowatość całkowita

Przestrzenne regionalne modele porowatości całkowitej (Rys.1.1.15.22) obliczono algorytmem Gaussian random function simulation (patent firmy Schlumberger) w realizacjach wielokrotnie powtarzanych, ostatecznie w opcji co-kriging z wykorzystaniem przestrzennego modelu zailenia



jako parametru (ujemnie skorelowanego) steruj cego rozkładem porowato ci całkowitej, ale tylko w poziomie Tp2 (korelacja  $\rho$  0.37).

Zwraca uwagę podobieństwo regionalnych trendów porowato ci całkowitej uzyskanych z wykorzystaniem modelu zailenia jako parametru steruj cego rozkładem porowato ci całkowitej (co-kriging) oraz modelowania porowato ci indywidualnie dla każdego wydzielenia litologicznego.



Rys.1.15.22 Wizualizacja kilku realizacji modelu porowato ci całkowitej utworów Tp2 i Tp1.

### Porowato całkowita

Model przestrzenny porowato ci efektywnej obliczono tym samym algorytmem co porowato całkowit, jednak w tym przypadku, jako parametr steruj cy symulacji wykorzystano model porowato ci całkowitej (współczynnik korelacji 0.59).

### Przepuszczalno

Skonstruowany model przestrzenny przepuszczalno ci, zarówno w skali regionalnej jak i szczególnie obarczony jest największą niepewnością z uwagi na bardzo ograniczoną ilość danych.

W związku z tym faktem do konstrukcji przestrzennego modelu przepuszczalno ci wykorzystano algorytm sieci neuronowych, określając relacje pomiędzy przepuszczalno ci a zaileniem, porowato ci całkowit i porowato ci efektywną. Relacja ta została wykorzystana do obliczenia tymczasowego modelu przepuszczalno ci (neural nets).

W następnej kolejności, w celu uzyskania charakterystyki statystycznej przepuszczalno ci, zbliżonej do obserwowanej w profilach otworów, modela przepuszczalno ci<sub>NN</sub> (neural nets) została wykorzystana w opcji co-kriging do obliczenia ostatecznego, regionalnego modelu przepuszczalno ci. Operacja ta przywróciła właściwe wartości przepuszczalno ci modelu 3D w profilach otworów wiertniczych, dla których dysponowano danymi przepuszczalno ci (algorytm neural nets nie zachowuje oryginalnych wartości w profilach otworów).

W ten sposób obliczone modele regionalne pozwoliły na znacznie dokładniejsze rozpoznanie charakteru zmienności litologiczno - petrofizycznej utworów rodzowego i dolnego



przestrego piaskowca, ni byby to mo liwe do uzyskaniu w oparciu o dane z kilku zaledwie otworów na obszarze szczegółowego modelu. Segment modelu regionalnego jest jednocze nie modelem w wyznaczonym obszarze bada , który, w zale no ci od potrzeb mo e by wykorzystany w pracach nad modelem dynamicznym (ok. 360 tys. bloków obliczeniowych).

### **Szczegółowy model przestrzenny w wyznaczonym obszarze bada**

W kolejnym etapie realizacji zadania, segment modelu regionalnego zostałpoddany pracom maj cym na celu uszczegółwienie konstruowanych modeli przestrzennych.

Dla modelu lokalnego zwi kszono rozdzielczo pionow do ok 25 m, zachowuj c rozdzielczo horyzontaln na tym samym poziomie (500x500m). Uzyskany w ten sposób grid zbudowany jest z ok. 480 tys. bloków.

W zaktualizowanej o bardziej szczegółowe uwarstwienie geometrii grida powtórzono procesy obliczeniowe dla tych samych parametrów co w przypadku modelu regionalnego, sporadycznie modyfikuj c ustawienia procesów obliczeniowych.

W ten sposób na detalicznym modelu lokalnym zachowany zostałregionalny trend zmienno ci petrofizycznej i litologicznej. Unikni to w tej sytuacji konieczno ci definiowania parametrów wariogramów (anizotropia) w oparciu o niewielk ilo danych.

Na kolejnych stronach opracowania przedstawiono grafik obrazuj c wyniki otrzymane w skali modelu szczegółowego w wyznaczonym obszarze bada .

### **Wnioski**

- a) Dzi ki podej ciu dwuetapowemu udał si , zdaniem autora w miar dobrze odwzorowa regionaln zmienno litologiczn oraz petrofizyczn , która nast pnie posł yła jako trend podczas konstruowania modelu szczegółowego.
- b) Precyzj przestrzennego odwzorowania charakteru zmienno ci utworów rodkowego i dolnego przestrego piaskowca z pewno ci poprawiaby dost pno wi kszej ilo ci danych, w tym danych otworowych czy te wyników przetwarzania i interpretacji danych sejsmicznych w postaci atrybutów sejsmicznych a przede wszystkim wyniku inwersji sejsmicznej.
- c) Wykorzystanie danych sejsmicznych oraz pełnych profili litologiczno - petrofizycznych utworów triasu dolnego pozwoliłoby zbudowa obarczony mniejsz niepewno ci , deterministyczny model litologiczny, dokładniej definiowa anizotropi o rodka skalnego, a tak e ogranicza zakres analizowanej zmienno ci statystycznej modeli parametrycznych (w sensie geometrycznym - w ramach geometrii zasi gów poszczególnych wydziale litologicznych oraz przedziałów zmienno ci analizowanych parametrów) oraz oblicza modele przestrzenne w opcji co-kriging (dla zailenia, porowato ci), stosuj c dane sejsmiczne jako parametr steruj cy rozkładem przestrzennym.
- d) W dalszej cz ci realizacji projektu, nale ałoby pokusi si o wykonanie analizy niepewno ci wyników modelowania przestrzennego w oparciu o wybrany parametr obj to ciowy (np. obj to przestrzeni porowej) (Sowizd ał2009).

## **Charakterystyka i analiza warunków hydrogeologicznych dla struktury Budziszewice-Zaosie (GIG)**

Zadanie to, realizowane przez GIG, dotyczy oceny możliwości składowania dwutlenku węgla w rejonie struktury Budziszewice-Zaosie, pod tymi warunkami hydrogeologicznymi.

### **Zarys warunków hydrogeologicznych i tektoniki rejonu**

W rejonie struktury Budziszewice-Zaosie udokumentowano utwory od permu, triasu, jury, kredy i neogenu.

Utwory dolnej i środkowej jury ( $J_{1-2}$ ) występują w obrębie lokalnej struktury antyklinalnej. Wykazuje ona rozciągłość NW-SE i jest zgodna z ogólnym przebiegiem struktur w obszarze województwa pomorsko-kujawskiego. Kulminacja antyklinalnej występuje na rzędnej ok. 0 m. Jej zbocze zachodnie jest strome i obniża się do -700 m oraz kontynuuje dalej do -1700 m, natomiast zbocze wschodnie jest łagodniejsze i obniża się do -200 m oraz dalej do -700 m. Przebieg izolinii stropu  $J_{1-2}$  wskazuje na **możliwe przecięcie antyklinalnej i/lub jej otoczenia trzema systemami uskoku**: od NE (w rejonie otworów Budziszewice i Jeńców) i od SW (w rejonie otworu Buków). Uskok w rejonie otworu Jeńców kontynuuje się do stropu dolnej kredy. Z kolei uskok w rejonie otworu Buków wykazuje znaczny zrzut, rzędu 400 m, ale według wyników reinterpretacji danych sejsmicznych (PIG) pojawia się w górnym triasie i nie sięga jury.

W rejonie Budziszewice-Zaosie większość otworów dolnej jury zmniejsza się w kierunku na SW od 665 m w otworze Budziszewice IG-1 do 522 m w otworze Zaosie 2; jedynie w otworze Buków 1 wynosi 323 m. Utwory tego wieku reprezentowane są przez naprzemianległe kompleksy osadów piaszczystych i mułkowo-iłastych. Szczegółowa analiza zawartości frakcji ziarnowych w osadach dolnej/środkowej jury wykazała, że zasięgi zarówno serii przepuszczalnych jak i izolacyjnych wielokrotnie wykraczają poza obręb poszczególnych formacji - powiększając lub lokalnie zmniejszając ich rozprzestrzenienie. Zapaszczone są również niektóre odcinki triasu górnego (noryku) oraz triasu dolnego. Poniżej przedstawiono charakterystykę wydzielonych kolektorów i izolacji.

### **Wyksztalcenie litologiczne i analiza szczelności nadkładu**

W pracy dokonano podziału utworów w zależności od procentowej zawartości frakcji ilastej i pylastej, na podstawie wyników interpretacji krzywych geofizyki wiertniczej charakteryzujących sztywność utworów. Przyjeto założenie, że sztywność to sumaryczna zawartość frakcji pylastej i ilastej ( $F_{il+pyl}$ ). Do analizy wykorzystano podział nomenklatury osadów według normy PN-EN ISO 14689-1 z 2006 roku. p.t. Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie skał Cz. 1. Oznaczanie i opis.

Powyżej przedziału ilościowego wykorzystano do schematyzacji profili w otworach: Jeńców IG-1, Budziszewice IG-1, Zaosie -2 i Buków 1.

### **Analiza zailenia**

Przez nadkład rozumiany jest kompleks utworów zalegających w stropie aalenu dolnego. Przedmiotem analizy był interwał poniżej głębokości 300 m p.p.t. Osady zalegające powyżej nie były rozpatrywane; stanowi je utwory młodszych ogniwi jury oraz osady kredy i neogenu.

**Utwory nadkładu**, zalegające poniżej głębokości 300 m p.p.t., reprezentowane są przez młodsze ogniwa jury. Spójny nadkład wykazuje znaczne deniwelacje. Obniża się on od głębokości 626 m w rejonie otworu Jeńców IG-1 do 649,75 w otworze Budziszewice 1, następnie wznosi w kierunku południowym do 517,75 w otw. Zaosie 2, by w kierunku na SE obniżyć się do 1058 m (otw. Buków 1). Efektem znacznych deniwelacji jest duże zróżnicowanie wysokości nadkładu od 626 m w NE części (otw. Jeńców IG-1) do 1058 m w SW (otw. Buków 1).

Względem nadkładu przyszłego składowiska na CO<sub>2</sub> istnieją wysokie wymagania dotyczące

szczelności. Według Dyrektywy UE dot. podziemnego składowania CO<sub>2</sub> (Dyrektywa 2009) szczelność zbiornika ma być zapewniona na okres do 1000 lat. Najbardziej precyzyjne rozpoznanie zawadnienia nadkładu można uzyskać w wyniku polowych badań hydrogeologicznych wykonanych w otworach badawczych. Ale tych jest niewiele. Z tego względu do wnioskowania wykorzystano wyniki badań geofizycznych, w ramach których określono tzw. zailenie, porowatość (całkowitą) i przepuszczalność utworów.

Aby pogłębić wnioski w zakresie zawadnienia nadkładu, zgodnie z normą wydzielono 3 główne przedziały zawartości frakcji ilastej i pylastej (fr. il+pył):

- do 40 %,
- 40- 72%
- powyżej 72%.

Zawartość frakcji ilastej i pylastej może ogólnie wskazywać na charakter uszczelniający lub przepuszczalny danego fragmentu profilu. Zawartość frakcji ilastej i pylastej do 40% charakterystyczna jest dla piaskowców zailonych, a więc utworów w ogólnym ujęciu przepuszczalnych; 40-72% dla mułków/iłków zapiaszczonych, a więc utworów słabiej przepuszczalnych, oraz >72% dla iłków/mułków, to jest utworów praktycznie nieprzepuszczalnych. Zbiorcze zestawienie zawartości tych frakcji w utworach dolnej jury i triasu przedstawiono w załączniku 1.

W nadkładzie sumaryczny udział utworów nieprzepuszczalnych (fr. il+pył >72%) jest na ogół niewielki i wynosi 2,5-158,75 m. Stanowi to 1-45 % utworów nadkładu, zalegających poniżej 300 m p.p.t. (najwięcej w otworze Budziszewice IG-1, a najmniej ów w Zaosiu 2).

W nadkładzie dominują utwory o zawartości frakcji il+pył w ilości 40-72%. Jest to charakterystyczne dla utworów ilastych zapiaszczonych, a więc słabo przepuszczalnych. Znaczna jest również zawartość utworów przepuszczalnych, o małej zawartości wspomnianych frakcji, do 40%. Dotyczy to zwłaszcza otworu Buków 1, w którym 58% profilu nadkładu (to jest 614,5 m) stanowi osady piaszczyste, z czego ponad 226 m tworzą piaskowce o zawartości frakcji ilastej i pylastej do 15%. Znacznie zapiaszczony jest również rejon otworu Zaosie 2. Wyniki badań geofizyki wiertniczej nie potwierdzają jednak znacznych przepuszczalności utworów piaszczystych. Podsumowując należy stwierdzić, że nadkład aalenu dolnego tworzą w znacznej części utwory piaszczyste zailone oraz ilaste utwory zapiaszczone, o redniej i dużej porowatości oraz niezbyt wysokiej przepuszczalności.

Całkowita miąższość nadkładu (do stropu utworów dolnego aalenu) jest niezbyt duża i wynosi w granicach projektowanego składowiska Budziszewice, od 649,75 na północy do 1058 m na południu.

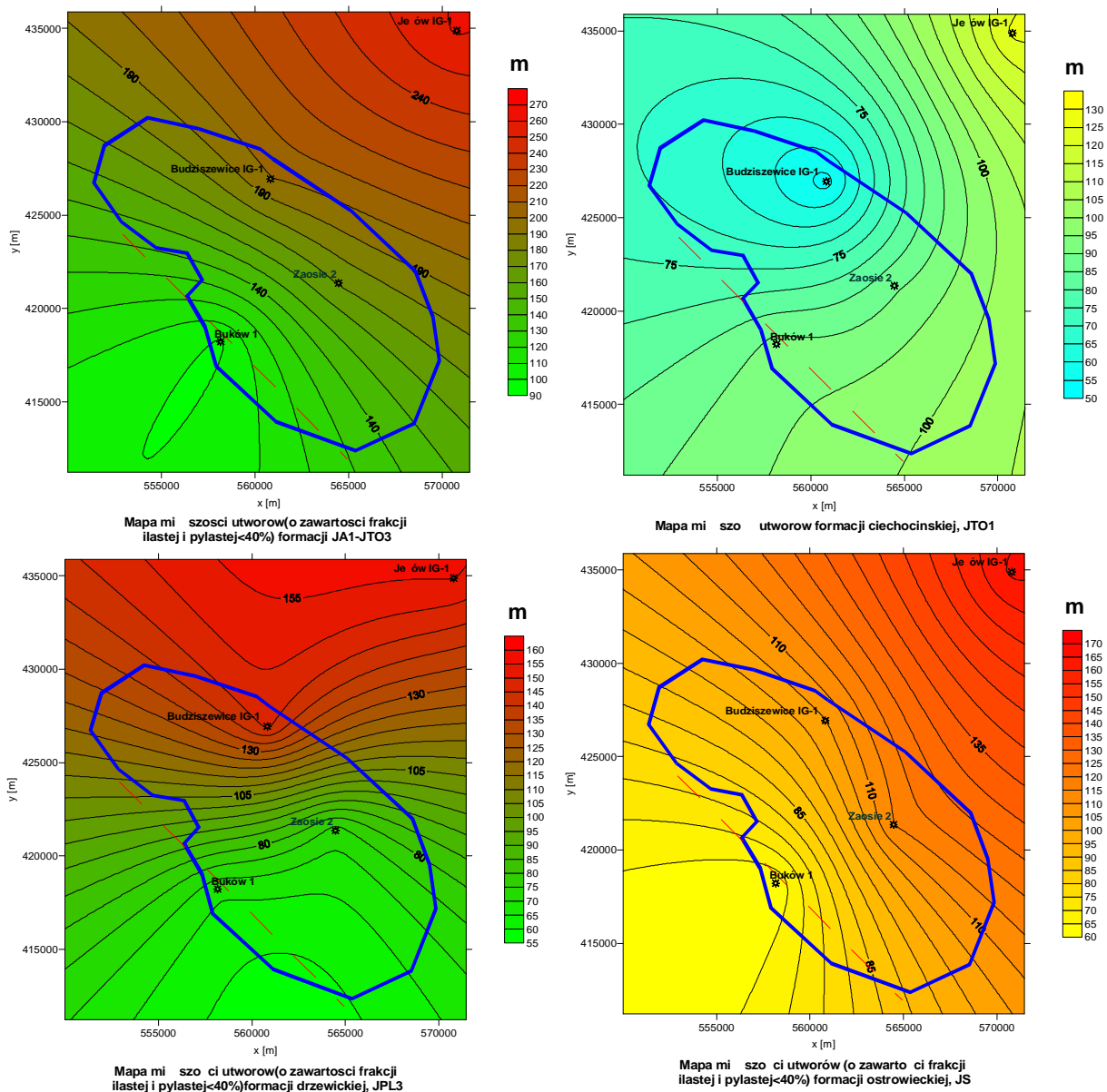
### **Analiza parametrów hydrogeologicznych nadkładu**

Na podstawie profilowania geofizycznego w otworach wiertniczych oraz badań laboratoryjnych określono porowatość i przepuszczalność utworów nadkładu dolnego aalenu. Porowatość zmienia się od 16% na północy (otw. Jeńców IG-1) do 21% na południu (otw. Buków 1) a przepuszczalność sięga od kilku do kilkuset mD, zależnie od litologii, co daje rednio kilkanaście-kilkadziesiąt mD, w zależności od otworu. Są to więc utwory słabo przepuszczalne, o porowatości kwalifikującej się do redniej i dużej (Pazdro, 1977).

Dla utworów nadkładu aalenu dolnego nie dysponowano informacjami o polowych badaniach hydrogeologicznych.

### **Temperatura górotworu w nadkładzie**

Temperatura górotworu w stropie jury rodkowej wynosi około 20°C (Górecki, red. 2006), a jury dolnej około 30°C, zależnie od głębokości. Rejon Budziszewice-Zaosie znajduje się w pasie obniżonej temperatury, ciągnącym się w kierunku z SE na NW. Może to świadczyć o zasilaniu tego kompleksu z południowego wschodu, tj. ze strony masywu wiłtokrzyskiego.



Rys. 1.1.15.23 Mapy mi szo ci utworów piaszczystych formacji kolektorskich w rejonie Budziszewice-Zaosie.

### Mineralizacja wód w nadsadzie

W utworach jury rodkowej mineralizacja nie przekracza 5 g/l. Rejon Budziszewice-Zaosie znajduje si w zasi gu lokalnie obni onej mineralizacji wód podziemnych (Górecki, red., 2005). Jej zasi g mo e wskazywa na zasilanie utworów z kierunku SE (masywu wi tokrzyskiego).

### Analiza utworów zbiornikowych oraz izolacyjnych jury dolnej i triasu

W rejonie potencjalnego sk adowiska CO<sub>2</sub> Budziszewice wyst puj 3-4 potencjalne kolektory mo liwe do wykorzystania do sk adowania dwutlenku w gla. S one odizolowane od siebie nieci gmi warstwami s abo przepuszczalnymi.

### Analiza zailenia i parametrów hydrogeologicznych

Mi szo poszczególnych serii, zawarto frakcji ilastej i pylastej oraz podstawowe parametry hydrogeologiczne przedstawiono zbiorczo w tabeli 1.1.15.1.

### **Kolektor JA1+JTO3, dolny aalen-górny toark (formacja borucicka)**

Strop kolektora występuje do punkto, to jest na głębokości od 650 m na północy (-451 m) do 518,25 na południu (-315 m) i jedynie w SW kierunku do 1058 m (-865 m). Jego miąższość jest zróżnicowana i wynosi 199,5 na północy, 170,9 m na południu i 99 m na kierunku SW (Rys. 1.1.15.23). Kolektor tworzy utwory piaszczyste z przewarstwieniami ilastymi. Poza obszarem składowiska jest w otworze Jeńców IG-1 - miąższość utworów wynosi do 261 m.

Zawartość procentowa frakcji ilastej i pylastej oraz podstawowe parametry hydrogeologiczne przedstawiono zbiorczo w tabeli 1.1.15.1. Kolektor tworzy głównie utwory zawierające do 40% frakcji ilastej i pylastej. Ich sumaryczna miąższość (pomiędzy otwór Jeńców IG-1) zmienia się od 43 do 170,9 m. Podziemnie występują utwory żyłone, o większej zawartości frakcji ilastych, w granicach 40-72%. Ich sumaryczna miąższość waha się w zależności od otworu od 1,65 do 9,75 m. Średnia wartość żyłienia utworów kolektora wynosi od 11% do 25%. Zwraca uwagę do duża porowatość, 18-24% i stosunkowo dobra przepuszczalność rzędu 200 mD.

Kolektor ten w rejonie otworu Buków 1 jest odizolowany od piaszczystego nadkładu jedynie cienką serią osadów bajosu i batonu. Zawartość utworów o charakterze izolacyjnym wynosi jedynie 78 m, a utworów częściowo izolacyjnych (o zawartości frakcji ilastej i pylastej w granicach 40-72%) 65 m. Między nimi występują przewarstwienia piaszczyste o sumarycznej miąższości 24,75 m.

Ocenia się, że:

1. izolacja kolektora JA1-JTO3 w stropie nie jest wystarczająca do zatrzymywania CO<sub>2</sub>, zwłaszcza w rejonie otworu Buków 1
2. za duża głębokość zalegania kolektora (zwłaszcza w najwyższej partii struktury otwór Zaosie 2), za wyjątkiem jego kierunku SW, w rejonie otworu Buków 1
3. miąższość kolektora jest znaczna (99-199 m), porowatość jest średnia i duża, za przepuszczalność dobra, ale relatywnie niezbyt wysoka.
4. na utwory kolektorskie składają się głównie utwory piaszczyste żyłone (to jest o zawartości frakcji ilastej i pylastej do 40%).

### **Utwory izolacyjne formacji ciechocińskiej**

Utwory tworzą cienką serię o miąższości rosnącej z północy na południe (Rys. 1.1.15.23) od 52 m (otw. Budziszewice) do 91 m (otw. Buków 1). Seria tworzy głównie utwory ilaste zapiaszczone (tj. o zawartości frakcji ilastej i pylastej 40-72%), o sumarycznej miąższości 11,5-62,75 m. Występują również ilowce/mułowce (o zawartości frakcji >72%), których miąższość wynosi średnio 5,75-15,2 m. Jedynie w SW kierunku miąższość wynosi do 80 m (rejon otworu Buków 1). W rejonie otworu Zaosie 2, stropowe partie formacji ciechocińskiej (2 m) mają wykształcenie piaszczyste i stanowi kontynuację piaszczystego kompleksu formacji borucickiej.

Średnie żyłienie utworów formacji ciechocińskiej wynosi 48-84%, porowatość jest niska, 6-11%, przepuszczalność słaba, do kilku mD.

### **Kolektor formacji drzewickiej**

Strop kolektora zalega na głębokości przeciętnie 775-903 m, i jedynie w SW kierunku (rejon otworu Buków 1) wynosi do 1250 m (rzędnie od -570 do -1057 m). Jego miąższość całkowita jest znaczna i wynosi 66-145 m (Rys. 1.1.15.23). Kolektor tworzy utwory piaszczyste żyłone o sumarycznej miąższości 51-85 m oraz ilaste zapiaszczone, o sumarycznej miąższości 13-60 m. Znikomy jest udział utworów nieprzepuszczalnych (o zawartości frakcji il+pyl>72%) i wynosi on 1,75 m. Średnie żyłienie utworów kolektora wynosi 15-37%, porowatość jest średnia i duża (14-21%), a przepuszczalność względnie dobra (rzędu 100 mD).

W rejonie otworu Zaosie 2 kolektor łączy się z kolektorem formacji ostrowieckiej, relatywnie dobrze przepuszczalnymi utworami formacji gielniowskiej (w innych rejonach



zdecydowanie izolacyjnej, tutaj nie) oraz z utworami formacji skłobskiej i tworzy wspólny kompleks utworów o miąższości 298 m. Z tego średnie zailenie wynosi 33%, jednak porowatość i przepuszczalność całego miąższościowego kompleksu są relatywnie niskie i wynoszą średnio 13% i rzędu 10 mD. Mimo znacznej miąższości i głębokości zalegania, parametry hydrogeologiczne tego kompleksu kolektorów ocenia się jako przeciętne. W stropie występują utwory formacji ciecchocińskiej, o dość dobrych właściwościach izolacyjnych.

### **Izolacja formacji gielniowskiej**

Strop utworów zalega na głębokości 954,75-1342,75 m (rzędnie -642,75÷-1124,5 m). Ich miąższość wynosi 72,5-106,5 m i jedynie w otworze Buków 1 zmniejsza się do 25,75 m (Rys. 1.1.15.23).

Formacja ta wykazuje zróżnicowane wykształcenie litologiczne. W południowej i skrajnie północnej części wykazuje duży udział utworów przepuszczalnych - o małej zawartości frakcji ilastej i pylastej (do 40%); ich miąższość wynosi 37,5-53,25 m. Zasadniczy trzon formacji tworzą jednak utwory o większej zawartości frakcji ilastej i pylastej, 40-72%, co jest charakterystyczne dla utworów ilastych zapiaszczonych. Ich miąższość wynosi 51,25-72,5 m i maleje w otworze Buków do 11,25 m. Średnie zailenie formacji jest duże i wynosi 52-64 %, porowatość jest słaba i wynosi 7-13%, a przepuszczalność niska, do kilku-kilkunastu mD.

Jedynie w rejonie otworu Zaosie 2 utwory te są lokalnie bardziej zapiaszczone tak, że tworzą połączony kolektor z formacją drzewiecką i ostrowiecką.

### **Kolektor formacji ostrowieckiej**

Kolektor zalega na głębokości 955,25-1122,25 m, i ma miąższość od 104,5-115,5 m (Rys. 1.1.15.23), jedynie w rejonie otworu Buków strop obniża się do 1343 m, a miąższość do 61 m. W północnej części rejonu Budziszewice reprezentowany jest przez utwory piaszczyste i ilaste zapiaszczone. Jednak w kierunku południowym rośnie udział utworów piaszczystych. Efektem jest stwierdzone w otworze Zaosie 2 połączenie piaszczystych utworów formacji ostrowieckiej z gielniowską i drzewiecką.

Całkowita miąższość utworów piaszczystych (o zawartości frakcji ilastej i pylastej w granicach 0-40%) wynosi 45-102,75 m. Formacja ostrowiecka wykazuje porowatość 10-17% oraz dostateczną przepuszczalność (rzędu 200 mD w stropie, ale o rzędnie wielkości niżej dla całego kompleksu). Są to przeciętne wartości, tak więc kolektor ten można traktować jako rezerwowego do zatrzymywania CO<sub>2</sub>.

### **Utwory formacji skłobskiej**

Utwory piaskowcowe występują jedynie w stropowej partii i wykazują miąższość 4-10 m, porowatość w granicach 16-22% oraz słabą przepuszczalność (za wyjątkiem otworu Zaosie 2, gdzie nie ustępuje wiele utworom piaszczystym formacji ostrowieckiej). Nie są one perspektywiczne do indywidualnego zatrzymywania CO<sub>2</sub>, chyba że zatrzymanie prowadzone będzie do kompleksu utworów od formacji drzewieckiej i ostrowieckiej, po skłobską.

### **Utwory dolnego noryku**

Utwory te wykazują znaczną miąższość, w granicach 105-386 m (tabela 1.1.15.5). Są to utwory o dość niskiej zawartości frakcji ilastej i pylastej. Ich zailenie wynosi 31-37%. Porowatość jest średnia i niska, w granicach 9-17%. Utwory te nie wykazują optymalnych cech do sekwestracji CO<sub>2</sub>.

### **Analiza spoiwa skalnego**

W dostarczonych materiałach brak jest analiz dotyczących wszystkich kolektorów. Są jedynie nieliczne analizy dotyczące utworów nadkładu oraz niektórych warstw izolacyjnych i kolektorskich. Szczegółowo przedstawiono poniżej.

Tabela 1.1.15.5 Charakterystyka parametrów litostrukturalnych i hydrogeologicznych utworów jury i triasu w otworach rejonu Budziszewice=Zaosie

Otwór / uwagi	Formacja	Głębokość		Mierzono				Zailenienie	Porowatość całkowita	Przepuszczalność (zaokr. gł.)	
		od	do	całkowita	fr il+pył<15%	fr il+p<40%	fr il+p 40-72%				fr il+p>72%
					u. wodon.	u. wodon.	słabo przep.				u. nieprzep.
<b>Jeńców IG-1</b>											
słaba izolacja	nadkąd: JA3	300	626	326	0	87,25	96,5	14,2	45	13,71	9
			<b>ú cznie nadkąd</b>	<b>326</b>		<b>87,25</b>	<b>96,5</b>	<b>14,2</b>	<b>45</b>	<b>13,71</b>	<b>9</b>
kolektor	JA1+JTO3	626	887	261		243	13	5	24,14	15,99	19
dobra izolacja	JTO1+JPL3	887	1012,25	125,25		0,75	144,75	54,75	70,38	3,61	0
dobry kolektor	JPL3, fm. Drzewicka	1012,75	1168,25	155,5	45,5	143,5	11	1	23,54	22,73	147
słaba izolacja	JPL1, fm. Gielniowska	1168,25	1274,25	106		37,5	37,5	31	48,67	17,1	26
słaby kolektor	JS, g. fm. Ostrowiecka	1274,25	1440,75	166,5		166,5	114	0	37,14	13,13	7
dobra izolacja	JS, d. fm. Ostrowiecka	1440,75	1655,75	224,8		34	64,8	126	63,42	8,49	1
dobra izolacja	JH3, fm. Rudon.	1655,5	1685,75	30,25		0,5	29,75	0	80,88	3,86	0
słaby kolektor	JH, fm. Skjbska	1686	1720,75	34,75		29,25	5,5	0	36,66	13,31	8
dobra izolacja	JH, fm. Zagajska	1721	1772,75	51,75					67,1	8,02	1
izolacja	trias	<1772,75									
<b>Budziszewice IG-1</b>											
przeciętny nadkąd	nadkąd - cała	300,25	649,75	349,5		14,25	176,5	158,75	69,35	13,06	7
			<b>ú cznie nadkąd</b>	<b>349,5</b>		<b>14,25</b>	<b>176,5</b>	<b>158,75</b>	<b>13,06</b>	<b>13,06</b>	<b>7</b>
kolektor	JA1	650,25	693,25	43		40,5	2,5	0	18,22	23,81	205
kolektor	JTO3 fm. Borucicka	693,25	849,75	156,5		144,5	12	0	15,04	25,7	364
			<b>ú cznie kolektor</b>	<b>199,5</b>		<b>185</b>	<b>14,5</b>	<b>0</b>	<b>16,68</b>	<b>25,29</b>	<b>322</b>
izolacja	JTO1 fm. Cechocińska	850,25	902,75	52,5		0	37,3	15,2	62,55	10,1	3
słaby kolektor	JPL3 fm. Drzewicka	903,25	1048,75	145,5		85,5	60	0	33,15	21,35	97
izolacja	JPL1 fm. Gielniowska	1049,25	1121,75	72,5		0	72,5	0	51,94	12,9	7
słaby kolektor	JS fm. Ostrowiecka -cała	1122,25	1226,75	104,5		51,75	52,75		36,4	16,9	25
dobry kolektor	- strop	1122,25	1136,75	11,5		11	0,5	0	16,28	24,43	247
izolacja	JH fm. Rudon	1227,25	1266,25	39		0	39		54,18	9,31	2
słaby kolektor	JH fm. Skjbska	1266,75	1277,25	10,5		10,5	0	0	27,72	16,8	24
izolacja	JH fm. Zagajska -strop	1277,75	1321,25	43,5		0	43,5		64,57	6,74	1
słaby kolektor	-sp g	1321,75	1357,75	36		22,75	13,25	0	31,23	16,92	25
			<b>Poniżej nadkądu</b>	<b>715</b>		<b>366,50</b>	<b>333,30</b>		<b>36,45</b>	<b>18,4</b>	<b>39</b>

<b>Zaosie 2</b>											
słaba izolacja	nadkąd:	300	382,75	82,75		25,5	57	0,25	45,1	19,44	54
słaba izolacja	JBj1	382,75	455,75	73		29	44	0	38,46	18,84	45
izolacja	JA3	456,25	517,75	61,5		2,25	56,5	2,25	60,39	21,38	98
			<b>ú cznie nadkąd</b>	<b>217,25</b>		<b>56,75</b>	<b>157,5</b>	<b>2,5</b>	<b>47,22</b>	<b>19,79</b>	<b>60</b>
kolektor	JA1	518,25	600,75								
kolektor	JTO3 fm. Borucicka	600,75	685,75								
kolektor	JTO1 fm. Cechocińska -str	685,75	687,75								
			<b>ú cznie kolektor</b>	<b>170,9</b>	w tym 122,5 p-c	<b>169,25</b>	<b>1,65</b>	<b>0</b>	<b>11,4</b>	<b>23,1</b>	<b>165</b>
izolacja	-cała	686,25	775,25	89		20,5	62,75	5,75	48,96	11,33	4
dobry kolektor	JPL3 fm. Drzewicka	775,75	847,75	72	w tym p-ce 37,5	72	0	0	15,1	20,68	79
słaby kolektor	JPL1 fm. Gielniowska	848,25	954,75	106,5	w tym 5,5 p-ce	53,25	51,25	2	38,93	11,84	5
kolektor	JS fm. Ostrowiecka	955,25	1070,75	115,5		102,75	12,75	0	26,05	11,15	4
kolektor	JH fm. Skjbska -strop	1070,75	1074,75	4		4	0	0	31,17	22,34	131
			<b>ú cznie kolektor</b>	<b>298</b>		<b>228</b>	<b>64</b>	<b>2</b>	<b>32,86</b>	<b>13,29</b>	<b>8</b>
słaba izolacja	-sp g	1074,75	1083,25	8,5		0	8,5	0		12,87	7
słaba izolacja	JH fm. Zagajska	1083,25	1121,75	38,5		16,25	21,5	0,75	40,78	11,05	4
izolacja	TRET, w -w y w ielichowski	1122,25	1130,75	8,5		0	7,25	1,25		5,28	0
izolacja	TRNR - górny	1131,25	1367,25	236		35,25	193	10,5	49,86	7,3	1
słaby kolektor	- dolny	1367,75	1472,75	105		81	24	0	31	17,7	32
izolacja	TK	1505,25	2064	558,75							
			<b>Poniżej nadkądu</b>	<b>1513,15</b>		<b>550,25</b>	<b>382,65</b>	<b>20,25</b>	<b>49,63</b>	<b>7,2</b>	<b>1</b>

<b>Buków 1</b>											
przepuszczalny	nadkąd:	300	852	552	w tym 226,2 p-c	551,75	0,25	0	16,96	23,47	185
izolacja	JBj1	852	899,75	48		12	37	5	67,91	11,65	5
kolektor	JBj3	899,75	924,75	24,75		24,75	0	0	29,26	16,41	21
izolacja	d. JBj3	925	1017	92		0	0	0	75,45	11,65	5
słaba izolacja	JBj1+JA3	1017	1058	41		26	15	0	35,78	24,48	251
			<b>ú cznie nadkąd</b>	<b>757,75</b>		<b>614,5</b>	<b>52,25</b>	<b>28,7</b>	<b>21,12</b>	<b>90</b>	
dobry kolektor	JA1+JTO3	1058	1157	99	w tym 22,0 mp-c	89,25	9,75	5	25,26	17,95	34
dobra izolacja	JTO1+JPL3	1158,25	1249,75	91,5		0	11,5	80	84,26	6,26	0
kolektor	JPL3	1250	1316,75	66,75		51,25	13	1,75	37,43	13,63	9
izolacja	JPL1	1317	1342,75	25,75		2,5	11,25	8,75	63,75	7,06	1
kolektor	JS	1343	1404	61		45	16	0	37,1	10,39	3
dobra izolacja	JH+TRET+g.TRNR	1404	1790,25	386,25					72,27	9,21	2
słaby kolektor	d. TRNR	1790,75	1947,75	386		340	46	0	37,72	9,38	2
izolacja	TRNR+TK3	1947,75	2499,75	552		26	526		64,26	8,29	1
			<b>Poniżej nadkądu</b>	<b>1668,25</b>		<b>554</b>	<b>633,5</b>	<b>95,5</b>	<b>59,73</b>	<b>9,65</b>	<b>2</b>

Nadkęd, BJ1, otwór Buków 1, utwory piaszczyste z okruchami skał matrixu, cement kwarcowy, rednia rednica ziaren 0,23 mm, charakterystyczna dla frakcji drobnoziarnistej.

Formacja ostrowiecka, otwór Buków 2, piaskowiec drobnoziarnisty i drobno/rednioziarnisty.

rednia rednica ziaren - 0,30 mm, charakterystyczna dla utworów drobnoziarnistych; najwiecej ziarna o rednicy 0,55 mm charakterystyczne dla frakcji gruboziarnistej. W skałach dominuje kwarc, podziennie występuje skałko i okruchy skałki. Skała cechuje zmienna ilość spoiwa, cz. jest go dużo w skałach. Spoiwo kwarcowo-w glanowe i w glanowo-kwarcowe, podziennie kwarcowe, najczystsza rednica ziaren 0,14 mm w otworze Zaosie i 0,30 mm w otworze Buków.

Warstwy wielichowskie, duża zmienność litologiczna, wapnienie z dużą ilością matrixu ilasto-elastycznego, skała o spoiwie w glanowo-kwarcowym oraz utwory piaszczyste o spoiwie kwarcowo-w glanowym, dominuje frakcja ziarnista drobna.

Formacja gielniowska, ilasto-mułkowa, najwiecej ziarna o rednicy 0,20-0,30 mm o charakterystyczne dla utworów drobnoziarnistych.

Tabela 1.1.15.6 Wyniki badań hydrogeologicznych-polowych utworów dolnej jury.

Otwór	Q m <sup>3</sup> /h	P <sub>z</sub> MPa	P <sub>d</sub> MPa	Gradient	Mineralizacja g/l	Pz-w MPa	Zwierciadło m p.p.t.	Poziom zwierciadła m p.p.t.
Otwór IG-1 1635-1657 sp. g. fm. ostrowieckiej 1712-1721 JH, fm. skałska	4			0,098	3,66	16,41		1,9
	2,25			0,098	13,96	16,80		18,3
Budziszewice 1325-1355 JH, fm. zagajska	10	12,12		0,099	8,092			35,5 (163,0 <sup>2</sup> )
Zaosie 2 518-533 JA1	7,3		4,25		4,62		80	
Zaosie 3 915-925 JPI1, fm. gielniowska?	2,05	8,52 <sup>1</sup>		0,095	10,1		25	

<sup>1</sup> prawdopodobny błąd w danych wyjściowych o 85,2 MPa

<sup>2</sup> według Katalogu otworów wiertniczych ...

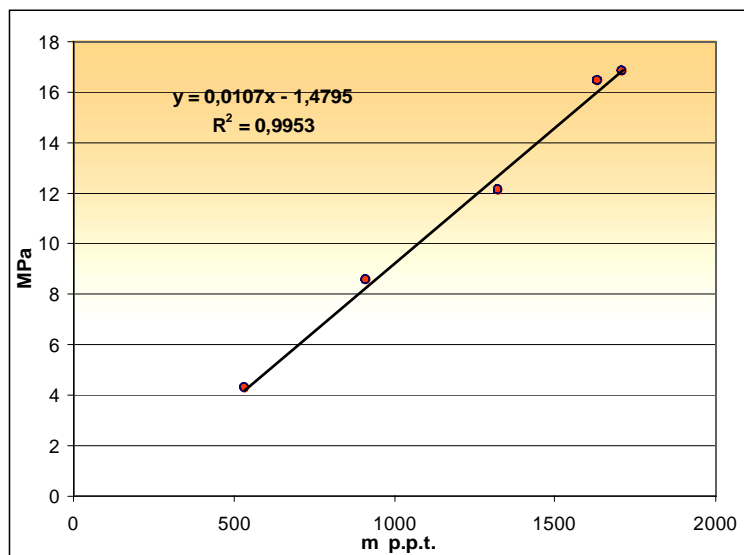
### **Analiza parametrów hydrogeologicznych o z badań polowych**

Dla utworów dolnej jury wykonano niewielką ilość polowych badań hydrogeologicznych (Tabela 1.1.15.6). Pięć wódonoń dolnej jury składa się z kilku odrębnych poziomów wodonoń. Lokalnie, jak w rejonie otworu Zaosie 2, mogą one tworzyć połączone poziomy wodonoń. Z pięć tego uzyskano wydajność wody o wielkości 2,05-10 m<sup>3</sup>/h. Pomierzone ciśnienia złowe są zależne z głębokości danego poziomu wodonońego. Zmieniają się one od 4,25 MPa w utworach aaleniu dolnego na głębokości 518 m p.p.t., do 16,80 MPa na głębokości 1712 m p.p.t. dla hetangu formacji skałskiej. Głębokość ustabilizowanego zwierciadła wody wynosi 1,9-80 m p.p.t. Zródnicowanie ciśnienia i głębokości zwierciadła wody wskazuje, że poszczególne poziomy wodonoń są odizolowane od siebie.

Bardzo mała jest polowych oznaczeń przepuszczalności. W odległości ponad 30 km od rejonu Budziszewice (otwór Bechatów 11) uzyskano współczynnik przepuszczalności 855,7 mD; w odległości około 20 km (otwór Tuszyn 9) 17,18 mD; w odległości do 90 km (otwory P gów IG-

1, Wólcoszowa IG-1 i Secemin IG-1) 16,4-1478,2 mD. Wielko ci te odpowiadaj utworom od sębo do póprzepuszczalnych.

Niewiele jest równie pomiarów ci nienia zę owego. Na Rys. 1.1.15.24 zamieszczono wykres zmienno ci ci nienia zę owego w zawodnionych utworach dolnej jury z gęboko ci dla rejonu Budziszewice-Zaosie. Jest to liniowa zale no opisana równaniem, jak poni ej. Wysoki współczynnik korelacji, pozwala z du ym prawdopodobie stwem oszacowa wielko ci nienia zę owego dla dowolnego przedzia i gęboko ciowego w tym rejonie (jest ono bliskie ciśnieniu hydrostatycznemu).



Rys. 1.1.15.24 Wykres zmienno ci ci nienia zę owego z gęboko ci w utworach dolnej jury w rejonie Budziszewice-Zaosie

### Chemizm wód

Wody dolnej jury w rejonie Budziszewice wykazuj zmienny skład. S to wody paleoinfiltracyjne, o niskiej mineralizacji. Zmienia si ona od 2,66 g/dm<sup>3</sup> do 7,39 g/dm<sup>3</sup>. Typ wód, Na-Cl, oraz wska nik Na/Cl o wielko ci 1,05 wskazuj , e s to wody reliktowe z mo liwym kontaktem ze zę em soli. Z kolei typ Na-Cl-HCO<sub>3</sub> oraz wska nik Na/Cl 0,96 wskazuje, na mo liwo infiltracji z innych poziomów wód sębo zmineralizowanych. Dalej w kierunku na poćdnie, w otworach Milianów IG-1, Secemin IG-1 i P gów (poza obszarem bada ), stwierdzono dalsze wysęczenie wód (mineralizacja 0,3-1,399 g/dm<sup>3</sup>). Jednocze nie typ wód HCO<sub>3</sub>-Na-Ca i Cl-HCO<sub>3</sub>-Na wskazuje na mo liwe zasilanie poziomów wodami pochodzenia infiltracyjnego.

Mo na z tego wnosi , e zbiornik dolnojurajski jest zasilany w niewielkim stopniu z kierunku poćdniowego. Dodatkowo w rejon Budziszewic ma miejsce napęw wód silniej zmineralizowanych, z kierunków E i W, kontaktuj cych si by mo e ze zę ami soli. Oddziaływanie wód silniej zmineralizowanych jest, jak si wydaje, niewielkie.

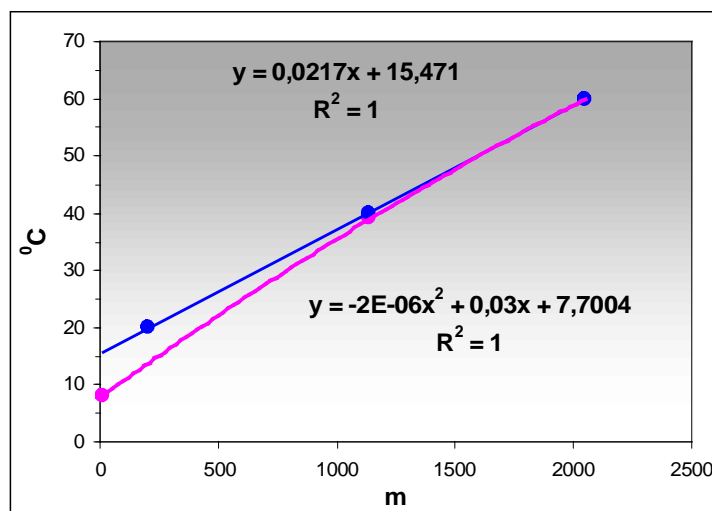
### Analiza warunków temperaturowych

Temperatura wód w utworach dolnej jury wynosi ( rednio) oko e 37<sup>0</sup>C. Jest to zbite ne z wynikami publikowanymi przez Góreckiego (Górecki, red., 2006). Dane pochodz z pomiarów wykonanych w otworach wiertniczych, jednak brak jest informacji, z jakiej dokćdnie gęboko ci pochodz . W zwi zku z tym nie mo na jednoznacznie stwierdzi , e dane te przypisane s do powierzchni stropu dolnej jury.

Przeprowadzona analiza wykaza e, e pomiar temperatury wykonany w otworze Budziszewice IG-1 nie byę przeprowadzany w warunkach ustalonych, bowiem stójka otworu trwa e

zbyt krótko. Stąd uzyskane wartości są znacznie zawyżone (o 5<sup>o</sup> C lub więcej). Obecnie skorygowanie temperatury mające na celu wyeliminowanie temperatury płuczki wiertniczej, jest trudne do przeprowadzenia. Pomiary te nie mogą być przyjęte do dalszej analizy.

Z kolei pomiary w otworze Jeńców IG-1 wykonane były w warunkach (niemal) ustalonych. Stwierdzono temperaturę, którą przedstawiono na Rys. 1.1.15.25 (Karwasiecka, 1997). Temperatura ta jest jedynie w nieznacznym stopniu zawyżona (informacja ustna Autorki), stąd pracowana krzywa prawdopodobnej temperatury w utworach dolnej jury stała się podstawą dalszych obliczeń m.in. potencjału sekwestracji dla rejonu Budziszewice-Zaosie.



Rys. 1.1.15.25 Temperatura górotworu w otworze Jeńców IG1 (Karwasiecka, 1997)

— temperatura pomierzona  
 - - - - - temperatura prawdopodobna

### Analiza możliwości zasilania utworów dolnej jury

Przebieg izarytm gradientu ciśnienia wskazuje, że rejon Budziszewic i Bełchatowa znajdują się w zasięgu wartości 0,95 hPa 10<sup>3</sup>/10 m. Wiskże spadki ciśnienia występują na NE i NW od Budziszewic (Bojarski, Mapa hydrochemiczna i hydrodynamiczna dolnej jury ...). Wskazuje to na prawdopodobny napływ wód w rejon Budziszewic z kierunków NE i NW. Jednocześnie kierunek zmian zasolenia i temperatury wód wskazują na możliwość zasilania dolnej jury z kierunku SE, to jest monokliny I skrajowej i masywu wiatokrzyskiego (Górecki, red., 2006).

### Ocena przydatności struktury Budziszewice-Zaosie jako potencjalnego składowiska CO<sub>2</sub>

Możliwość zatkania CO<sub>2</sub> jest zależna od:

- izolacji w nadkładzie,
- parametrów kolektorów i przewarstwienia,
- przebiegu stref uskoku.

Poniżej przedstawiono skróto charakterystyką każdego z wymienionych czynników.

### Nadkład utworów dolnego kalicu

Nadkład ma miąższość 517-649 m. Od głębokości 300 m p.p.t. tworzą go przeważnie ilaste utwory (mułowce/iłowce) zapieaszczone, osięgające sumarycznie 157-176 m. Znaczna jest również zawartość piaskowców, 11-56 m, natomiast udział jest znaczny jedynie w rejonie otworu Budziszewice (158 m); w rejonie otworu Zaosie wynosi jedynie 2,5 m.

Analizując nadkład pod kątem jego szczelności stwierdzono, że w rejonie wstępnie wskazanego składowiska Budziszewice, nadkład dolnego kalicu nie tworzy zbyt dobrej izolacji.



Odmienne warunki panuj w rejonie otworu Buków 1, zlokalizowanego w skrzydle zrzuconym dużej strefy uskokowej. Tutaj nadkład ma znacznie większą moc (1058 m), jednak z tego około 81% odcinka poniżej 300 m p.p.t. stanowi **osady piaszczyste**. W tym rejonie nadkład wykazuje bardzo **słabe właściwości izolacyjne**.

### **Kolektory i izolacje**

W utworach dolnej/rodkowej jury wydzielono 4 kompleksy nadające się potencjalnie do składowania CO<sub>2</sub> (Tabela 1.1.15.5). Są to utwory:

1. rodkowej/dolnej jury, to jest dolnego ładu - górnego ładu (formacja borucicka), JA1-JTO3;
2. górnego pliensbachu (formacja drzewicka), JPL3;
3. synemuru (formacja ostrowiecka), JS;
4. hettangu (formacja skłobska), JH.

Formacje te przedzielają pakiety utworów izolacyjnych formacji: ciechocińskiej (JTO1), gielniowskiej (JPL1), zagajskiej (JH) i in.

### **JA1-JTO3 (formacja Borucicka)**

Najlepsze parametry hydrogeologiczne do składowania CO<sub>2</sub> wykazują utwory najwyższego kolektora, JA1-JTO3. W toku badań polowych uzyskano do niego wydajność wody, wynoszącą 7,3 m<sup>3</sup>/h. Utwory te zalegają jednak na zbyt małej głębokości, z punktu widzenia możliwości składowania. Strop formacji zalega na głębokości zaledwie 518-650 m p.p.t. w szczytowej partii struktury. Spodziewane ciśnienie złoże wynosi około 4,06-5,58 MPa, a przewidywana temperatura na stropie serii, wyznaczona na podstawie danych z otworu Jeńców, 22,7°C. Według dotychczasowych doświadczeń w typowaniu miejsc do podziemnego składowania CO<sub>2</sub> (Solik-Heliasz, 2007, 2008) jest to zbyt małe do osiągnięcia stanu nadkrytycznego CO<sub>2</sub>.

### **Izolacja formacji ciechocińskiej**

Utwory tworzący serie o mocniejszej i słabszej z mocniejszą na południe od 52 do 87 m i 91 m w rejonie otworu Buków 1. Serie tworzą głównie utwory ilaste zapiaszczone o sumarycznej mocności 11,5-62,75 m oraz ilaste, o mocności 5,75-15,2. Jedynie w SW kierunku (rejon otworu Buków 1) mocność ilastych utworów rośnie do 80 m. Średnie zailenie utworów formacji ciechocińskiej wynosi 48-84%. Niska porowatość oraz przepuszczalność, wskazują na znaczny zwężenie utworów formacji. W toku dalszych badań należy wykazać, czy jej mocność **jest wystarczająca** w przypadku zatłoczenia CO<sub>2</sub> do formacji drzewickiej.

### **Formacja drzewicka, JPL3**

Strop serii stwierdzono na głębokości od 775 m w otworze Zaosie 2 do 903 m w otworze Budziszewice. Mocność serii jest zadawalająca i wynosi 72-145 m. Serie tworzą głównie piaskowce zailone (to jest o zawartości frakcji ilastej i pylastej do 40%). W kierunku południowym rośnie zapiaszczenie serii. Najlepszy skład litologiczny wykazują utwory w rejonie otworu Zaosie 2. Tutaj występują wyraźne zailone piaskowce, bez przewarstwienia mułowców, czy iłowców. Ponadto w tym rejonie następuje **połączenie piaszczystych serii** formacji drzewickiej, gielniowskiej, ostrowieckiej i stropu skłobskiej praktycznie w jeden kompleks o mocności **298 m**.

Odmienne jest w rejonie otworu Buków, gdzie nad skrzydłem zrzuconym uskoku strop serii obniża się do 1250 m p.p.t., jej mocność wynosi 67,5 m, a w składzie dominują piaskowce zailone i podrzędnie mułowce/iłowce zapiaszczone.

Spodziewana temperatura w stropie formacji wynosi w otworach Zaosie 2 i Budziszewice odpowiednio 29,75°C i 33,2°C, a ciśnienie złoże od 6,81 MPa do 8,18 MPa. Wynika z tego, że stropowe partie formacji drzewickiej w rejonie otworu Zaosie 2 **nie wykazują wymaganych do składowania, ciśnienia złożowego i temperatury**.

## Formacja ostrowiecka

Kolektor zalega na głębokości 955-1343 m i ma miąższość od 61 do 115,5 m. W kierunku południowym rośnie udział utworów piaszczystych. Całkowita miąższość utworów piaszczystych (o zawartości frakcji ilastej i pylastej w granicach 0-40%) wynosi 45-102,75 m. W rejonie otworu Zaosie 2 następuje poćcenie piaszczystych utworów formacji ostrowieckiej z gielniowska i drzewieck w jeden kompleks o miąższości 298 m (z tego 228 m utworów o zawartości frakcji ilastej i pylastej poniżej 40%).

Formacja ostrowiecka wykazuje porowatość 10-17% oraz dostateczną przepuszczalność. W toku polowych badań hydrogeologicznych uzyskano niezbyt wysoką wydajność, wynoszącą 4 m<sup>3</sup>/h. Średnie wartości do zatrzymania CO<sub>2</sub>. Spodziewane ciśnienie w stropie formacji wynosi 9,97 MPa, temperatura 34,5-44,4°C - wielkości te pozwalają zatrzymać CO<sub>2</sub> w fazie nadkrytycznej.

## Formacja skłbska

Strop formacji zalega na głębokości 1070,5-1266,75 m. Zapiaszczony jest jedynie stropowy odcinek formacji, o miąższości 4-10 m, występujący w otworach Budziszewice i Zaosie 2. Utwory tego interwału wykazują średnią i dużą porowatość, oraz przeważnie słabą przepuszczalność (za wyjątkiem otworu Zaosie 2). W toku badań polowych uzyskano wydajność wody zaledwie 2,25 m<sup>3</sup>/h. Przewidywane ciśnienie w stropie formacji wynosi 9,97-12,07 MPa, a temperatura 39,4-42,5°C. Odcinek ten może być wykorzystywany do zatrzymania CO<sub>2</sub> wraz z innym, zasadniczym kolektorem.

Utwory triasu nie wykazują parametrów korzystnych do składowania CO<sub>2</sub>

## Strefa uskoku Buków

Rejon składowiska Budziszewice przecina duża strefa uskokowa w rejonie otworu Buków 1. Z tego względu warunki geologiczne istniejące w skrzydle zrzuconym są odmienne od tych, które występują w obszarze Budziszewice-Zaosie. Uskok kontynuuje się do górnego triasu, ale (wg sejsmiki) nie przecina jury. Nadkład dolnego paleozoju nad skrzydłem zrzuconym uskoku, do głębokości 300 m p.p.t., stanowi w 81% utwory piaszczyste, o zawartości frakcji ilastej i pylastej do 40%. Według dotychczasowego rozpoznania, nadkład nie wykazuje w tej partii dostatecznych właściwości izolacyjnych. Z tego powodu zachodnia granica składowiska Budziszewice powinna się kończyć przed strefą uskoków Buków (z odpowiednim marginesem bezpieczeństwa).

## Podsumowanie

Możliwość zatrzymania CO<sub>2</sub> jest zależna od:

- izolacji w nadkładzie,
- parametrów kolektorów i przewarstwienia,
- przebiegu stref uskokowych.

Stwierdzono, że w rejonie wstąpienia wskazanego składowiska Budziszewice-Zaosie, nadkład utworów dolnego paleozoju nie tworzy zbyt dobrej izolacji. Poniżej głębokości 300 m p.p.t. tworzą go przeważnie ilaste utwory (mułowce/iłowce) zapiaszczone, osiagające sumarycznie miąższość 157-176 m. Znaczna jest również zawartość piaskowców. Szczególnie słaba izolacja w rejonie otworu Buków 1, zlokalizowanego w skrzydle zrzuconym dużej strefy uskokowej, gdzie 81% odcinka poniżej 300 m p.p.t. stanowi osady piaskowcowe.

W utworach dolnej/rodkowej jury analizowano 4 kompleksy nadające się potencjalnie do składowania CO<sub>2</sub> (Tabela 1.1.15.5). Są to utwory:

1. rodkowej/dolnej jury, to jest dolnego paleozoju - górnego toarku (formacja borucicka), JA1-JTO3;
2. górnego pliensbachu (formacja drzewicka), JPL3;
3. synemuru (formacja ostrowiecka), JS;

#### 4. hettangu (formacja skłbska), JH.

Formacje te przedzielają pakiety utworów izolacyjnych formacji: ciechocińskiej (JTO1), gielniowskiej (JPL1), zagajskiej (JH) i in.

Stwierdzono, że utwory JA1+JTO3 (Fm. borucicka) wykazują najlepsze parametry do zatrzymywania CO<sub>2</sub>. Zalegają jednak na zbyt małej głębokości. Strop formacji zalega na głębokości zaledwie 518-650 m p.p.t. Spodziewane ciśnienie złoże wynosi około 4,06-5,58 MPa, a przewidywana temperatura na stropie serii, wyznaczona na podstawie danych z otworu Jeńców IG-1, 22,7°C. Jest to zbyt małe do osiągnięcia stanu nadkrytycznego CO<sub>2</sub>.

Utwory formacji drzewickiej, ostrowieckiej i stropu skłbskiej wykazują raczej przeciętne wartości parametrów hydrogeologicznych. Ich porowatość jest średnia i lokalnie duża, a przepuszczalność dobra albo dostateczna (przynajmniej według interpretacji krzywych geofizyki wiertniczej). Z poziomów tych uzyskano niezbyt duże dopływy, 2,05-7,3 m<sup>3</sup>/h. Ponadto analiza wyników pomiarów temperatury górotworu wykazała, że w utworach stropowej partii formacji drzewickiej, w rejonie otworu Zaosie 2, temperatura i ciśnienie złoże mogą być zbyt niskie do zatrzymywania CO<sub>2</sub> w fazie nadkrytycznej.

Utwory triasu nie wykazują parametrów korzystnych do składowania CO<sub>2</sub>.

Wody dolnej jury w rejonie Budziszewice wykazują mineralizację od 2,66 g/dm<sup>3</sup> do 7,39 g/dm<sup>3</sup>. Typ wód, Na-Cl, oraz wskaźniki hydrochemiczne wskazują, że są to wody typu paleoinfiltracyjnego. Jednocześnie gradienty ciśnienia wskazują, że w rejonie zbiornika Budziszewice, z kierunków E i W, napływają wody silniej zmineralizowane, kontaktujące się bezpośrednio ze złożami soli. Z kolei udział jonu HCO<sub>3</sub> wskazuje na możliwość infiltracji z wyżej zalegających poziomów wód słabo zmineralizowanych.

Zbiornik dolnojurajski jest zasilany z kierunku południowego, od strony monokliny 1 skokrakowskiej i masywu wiłtokrzyskiego.

## Oznaczenia składu mineralnego próbek skał (PIG-PIB)

W oparciu o otrzymane wyniki z pierwszego etapu badań petrograficznych i petrofizycznych dla rejonu Bełchatowa, obejmujących szczegółowe analizy planimetryczne 466 szlifów, badanie gęstości, badanie porozymetryczne, badania współczynnika przepuszczalności, wskazano 20 próbek skał do szczegółowych badań petrograficzno-mineralogicznych. Wytypowane skały pochodzą z trzech otworów wiertniczych (Jęzów IG 1, Buków 2, Zaosie 2) zarówno z warstw kolektorskich jak i warstw izolujących (tab. 1.1.15.7). Celem prac było scharakteryzowanie węższości skał potencjalnego kompleksu skądowania, w szczególności pod kątem reaktywności tych skał  $\text{CO}_2$ . (patrz też 1.1.14: Oddziaływania  $\text{CO}_2$ -skał-pęny zęowe)

Tabela 1.1.15.7 Zestawienie badanych próbek skał zastosowanych metod badawczych.

Otwór	Głębokość (m)	Litologia	Szczegółowe badania mineralogiczno-petrograficzne			
			Mikroskop optyczny	CL	WDS/EDX	XRD
Jęzów IG 1	1006,8	Arenit kwarcowy	X	X	X	
	1007,4	Arenit kwarcowy	X	X	X	
	1060,2	Arenit subarkozowy	X		X	
	1062,2	Arenit kwarcowy	X		X	
	1127,9	Mułowice	X			X
	1175,4	Wąka kwarcowa	X			X
	1177,1	Mułowice	X			X
	1240,8	Mułowice piaszczyste	X			X
	1242,1	Mułowice piaszczyste	X			X
	1292,5	Arenit kwarcowy	X		X	
	1400,8	Arenit kwarcowy	X	X	X	
	1704,7	Arenit kwarcowy	X	X	X	
	1772,9	Arenit kwarcowy	X	X	X	
Buków-2	1435,6	Arenit kwarcowy	X	X	X	
Zaosie-2	836,5	Arenit kwarcowy	X		X	
	838,1	Arenit kwarcowy	X		X	
	840,9	Arenit kwarcowy	X		X	
	912,4	Ilowice/mułowice	X			X
	914,6	Ilowice/mułowice	X			X
	1005,2	Arenit kwarcowy	X	X	X	
	1006,1	Arenit kwarcowy	X	X	X	

Szczegółowe badania mineralogiczno-petrograficzne dla skał pochodzących z warstw izolujących takich jak mułowice (Jęzów IG 1: 1127,9; 1177,1), mułowice piaszczyste (Jęzów IG 1: 1240,8; 1242,1), waki kwarcowe (Jęzów IG 1: 1175,4) i ilowice (Zaosie 2: 912,4; 914,6), obejmowały szczegółowe analizy mikroskopowe w świetle przechodzącym i badania składu fazowego ogólnego i składu frakcji ilastej metod dyfrakcji rentgenowskiej (XRD, tabela 1.1.15.8). Skład frakcji ilastej (wyseparowanej metodami sedymentacyjnymi) określono na podstawie dyfraktogramów preparatów orientowanych powietrzno-suchych (na fig. zaznaczonych na czarno), glikolowanych (na figurach ó kolor zielony) i praconych w temperaturze 550°C (kolor czerwony). Badania zostały wykonane na dyfraktometrze rentgenowskim Xpert PW 3020 firmy Philips.

Tabela 1.1.15.8 Wyniki badań metod dyfrakcji rentgenowskiej (XRD).

Otwór	Głębokość (m)	Litologia	Parageneza mineralna
Jeńców IG 1	1127,9	Mułowice	Kwarc + skale + kaolinit + illit + chloryt
	1175,4	Wąka kwarcowa	Kwarc + skale + kaolinit + illit + chloryt
	1177,1	Mułowice	Kwarc + skale + kaolinit + illit + chloryt
	1240,8	Mułowice piaszczyste	Kwarc + skale + kaolinit + illit + chloryt
	1242,1	Mułowice piaszczyste	Kwarc + skale + kaolinit + illit + chloryt
Zaosię 2	912,4	Łułowice/mułowice	Kwarc + skale + kaolinit + illit + chloryt
	914,6	Łułowice/mułowice	Kwarc + skale + kaolinit + illit + chloryt

Tabela 1.1.15.9. Wybrane analizy chemiczne skałeni alkalicznych

otwór	Zaosię 2	Zaosię 2	Zaosię 2	Zaosię 2	Zaosię 2	Zaosię 2	Jeńców IG 1	Jeńców IG 1	Jeńców IG 1	Jeńców IG 1	Jeńców IG 1	Jeńców IG 1	Jeńców IG 1	Jeńców IG 1
głębokość	836,5 m	836,5 m	840,9 m	840,9 m	838,1 m	838,1 m	1060,2 m	1060,2 m	1062,2 m	1062,2 m	1292,5 m	1292,5 m	1435,6	1435,6
analiza	p.1	p.2	p.1	p.2	p.1	p.2	p.1	p.2	p.1	p.2	p.1	p.2	p.4	p.5
oxide	wt %	wt %	wt %	wt %	wt %	wt %	wt %	wt %	wt %	wt %	wt %	wt %	wt %	wt %
SiO <sub>2</sub>	66,21	65,16	65,86	64,97	64,78	66,13	65,71	65,26	66,05	65,95	65,18	65,31	66,27	66,54
TiO <sub>2</sub>	0,13	0,25	0,32	0,07	0,14	0,25	0,22	0,07	0,06	0,13	0,25	0	0	0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21,51	21,16	20,32	20,71	20,7	20,65	21,1	21,31	20,82	20,88	21,96	21,21	20,25	21,1
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FeO	0	0,02	0	0,11	0	0,02	0	0	0,29	0,25	0,07	0	0,19	0
MnO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CaO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,07
BaO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Na <sub>2</sub> O	0	0,6	0,48	0,33	0,35	0,36	0,01	0,52	0,42	0,61	0	0,98	1,55	0,58
K <sub>2</sub> O	13,04	12,06	12,46	12,22	12,54	12,52	12,97	12,22	12,37	12,53	12,81	12,01	10,78	12,56
total	100,89	99,25	99,44	98,41	98,51	99,93	100,01	99,38	100,01	100,35	100,27	99,51	99,14	100,85
kationy														
Si	3,06	3,05	3,08	3,07	3,06	3,08	3,06	3,05	3,07	3,05	3,03	3,04	3,09	3,06
Ti	0	0,01	0,01	0	0	0,01	0,01	0	0	0	0,01	0	0	0
Al	1,17	1,17	1,12	1,15	1,15	1,13	1,16	1,17	1,14	1,14	1,2	1,16	1,11	1,14
Cr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fe <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fe <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0,01	0,01	0	0	0,01	0
Mn	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ca	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ba	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Na	0	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03	0	0,05	0,04	0,05	0	0,09	0,14	0,05
K	0,77	0,72	0,74	0,74	0,75	0,74	0,77	0,73	0,73	0,74	0,76	0,71	0,64	0,74
tot. cat.	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
tot. oxy.	8,26	8,25	8,26	8,27	8,24	8,27	8,26	8,25	8,26	8,23	8,26	8,22	8,26	8,24
An	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,64	0,44
Ab	0	7,03	5,53	3,94	4,07	4,19	0,12	6,07	4,91	6,89	0	11,03	17,82	6,53
Or	100	92,97	94,47	96,06	95,93	95,81	99,88	93,93	95,09	93,11	100	88,97	81,55	93,04



Tabela 1.1.15.10. Wybrane analizy chemiczne w glanów												
Otwór	Zaosie 2	Zaosie 2	Zaosie 2	Zaosie 2	Zaosie 2	Zaosie 2	Zaosie 2	Je ów IG1	Je ów IG1	Je ów IG1	Je ów IG1	Je ów IG1
gł boko	1006,1	1006,1	1006,1	1006,1	1006,1	1005,2	1005,2	1006,8	1006,8	1007,4	1007,4	1704,7
analiza	p.5	p.1	p.2	p.3	p.4	p.1	p.2	p.1	p.2	p.1	p.2	p.1
	wt %	wt %	wt %	wt %	wt %	wt %	wt %	wt %	wt %	wt %	wt %	wt %
CO <sub>2</sub>	40,15	39,87	40,99	38,38	40,58	39,68	41,15	38,24	41,2	40,78	37,74	42,28
MgO	4,27	6,18	10,48	2,37	7,68	4,73	10,89	0	11,23	9,52	0	14,54
CaO	0,28	0	0,25	0	0,16	0,05	1,16	0,58	1,54	0,85	0,68	0,31
MnO	2,06	1,51	1,14	1,47	0,98	1,24	1,63	1,2	1,21	1,53	2,11	1,16
FeO	54,31	53,18	45,85	58,46	50,04	53,24	44,42	59,59	45	46,21	58,76	41,73
Suma	101,07	100,74	98,71	100,68	99,44	98,94	99,26	99,61	100,18	98,89	99,3	100,01
C	2,01	1,99	2,01	1,98	2,01	2,02	2	2,01	1,99	2,01	2	2
Mg	0,23	0,34	0,56	0,13	0,42	0,26	0,58	0	0,59	0,51	0	0,75
Ca	0,01	0	0,01	0	0,01	0	0,04	0,02	0,06	0,03	0,03	0,01
Mn	0,06	0,05	0,03	0,05	0,03	0,04	0,05	0,04	0,04	0,05	0,07	0,03
Fe	1,67	1,63	1,38	1,85	1,52	1,66	1,32	1,92	1,33	1,39	1,91	1,21
suma	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
suma kationów	3,99	4,01	3,99	4,02	3,99	3,98	4	3,99	4,01	3,99	4	4
Otwór	Je ów IG1	Je ów IG1	Je ów IG1	Je ów IG1	Je ów IG1	Je ów IG1	Je ów IG1	Je ów IG1	Je ów IG1	Je ów IG1	Je ów IG1	Je ów IG1
gł boko	1704,7	1704,7	1400,8	1400,8	1400,8	1772,9	1772,9	1435,6	1435,6	1435,6	1435,6	
analiza	p.2	p.3	p.1	p.2	p.3	p.1	p.2	p.3	p.1	p.2	p.3	
	wt %	wt %	wt %	wt %	wt %	wt %	wt %	wt %	wt %	wt %	wt %	
CO <sub>2</sub>	40,24	41,41	42,03	40,33	40,97	40,41	37,82	38,59	39	39,94	39,83	
MgO	7,71	8,75	13,58	7,25	8,32	7,92	0,24	0,26	2,09	6,02	5,18	
CaO	0,07	0,26	0,45	0,1	0,41	0,77	2,79	2,83	0,83	0,57	0,47	
MnO	1,1	1,16	0,7	0,75	1,3	1,27	0,76	0,05	1,56	1,41	1,48	
FeO	50,24	48,35	42,29	52,29	50,23	49,16	57,71	57,94	57,42	52,52	53,64	
Suma	99,35	99,93	99,05	100,71	101,23	99,53	99,32	99,67	100,89	100,46	100,6	
C	2,01	2,02	2,01	2	2	2	1,99	2,01	2	2	2	
Mg	0,42	0,47	0,71	0,39	0,44	0,43	0,01	0,01	0,12	0,33	0,28	
Ca	0	0,01	0,02	0	0,02	0,03	0,12	0,12	0,03	0,02	0,02	
Mn	0,03	0,04	0,02	0,02	0,04	0,04	0,02	0	0,05	0,04	0,05	
Fe	1,53	1,45	1,24	1,59	1,5	1,49	1,86	1,85	1,8	1,61	1,65	
suma	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	

Szczególne badania mineralogiczno-petrograficzne (patrz Rys. 1.1.15.26) dla skał z potencjalnej serii zbiornikowej, takich jak arenity kwarcowe (Je ów IG 1: gł 1006,8; 1007,4; 1062,2; 1292,5; 1400,8; 1704,7; 1772,9; Buków-2: 1435,6; Zaosie 2: 836,5; 838,1; 840,9, 1005,2; 1006,1) i arenity subarkozowe (Je ów IG 1: 1060,2) obejmowały:

- obserwacje mikroskopowe w świetle przechodzącym z wykorzystaniem mikroskopu polaryzacyjnego Nikon ECLIPSE LV100POL i programu komputerowego NIS-Elements.

- analiz obrazów katodoluminescencyjnych wykonanych z użyciem aparatury CITL MK5 wyposażonych w pompy próżniowe i EDX

- analiz chemicznych w mikroobszarze wraz z dokumentacją graficzną (obrazy BSE) wykonanych z użyciem mikroskopu elektronowego JSM-35 firmy JEOL wyposażonego w dwa spektrometry WDS i spektrometr EDS (analizy składu chemicznego w glanów i skaleni) i mikroskopu elektronowego LEO 1430 firmy ZEISS wyposażonego w spektrometr EDS. Wyniki analiz chemicznych minerałów w mikroobszarze zostały zestawione w tabeli 3 (skaleni alkaliczne) i tabeli 4 (w glany).

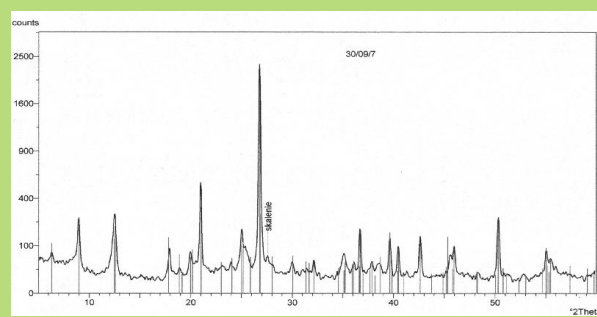
Opisy mineralogiczno-petrograficzne badanych skał wraz z ich dokumentacją graficzną zostały zestawione na planszach. Zastosowano międzynarodowe symbole minerałów: Chl- chloryt, Kfd- skaleńka alkaliczna, Kln- kaolinit, Sd ó syderyt, Qtz- kwarc (Kretz 1983).

Badania petrograficzne zostały przeprowadzone w Pracowni Petrologii i Geochemii Zakładu Kartografii Geologicznej Struktur Węglanych, za metod dyfrakcji rentgenowskiej w Centralnym Laboratorium Chemicznym PIG-PIB. W oparciu o wcześniej wykonane analizy planimetryczne

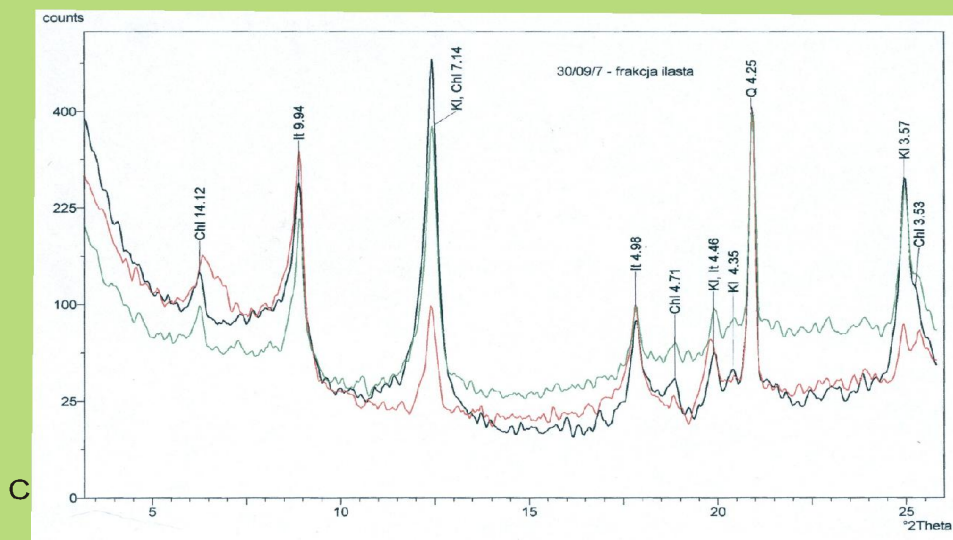
wytypowano skałę do szczegółowych badań petrograficznych, przeprowadzono analizy katodoluminescencji, analizy chemiczne w mikroobszarze i dokumentację fotograficzną, a następnie zestawiono i opracowano wyniki, w tym plansze dokumentacyjne.

## Zaose 2 głębokość 914,6 m

Próba reprezentuje mułowce, słabo wysortowane, charakteryzujące się warstwowaną (laminowaną) teksturą i pelitowo-aleurytową strukturą (fig. A). Skała zawiera słabo-obtoczone okruchy kwarcu i łuszczyki podkreślające wraz z minerałami ilastymi laminacje. Badania metodą dyfrakcji rentgenowskiej wykazały obecność kwarcu, skaleni alkalicznych, a szczególne badania dyfrakcyjne frakcji ilastej występowanie kaolinitu, illitu i chlorytów (klinochloru, fig. B i C).



B



C

Fig. A. Obraz mikroskopowy warstwowanego mułowca nikole skrzyżowane (XP). B. Dyfraktogram rentgenowski (skład fazowy całej próbki) C. Dyfraktogram rentgenowski preparatów orientowanych powietrzno-suchych (kolor czarny), glikolowanych (kolor zielony) i prażonych w temp. 550° C (kolor czerwony) dla frakcji ilastej.



## Zaosie 2 głębokość 1005,2 m

Próba reprezentuje piaskowce bardzo drobnoziarniste, słabo wysortowane, charakteryzujące się bardzo porowatą teksturą (pory stanowią 17,4 % objętości skały) i psamitową strukturą (fig. A). Skała zawiera słabo obtoczone okruchy kwarcu (76,6 %), podrzędnie skalenie alkaliczne (1,1 %), okruchy skał (0,5 %) i minerały akcesoryczne (0,8 %). Głównym składnikiem spoiwa jest cement: kwarcowy (3 %) i węglanowy (0,5 %). Analiza planimetryczna wykazała, iż są to arenity kwarcowe. Badania obrazów katodoluminescencyjnych pozwoliły stwierdzić obecność regeneracyjnych cementów kwarcowych (fig. B) Analizy chemiczne w mikroobszarze cementów węglanowych wskazują na obecność mieszaniny syderytu i syderoplezytu (fig. D – pkt. 1 i 2; tab. 4).

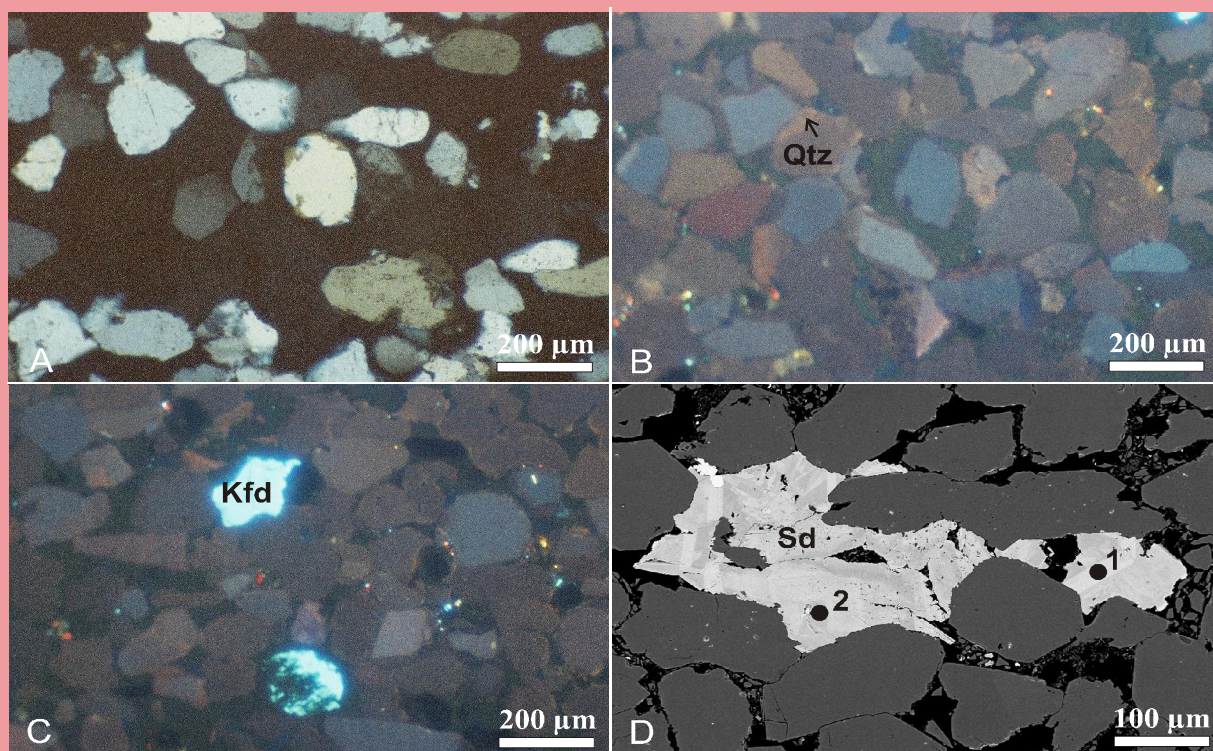


Fig. A. Obraz mikroskopowy piaskowca bardzo drobnoziarnistego (arenit subarkozowy), nikole skrzyżowane (XP). B. Obraz katodoluminescencyjny arenitu subarkozowego z regeneracyjnym cementem kwarcowym (strzałki). C. Obraz katodoluminescencyjny arenitu subarkozowego z licznymi skaleniami alkalicznymi. D. Obraz BSE okruchów kwarcu i cementu syderytowego z zaznaczonymi punktami analiz chemicznych w mikroobszarze.

Rys. 1.1.15.26 Przykładowa charakterystyka analiz petrograficznych wykonanych dla próbek skał uszczelniających (dolny pliensbach) i zbiornikowych (synemur) ze struktury Budziszewice-Zaosie.

## 1.1.16 MODELOWANIE DYNAMICZNE PROCESÓW ZATĄCZANIA CO<sub>2</sub> DO SKŁADOWISKA

Prace rozpocząto od przygotowania załe dla 4 wariantów komputerowych modeli dynamicznych procesów zatęczania dwutlenku w gła do składowiska z wykorzystaniem materiałow i modeli statycznych opracowanych w ramach zadań 1.1.14 i 1.1.15. Przyjęto po dwa warianty dla piaskowców jury dolnej i dwa warianty dla piaskowców triasu dolnego.

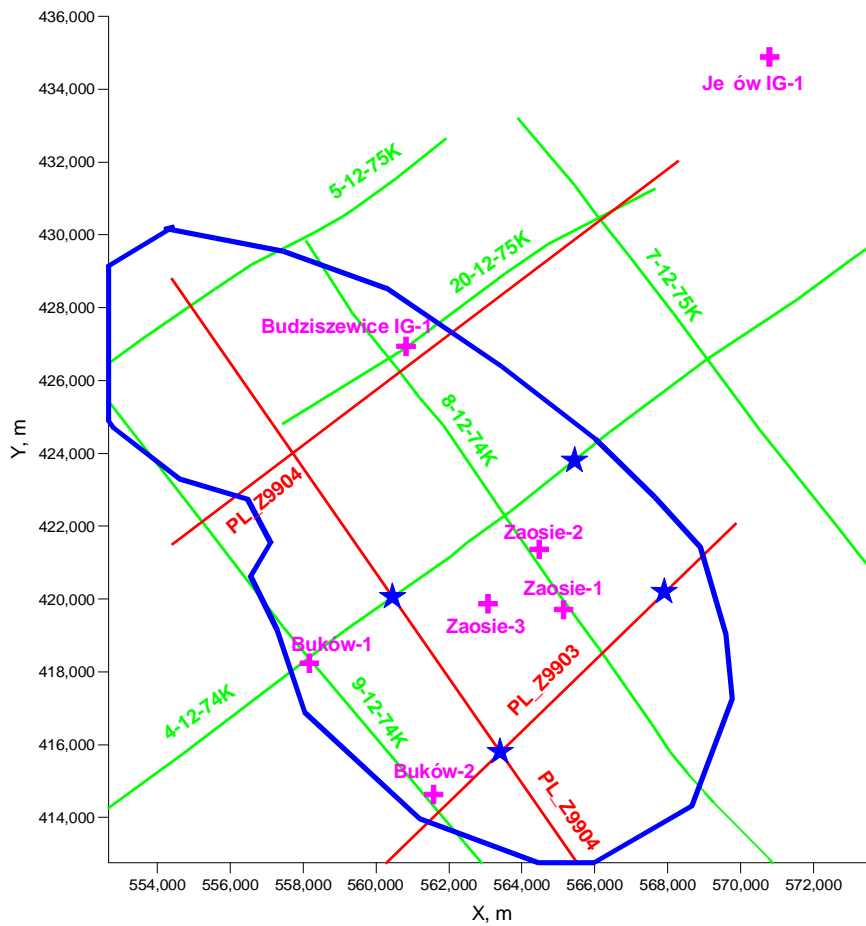
Pierwszy wariant obejmował testowe zatęczanie w jednym otworze przez okres 1 roku, w ilości w sumie 20 tysięcy ton dwutlenku w gła.

Drugi wariant dotyczył zatęczania docelowego (demonstracyjnego). Według wstępnych analiz AGH wykonanych w ramach zadania 1.1.34 I Segmentu dla rejonu Bełchatowa (Wójcicki (red.), 2009) do zatęczenia 2 milionów ton do struktury o takiej wielkości jak obiekt Budziszewice-Zaosie potrzeba do 4 otworów, rozmieszczonych w odległości kilku kilometrów (jeden od drugiego) wokół szczytowej partii struktury. Jeśli właśnie ci zbiornikowe kolektora są bardzo dobre to ilość otworów może być zmniejszona, ale w naszym przypadku, gdy w jurze dolnej preferowany jest bardziej poziomy zbiornikowy synemuru (i hettangu) niż poziom górnego pliensbachu (w szczytowej partii struktury występuje zbyt płytko, sięgając głęboko ci granicznej dla obszaru nadkrytycznego) to bezpieczniej jest przyjąć maksymalną ilość otworów odpowiednią dla przeciętnych (jura dolna) i słabych (trias dolny) właśnie ci zbiornikowych. Według najbardziej aktualnych informacji PGE EBSA (informacja ustna) docelowe zatęczanie będzie obejmowało **1.8 mln ton CO<sub>2</sub> rocznie**, co daje **0.45 mln ton** na otwór. Przy założeniu czasu funkcjonowania instalacji demonstracyjnej CCS PGE EBSA w pełnej skali wyniesie 25 lat, daje to sumaryczną ilość dwutlenku w gła wynoszącą **45 mln ton**. Modelowania dynamiczne (symulacje zatęczania CO<sub>2</sub> do potencjalnego składowiska) prowadzono dla okresu ponad 200 lat po zakończeniu zatęczania.

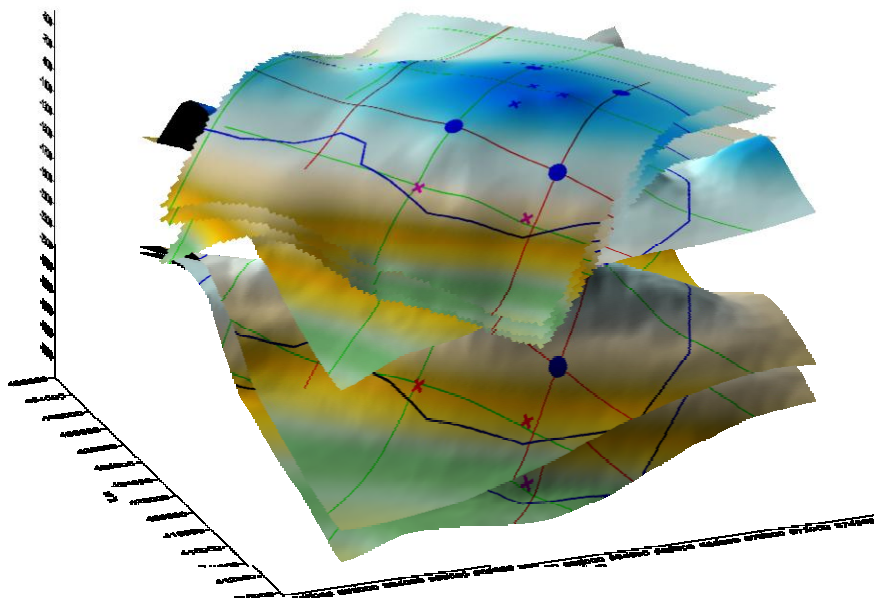
Zarówno dla jury dolnej jak i triasu dolnego przyjęto analogicznie efektywno zatęczania - po **0.45 mln ton** na otwór, w czterech otworach przez okres 25 lat. W obu przypadkach przyjęto najważniejszy parametr geomechaniczny decydujący o bezpieczeństwie składowania - ciśnienie progowe/kapilarne (ciśnienie krytyczne wywołane przez dwutlenek w gła znajdujący się w kolektorze, przy którym nadkrytyczny CO<sub>2</sub> "przebija się" przez kapilary nadległego uszczelnienia - tzw. *capillary entry pressure*) wynoszące około 20 barów (~200 MPa). Ciśnienie to jest funkcją ilorazu porowatości efektywnej i przepuszczalności - wymaga to względnie ci gębszych nieprzepuszczalnych (<0.00001 mD) formacji w nadkładzie rozpatrywanego kolektora. Warto określić na podstawie wyników badań petrofizycznych na próbkach skał danych literaturowych.

W ramach niniejszego zadania przewidziano trzech wykonawców symulacji zatęczania - AGH, GIG, INiG. AGH przeprowadziła symulacje zatęczania w wariantach testowym i docelowym do formacji piaskowcowych jury dolnej z wykorzystaniem oprogramowania GEM, GIG analogiczne symulacje dla jury dolnej, ale z wykorzystaniem oprogramowania PetraSim/TOUGH2, natomiast INiG wykonała symulacje zatęczania w wariantach testowym i docelowym do formacji piaskowcowych triasu dolnego z wykorzystaniem oprogramowania Petrel (Schlumberger).

Lokalizację symulacyjnych otworów zatęczających (Rys. 1.1.16.1 - 1.1.16.3) wybrano na podstawie charakterystyki modelu strukturalnego opracowanego w poprzednim rozdziale. Otwory te zlokalizowano na skłonach struktury (patrz Rys. 1.1.16.2), zgodnie z wytycznymi podmiotu najlepszych praktyk (Chadwick et al., 2008). Przy wyborze lokalizacji symulacyjnych otworów zatęczających uwzględniono przebieg profili sejsmicznych, w tym w dwóch przypadkach ich punkty przecięcia (Rys. 1.1.16.1). Ponadto brano pod uwagę zagospodarowanie terenu i dostępność potencjalnych miejsc zatęczania dwutlenku w gła (unikając m.in. obszarów zabudowanych - Rys. 1.1.16.3). Dla wariantu testowego zatęczania wybrano prowizorycznie symulacyjny odwiert położony w SW części rozpatrywanego obszaru, na przecięciu dwóch "nowych" profili sejsmicznych, w rejonie miejscowości Ujazd (Rys. 1.1.16.3).

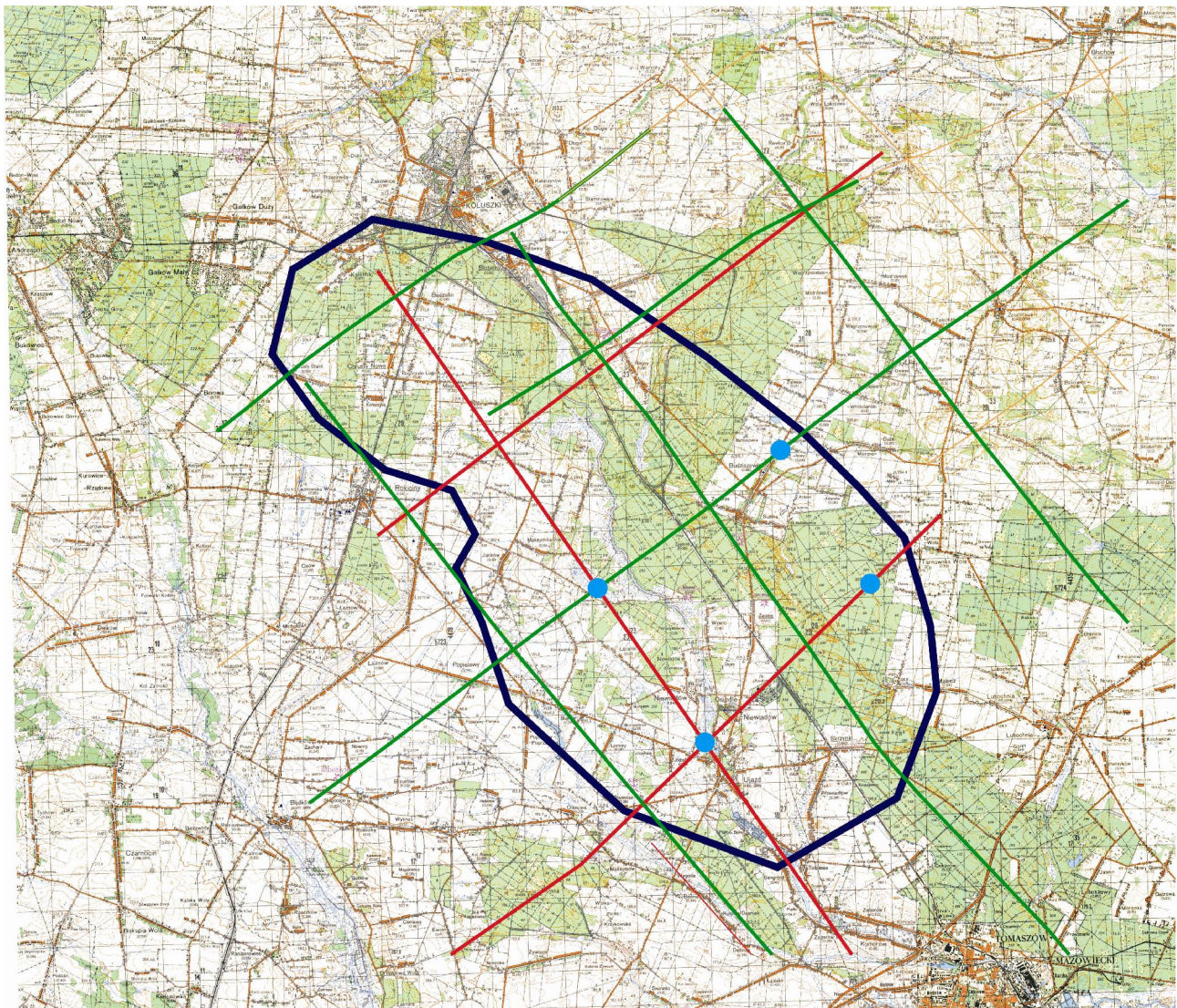






Rys. 1.1.16.1 Lokalizacja symulacyjnych otworów zafazowanych (gwiazdki) dla struktury Budziszewice-Zaosie na tle profili sejsmicznych (starych i "nowych") i istniejących otworów.



Rys. 1.1.16.2 Przestrzenny model strukturalny Budziszewice-Zaosie (czarna centralna).





**LEGENDA**     zarys struktury (w dolnej jurze)     otwory do załączania (dla modelowań)  
 profile sejsmiczne z lat 1970-tych (wybrane)     nowe profile sejsmiczne (RWE DEA)

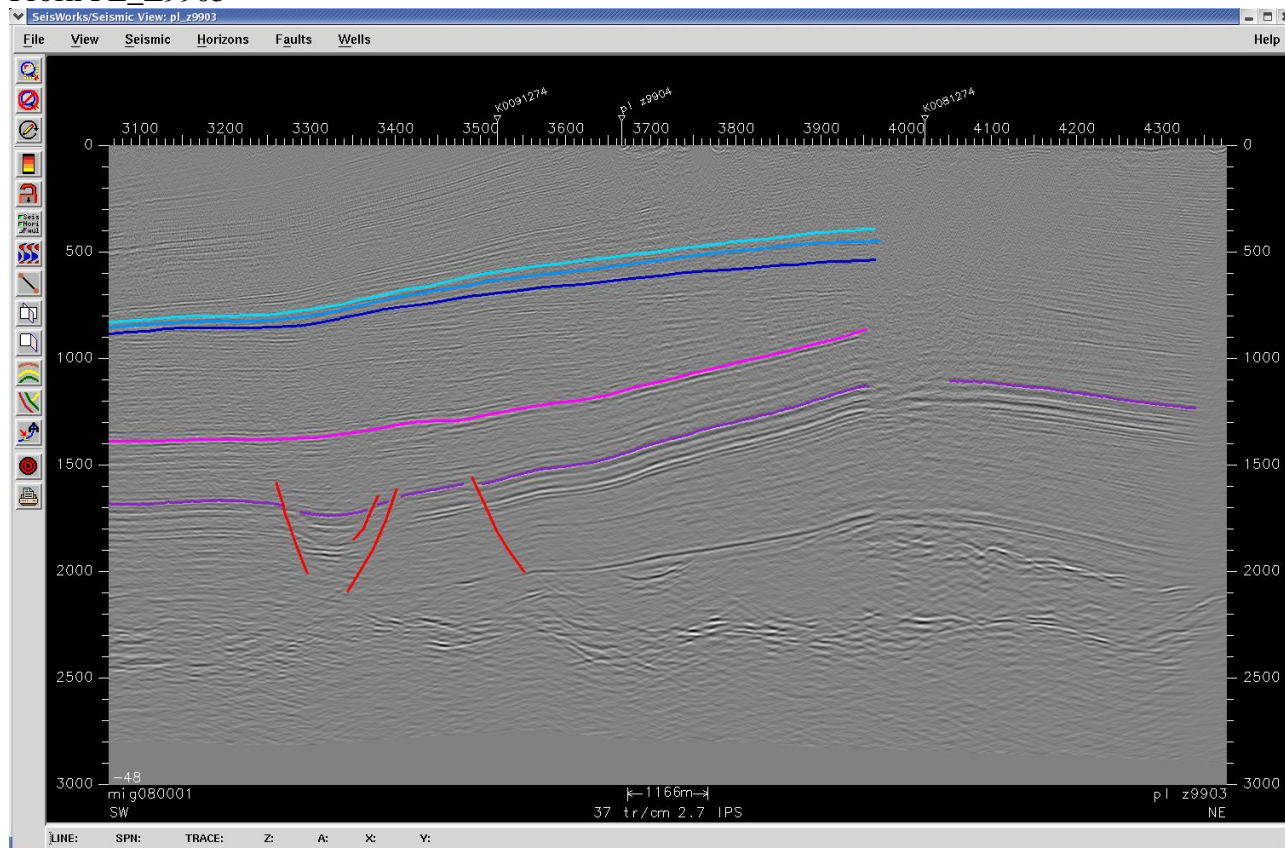
Rys. 1.1.16.3 Lokalizacja symulacyjnych otworów załączających (gwiazdki) dla struktury Budziszewice-Zaosie

Na potrzeby konstrukcji szczegółowego modelu dynamicznego (symulacji załączania dwutlenku w gła) konieczne było uszczegółowienie kompleksu dolnej jury (Rys. 1.1.16.2) w oparciu o wyniki interpretacji geologicznej profili sejsmicznych. W zadaniu 1.1.15 nie było jeszcze możliwe wykorzystanie najnowszych profili sejsmicznych z tego rejonu. Profile te zostały wykonane w latach 1999-2000 (akwizycja i processing) przez "Geofizyk" Toru sp. z o.o. dla firmy RWE Dea Polska sp. z o.o., w ramach tematu "Polska centralna" (koncesja na poszukiwanie w głowodórów). Wykorzystano trzy profile przecinające strukturę, udostępnione przez RWE Dea na potrzeby niniejszego tematu: PL\_Z9903, PL\_Z9904 i PL\_Z9905 (Rys. 1.1.16.4). w oparciu o wyniki interpretacji geologicznej dla tych trzech "nowych" i sześciu starych (scharakteryzowanych w raporcie z I segmentu: Wójcicki (red), 2009) profili sejsmicznych skonstruowano mapy czasowe i strukturalne horyzontów odpowiadających stopowi horyzontu uszczelniającego dolnego toarku, stopowi kolektora górnego pliensbachu i stopowi kolektora synemuru (patrz Rys. 1.1.16.2) a także dwóch horyzontów triasowych: wewnątrzkałprowego (spółg piaskowca trzciniowego) i wapienia muszlowego. Model prdko ci oparto na danych prdko ci rdnych z 6 otworów z rejonu

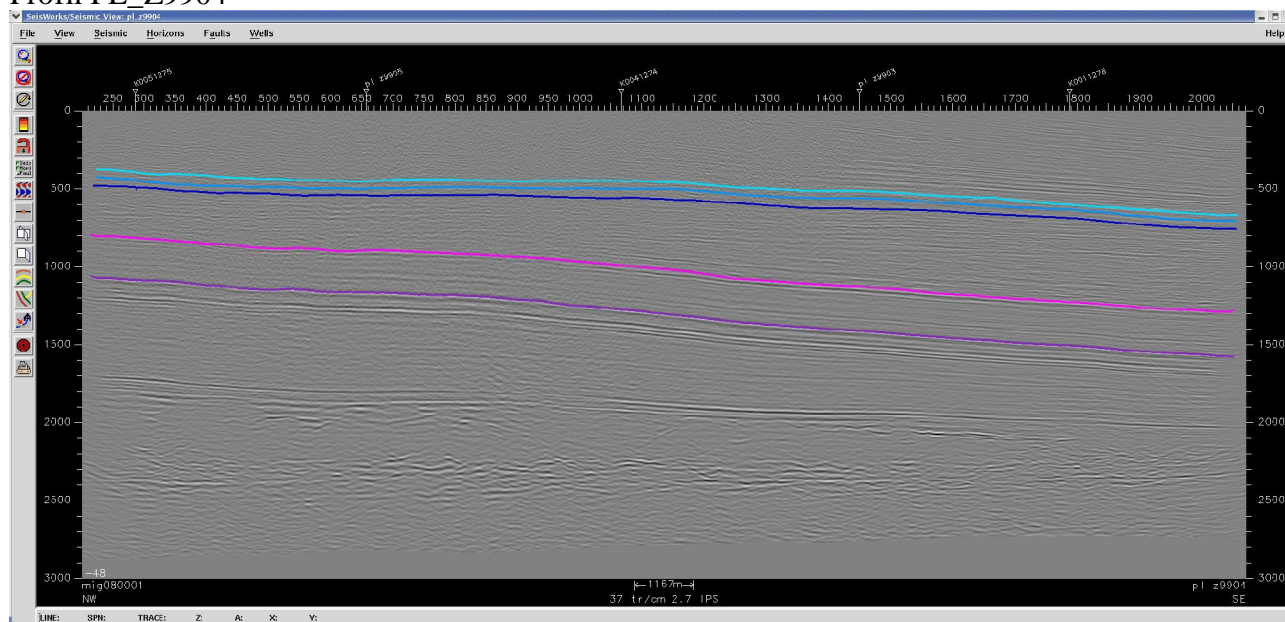


Budziszewice-Zaosie. Obraz sejsmiczny kompleksu dolnojurajskiego na sekcjach sejsmicznych dla "nowych" profili jest nieco lepszy niż w przypadku starych (rozdział 1.3 raportu z I segmentu) ale różnica ta nie jest drastyczna co wynika z faktu że celem badań RWE Dea były Cechsztyń a nie Jura. Jak widać na profilu PL\_Z9903 (Rys. 1.1.16.4), wałna strefa uskokowa w rejonie otworu Buków-2 (Rys. 1.1.16.2) występuje w utworach triasu i nie ma kontynuacji w jurze dolnej.

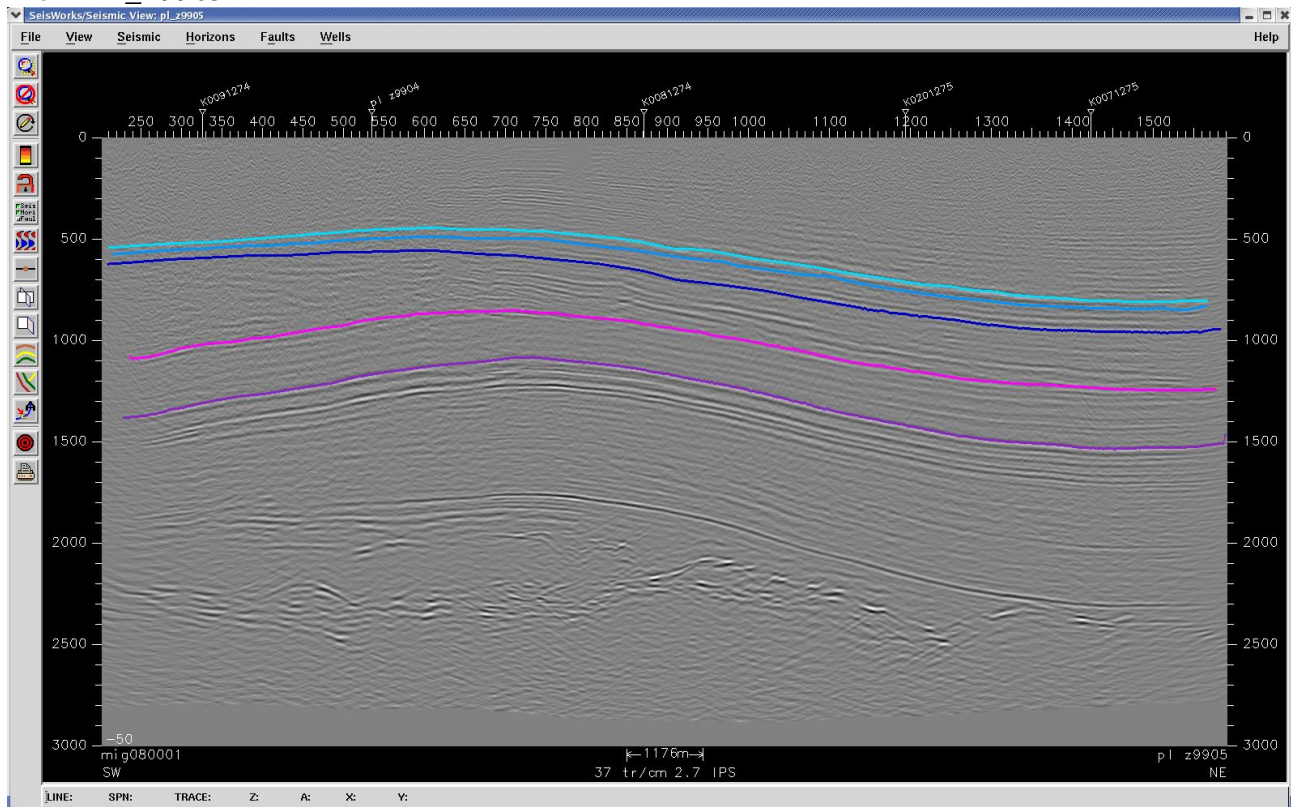
### Profil PL\_Z9903



### Profil PL\_Z9904



## Profil PL\_Z9905



Rys. 1.1.16.4 Interpretacja geologiczna sekcji sejsmicznych dla profili RWE Dea: PL\_Z9903, PL\_Z9904 i PL\_Z9905. Odcieniami niebieskiego zaznaczono horyzonty jury dolnej (od góry: strop toarku dolnego, strop pliensbachu górnego i strop synemuru; odpowiadają one utworom iłowcowym formacji ciechocińskiej, piaskowcom formacji drzewickiej i ostrowieckiej) za poniżej horyzonty triasowe (wewnątrz trzkajprowy i wapienia muszlowego).

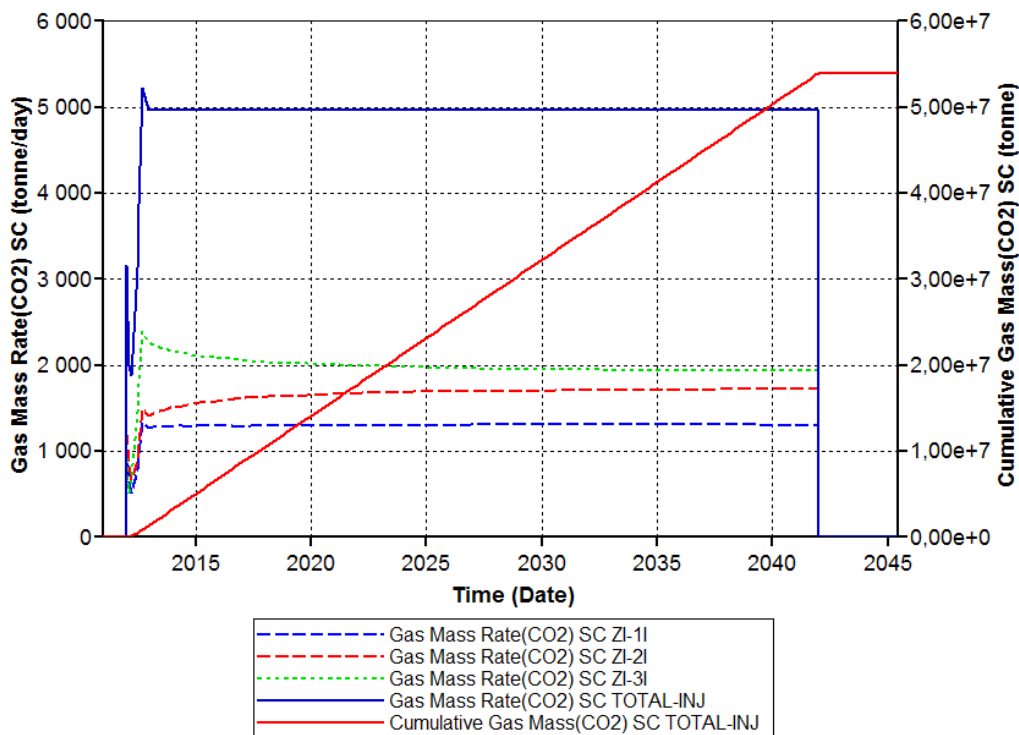
## Modelowania dynamiczne dla formacji jury dolnej (AGH, GEM)

AGH wykonała modelowania dynamiczne dodatkowo dla różnych wariantów technologicznych (czyli zatęszczanie pionowe czy poziome).

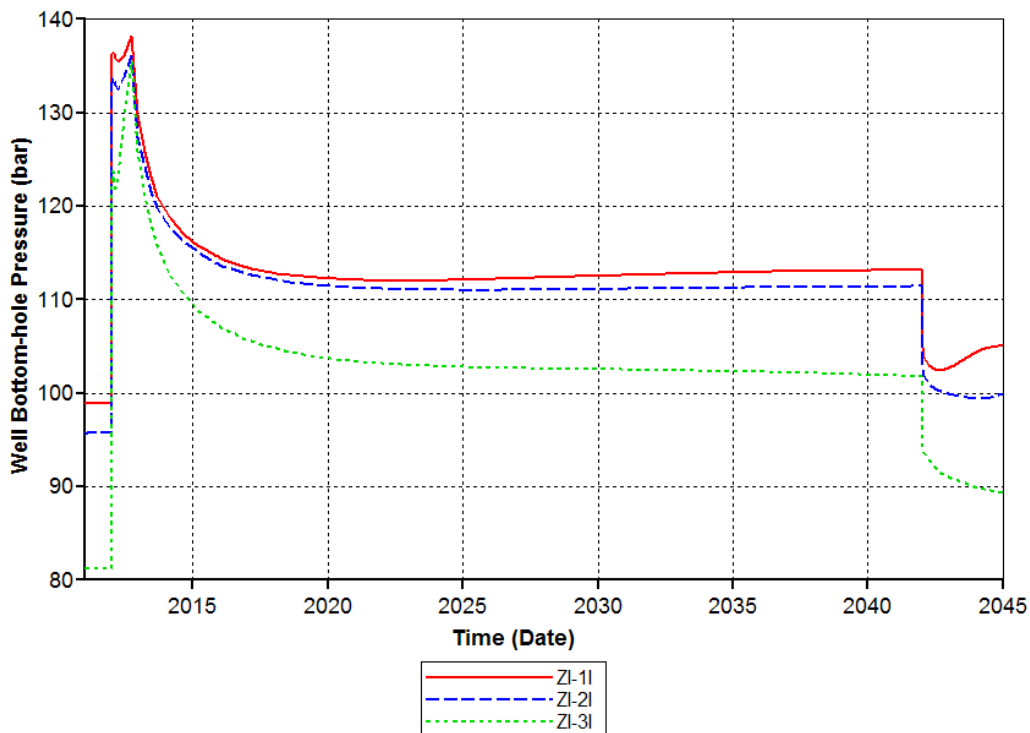
Pierwszy wariant (Rys. 1.1.16.1-11) obejmował trzy otwory pionowe (a nie cztery jak u pozostałych wykonawców). W tabeli 1.1.16.1 podano założenia dla tego modelu.

Tabela 1.1.16.1 Zestawienie podstawowych parametrów zatęszczania dla poszczególnych odwiertów.

Data	Wydajność zatęszczania [t/d]	Całkowita masa CO <sub>2</sub> [10 <sup>6</sup> t]	Ciśnienie denne [bar]
<b>ZI-1I</b>			
2011-12-01	0	0	98.92
2017-01-01	1290	2.256	113.5
2022-01-01	1293	4.623	112
2032-01-01	1310	9.383	112.7
2042-01-01	1304	14.160	113.2
2092-01-01	0	14.160	101.5
2142-01-01	0	14.160	100.1
2292-01-01	0	14.160	99.23
2442-01-01	0	14.160	99.07
2742-01-01	0	14.160	99.03
3010-01-01	0	14.160	99.03
<b>ZI-2I</b>			
2011-12-01	0	0	95.74
2017-01-01	1616	2.685	112.8
2022-01-01	1674	5.693	111.2
2032-01-01	1708	11.880	111.2
2042-01-01	1722	18.150	111.4
2092-01-01	0	18.150	98.2
2142-01-01	0	18.150	96.87
2292-01-01	0	18.150	96.04
2442-01-01	0	18.150	95.89
2742-01-01	0	18.150	95.86
3010-01-01	0	18.150	95.85
<b>ZI-3I</b>			
2011-12-01	0	0	81.25
2017-01-01	2059	3.731	105.7
2022-01-01	1997	7.420	103.2
2032-01-01	1946	14.600	102.5
2042-01-01	1937	21.690	101.8
2092-01-01	0	21.690	83.21
2142-01-01	0	21.690	82.39
2292-01-01	0	21.690	81.53
2442-01-01	0	21.690	81.4
2742-01-01	0	21.690	81.36
3010-01-01	0	21.690	81.36

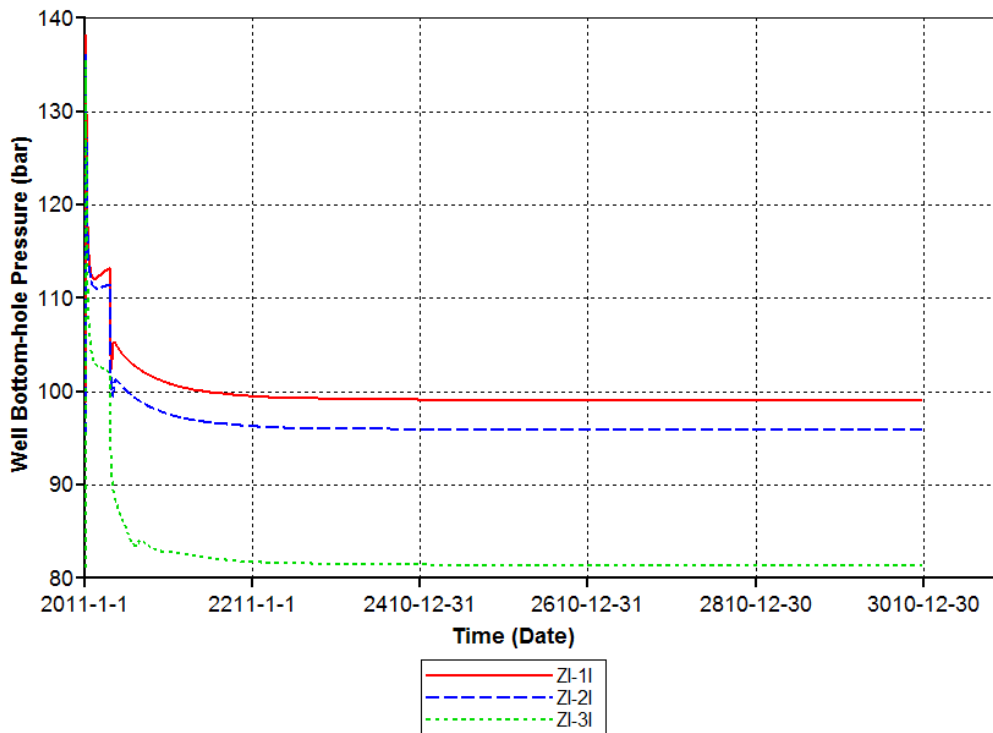


Rys. 1.1.16.5 Masowa wydajność zanieczyszczenia CO<sub>2</sub> dla poszczególnych odwiertów i całej instalacji oraz sumaryczna masa zanieczyszczonego dwutlenku w głą (3 otwory pionowe).

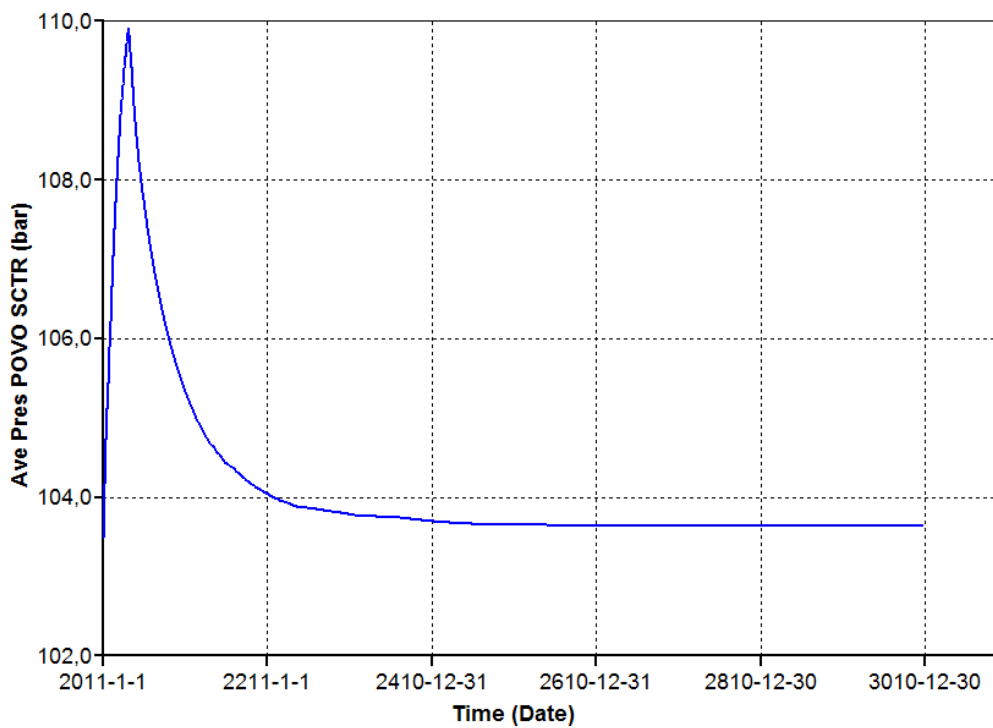


Rys. 1.1.16.6 Ciśnienie dennie w odwiertach w trakcie zanieczyszczenia.

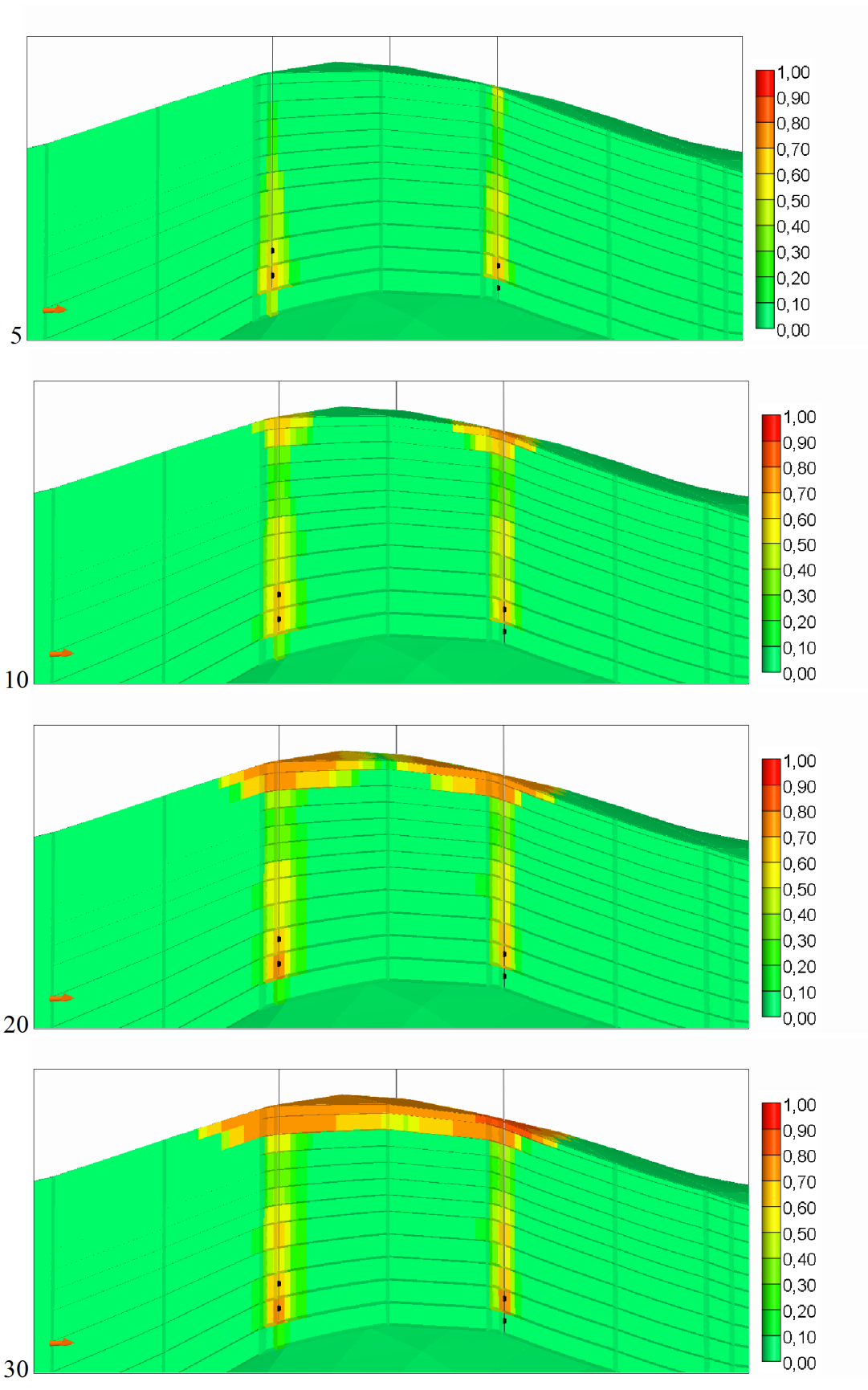




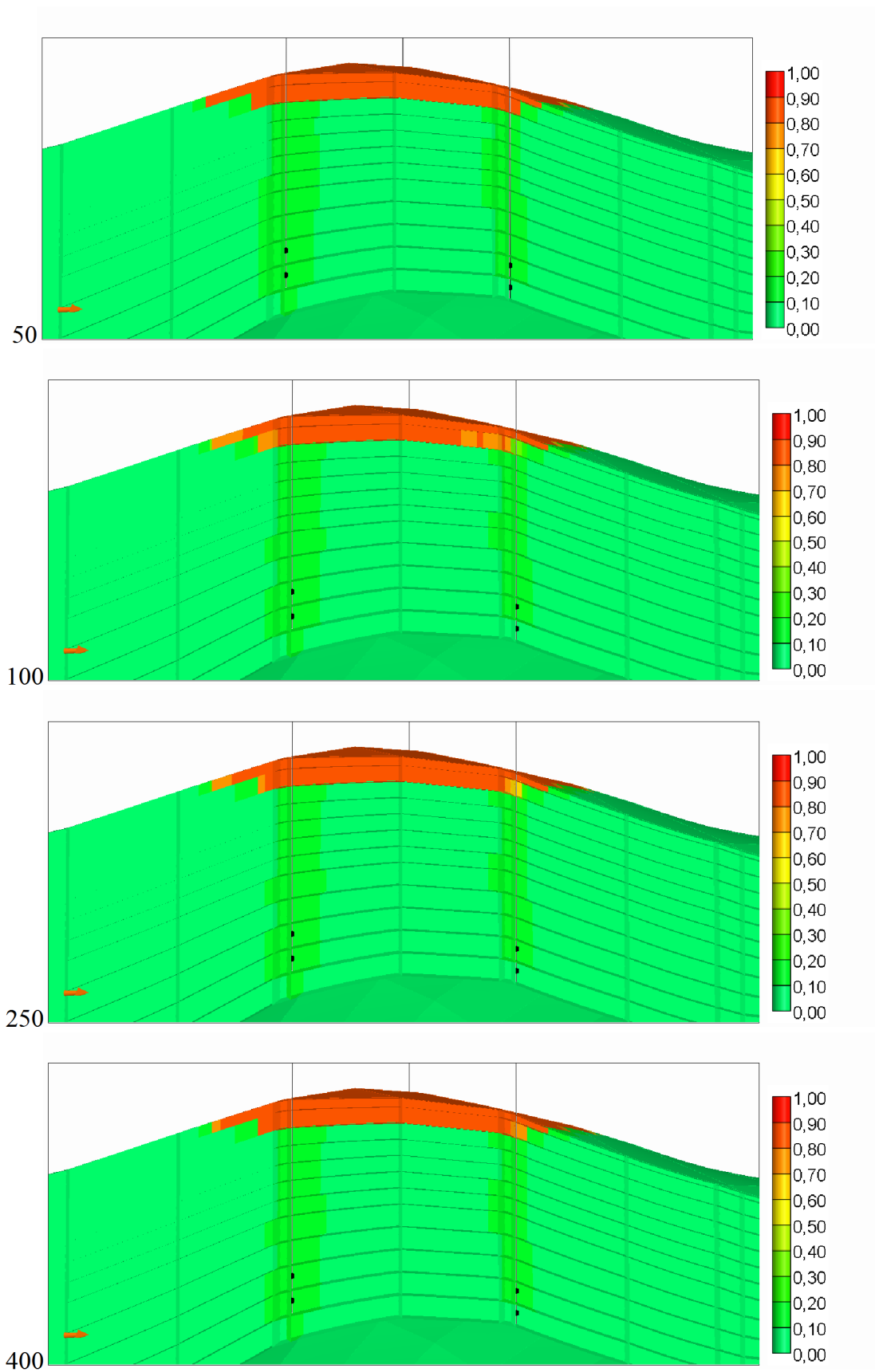
Rys. 1.1.16.7 Ci nienie denne w odwiertach w trakcie zatęszczania oraz po jego zakończeniu (stabilizacja ciśnienia).



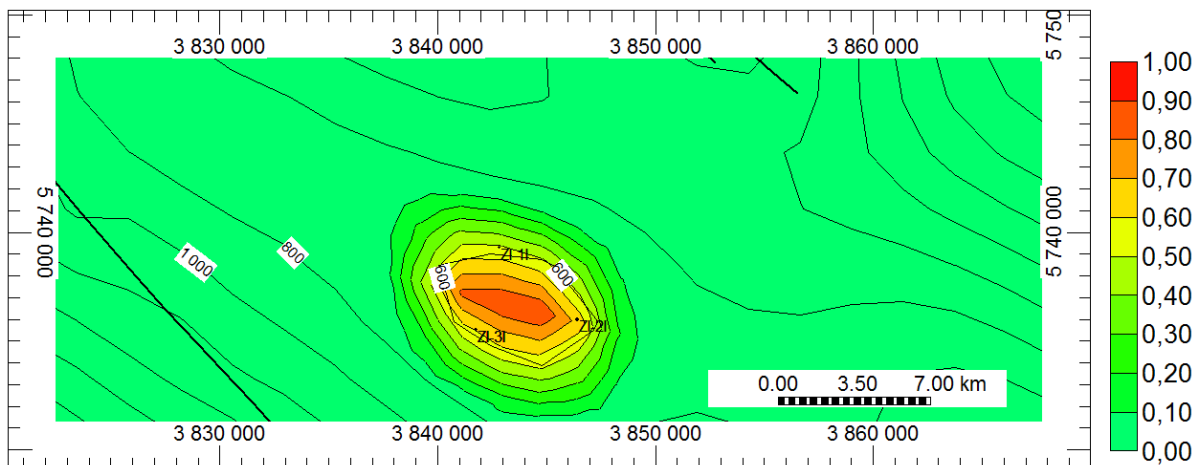
Rys. 1.1.16.8 Zmiana ciśnienia średniego w strefie zatęszczania CO<sub>2</sub>.



Rys. 1.1.16.9 Stanie CO<sub>2</sub> w przekroju zatłoczenia po 5, 10, 20 i 30 latach od momentu rozpoczęcia zatłoczenia



Rys. 1.1.16.10 Stężenie CO<sub>2</sub> w przekroju zatłoczenia po 50, 100, 250 i 400 latach od momentu rozpoczęcia zatłoczenia.



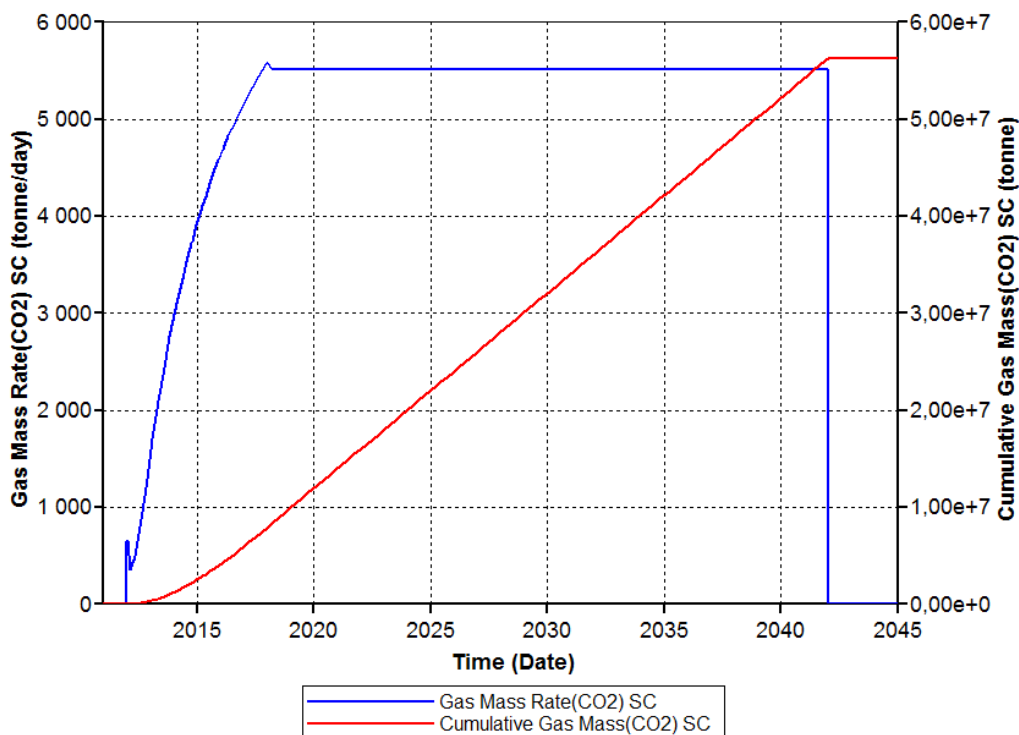
Rys. 1.1.16.11 Zasięg strefy nasycenia CO<sub>2</sub> w stropie pliensbachu około 400-1000 lat od zakończenia zatęczenia (stabilizacja).

Otwory symulacyjne "nawiercaj" górny pliensbach na głębokości 900-1000 metrów p.p.t. Należy przy tym zauważyć, że kolektor synemuru (i hettangu) posiada lokalnie szczelność z nadległym kolektorem górnego pliensbachu, to znaczy że uszczelnienie dolnego pliensbachu lokalnie traci dobre właściwości, w szczególności w szczytowej partii struktury, w rejonie otworu Zaosie-2, a na pozostałym obszarze nie zawsze jest dobrą barierą (nie są to przeważnie czynniki i więcej tylko inne facje o mniejszym zaleźnieniu, stąd ci nienie progowe/kapilarne wywołane oddziaływaniem dwutlenku w gła w kolektorze poniżej wystarcza do penetracji utworów dolnego pliensbachu).

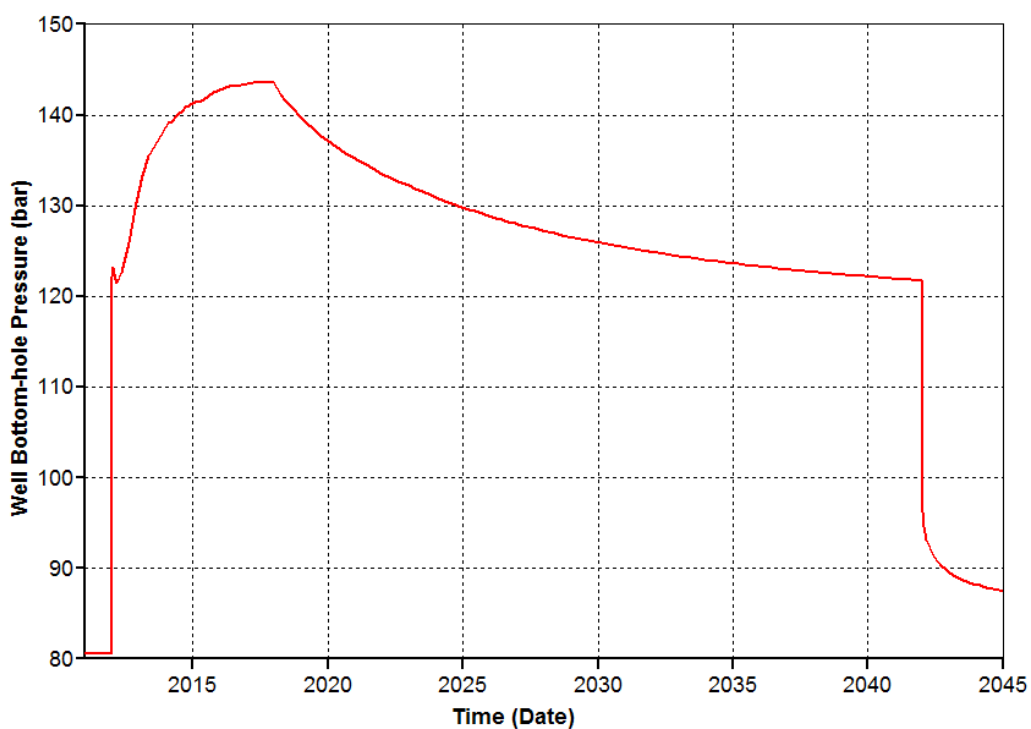
Drugi wariant dotyczy zatęczenia pojedynczym otworem horyzontalnym (wydajność zatęczenia zbliżona do sumarycznej dla trzech otworów pionowych). W tabeli 1.1.16.2 podano założenia dla tego modelu.

Tabela 1.1.16.2 Zestawienie podstawowych parametrów zatęczenia dla odwiertu poziomego.

Data	Wydajność zatęczenia [t/d]	Całkowita masa CO <sub>2</sub> [10 <sup>6</sup> t]	Ci nienie denne [bar]	Ci nienie rednie w strefie zatęczenia [bar]
2011-12-01	0	0	80.66	103.5
2017-01-01	5156	5.939	143.4	105.3
2022-01-01	5515	15.98	133.5	107.1
2032-01-01	5515	36.12	124.9	109.3
2042-01-01	5515	56.27	121.7	110.5
2092-01-01	0	56.27	82.76	106.1
2142-01-01	0	56.27	81.91	104.7
2292-01-01	0	56.27	80.91	103.8
2442-01-01	0	56.27	80.81	103.7
2742-01-01	0	56.27	80.8	103.7
3010-01-01	0	56.27	80.79	103.7

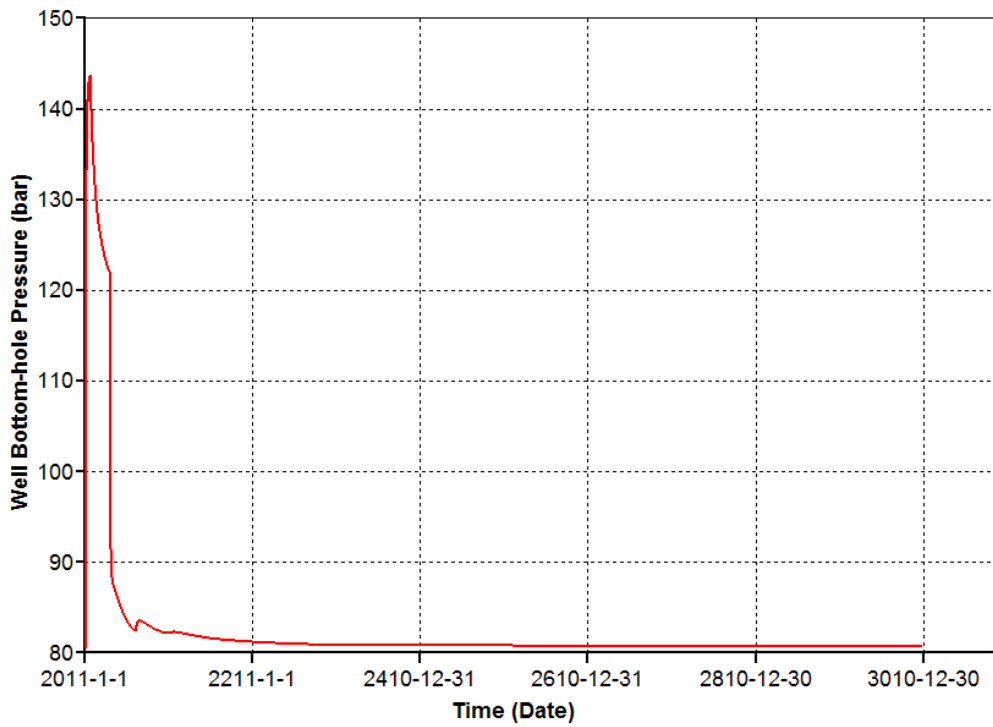


Rys. 1.1.16.12 Masowa wydajno zatęczenia CO2 oraz sumaryczna ilo zatęzonego dwutlenku w gla.

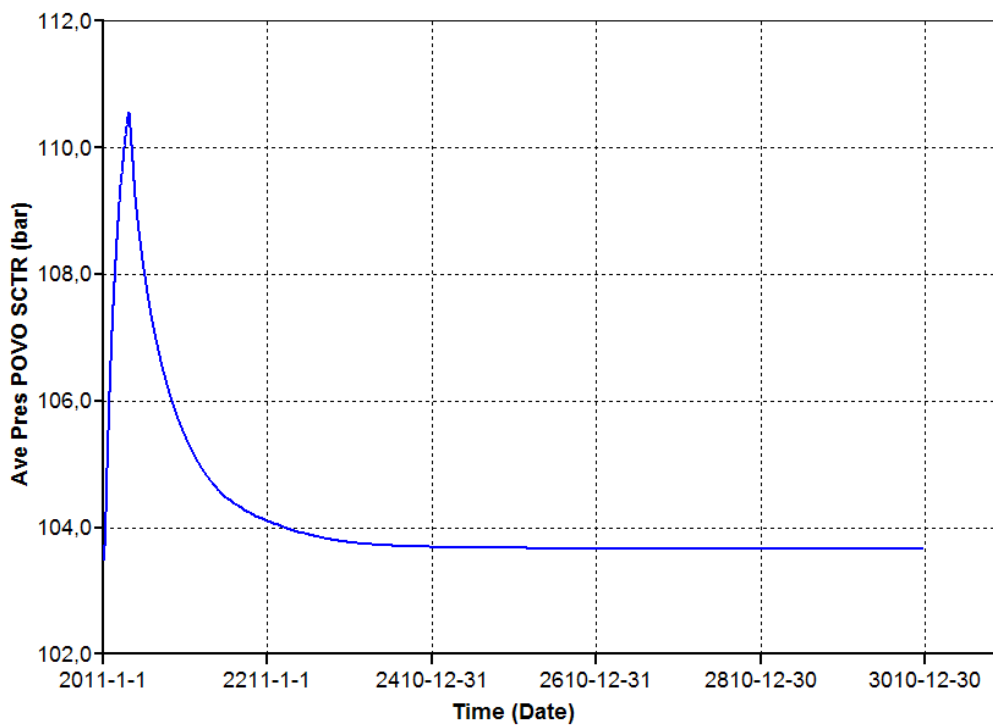


Rys. 1.1.16.13 Ci nienie denne w odwiercie w trakcie zatęczenia.

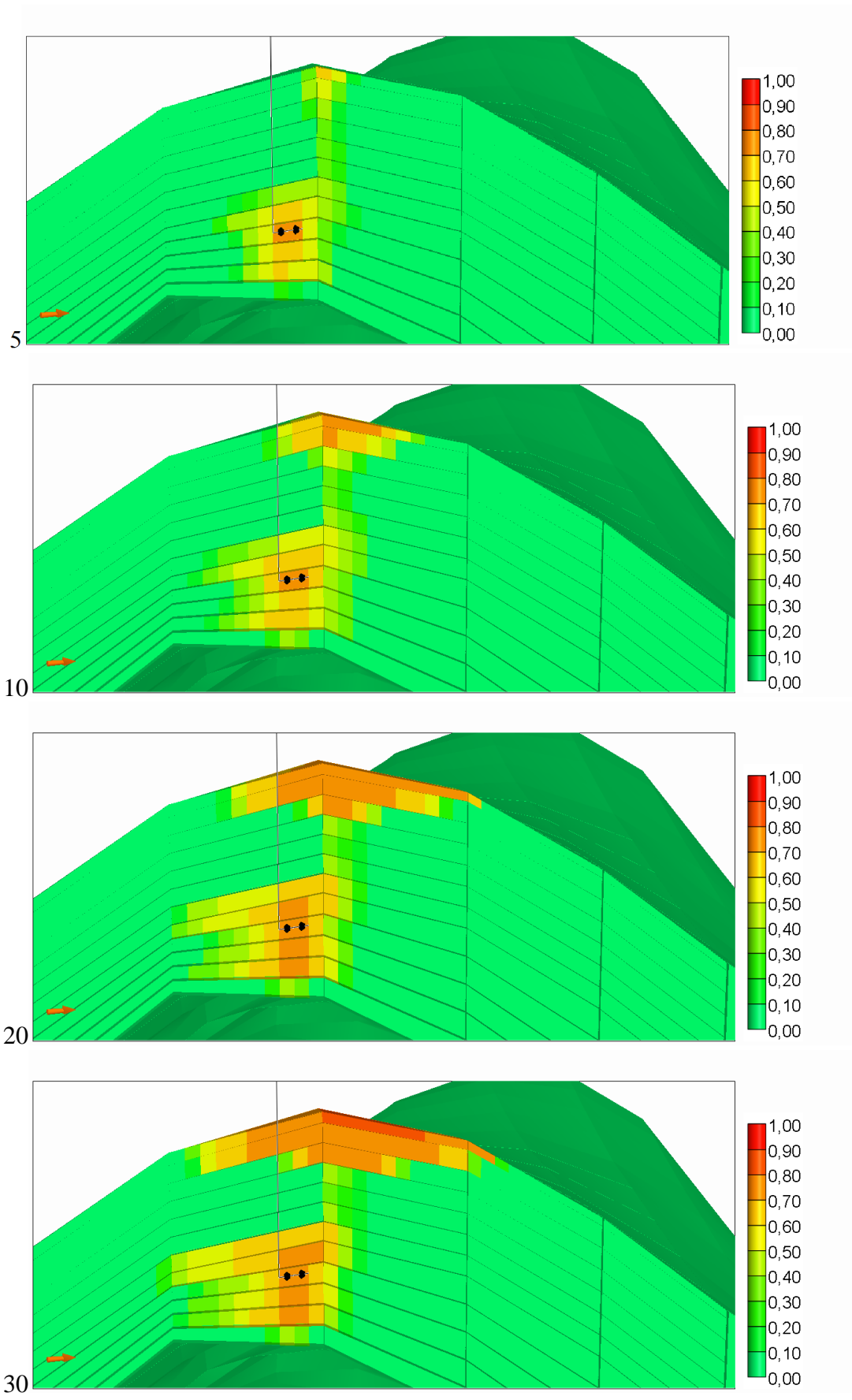




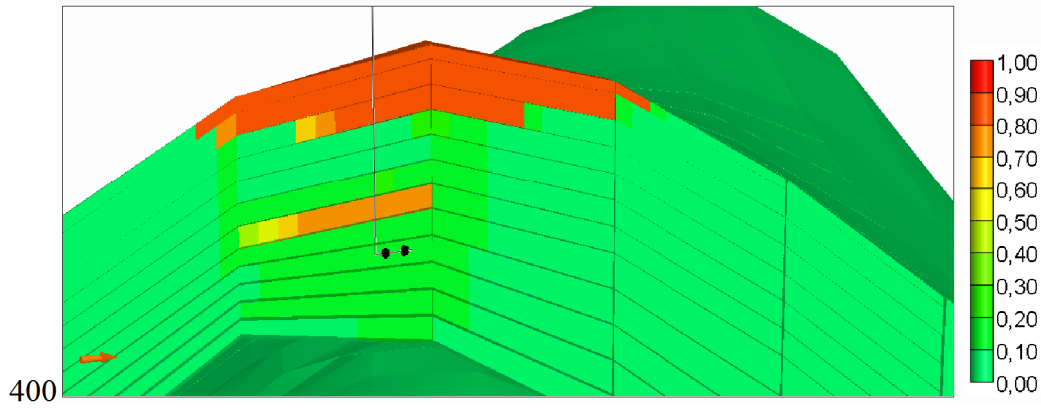
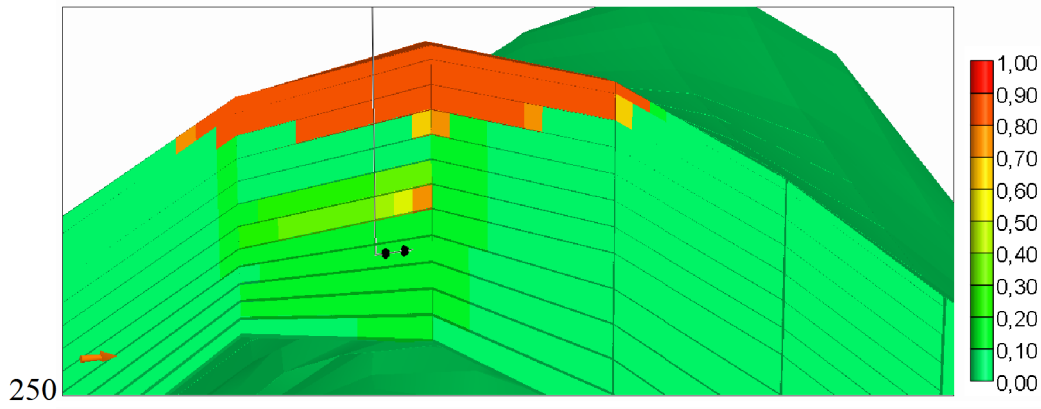
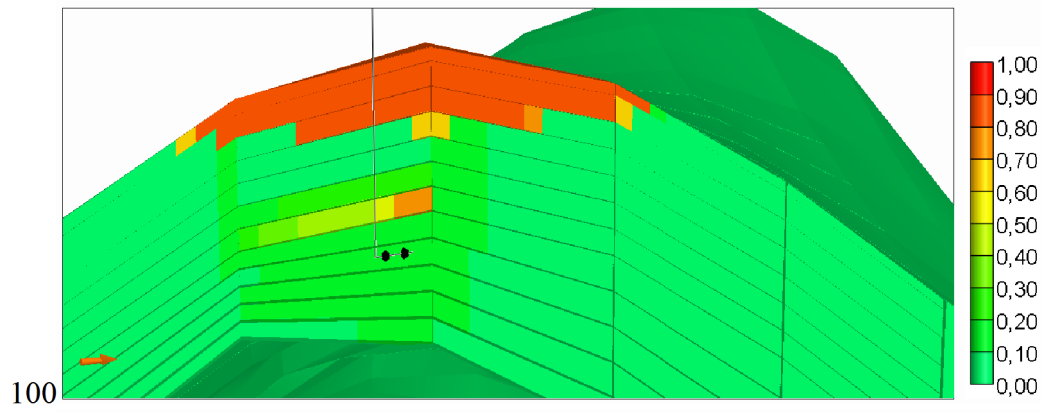
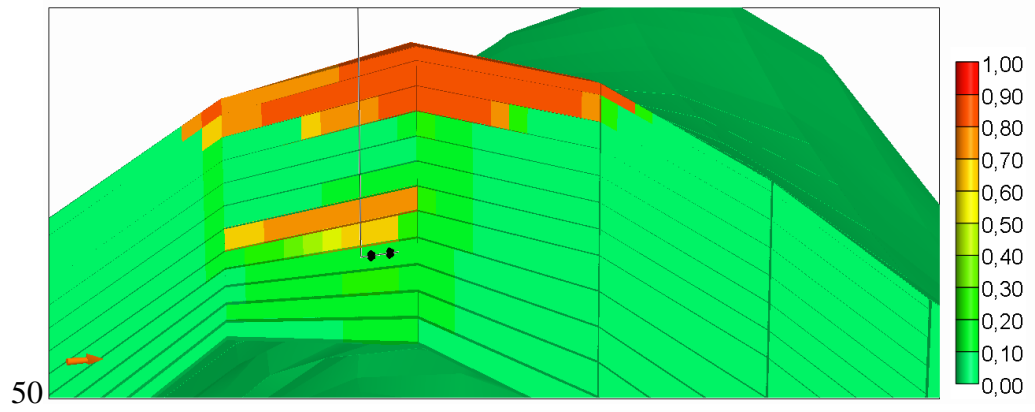
Rys. 1.1.16.14 Ci nienie denne w odwiercie w trakcie zatęszczania oraz po jego zakończeniu (stabilizacja ciśnienia).

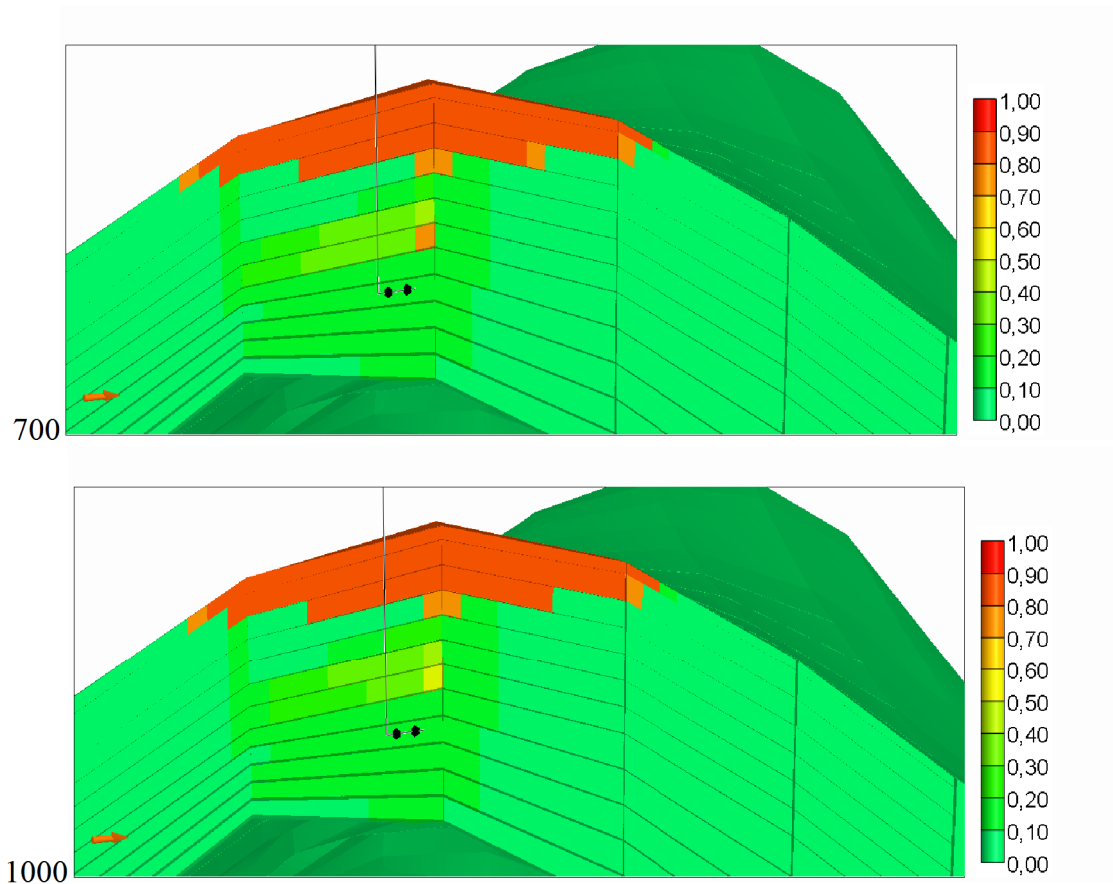


Rys. 1.1.16.15 Zmiana ciśnienia średniego w strefie zatęszczania CO<sub>2</sub>.

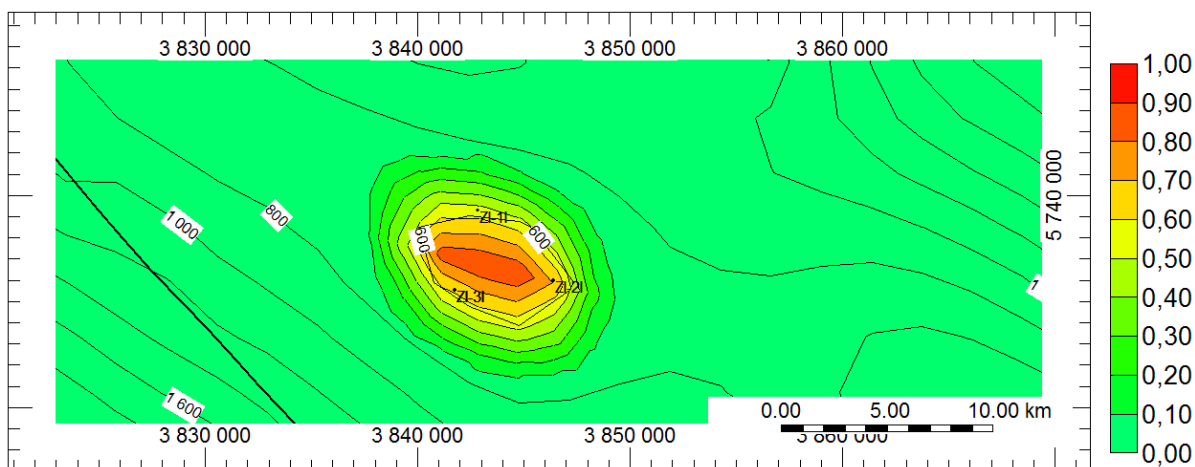


Rys. 1.1.16.16 Stężenie CO<sub>2</sub> w przekroju zatęczenia po 5, 10, 20 i 30 latach od momentu rozpoczęcia zatęczenia.





Rys. 1.1.16.17 Stężenie CO<sub>2</sub> w przekroju zatłoczenia po 50, 100, 250, 400, 700 i około 1000 latach od momentu rozpoczęcia zatłoczenia.



Rys. 1.1.16.18 Zasięg strefy nasycenia CO<sub>2</sub> w stropie piensbachu około 1000 lat od zakończenia zatłoczenia (stabilizacja).

Zatłoczenie jednym otworem poziomym jest oczywiście bardziej ekonomiczne niż w trzech pionowych, ale wszystkie nieuniknione w odwiercie mogą mieć wpływ na bezpieczeństwo składowania.

## Modelowania dynamiczne dla formacji jury dolnej (GIG, PetraSim/TOUGH2)

GIG wykonał modelowanie dynamiczne na podstawie modelu statycznego opracowanego w formatach Schlumberger Petrel (możliwa wymiana danych z oprogramowaniem GOCAD). Model obejmuje utwory piaszczyste synemuru stanowiące zbiornik oraz utwory ilaste plensbachu i pierwsza izolacja zbiornika. W trakcie realizacji zadania zbiornik został zmodyfikowany i obejmuje warstwę o miąższości 100 m od stropu synemuru natomiast izolacja stanowi warstwę 80 m powyżej stropu synemuru o formacji gielniowskiej.

Z uwagi na posiadane oprogramowanie PetraSim (TOUGH) v2.0, niekompatybilne z Petrelem czy GOCADem nie można było bezpośrednio zaimportować modelu statycznego. Dlatego te prace w trakcie tego zadania były zbudowaniem modelu w PetraSim-ie w taki sposób aby odzwierciedlał strukturę geologiczną (antykliny Budziszewic).

### Ważność dwutlenku w głą

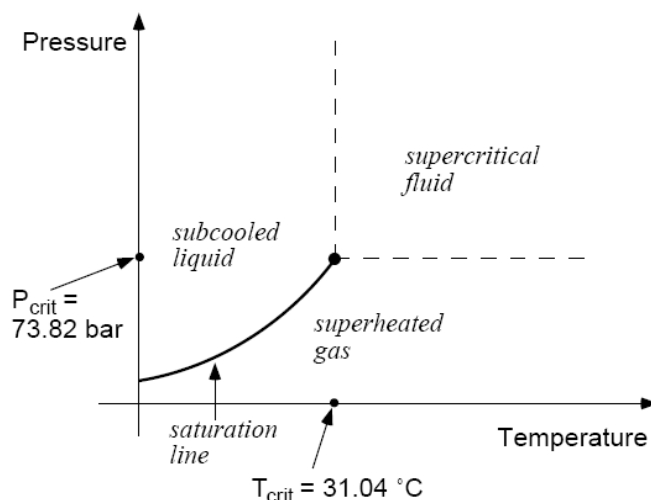
Możliwość podziemnego unieszkodliwiania (sekwestracji) czy magazynowania dwutlenku w głą zależy m.in. od właściwości fizykochemicznych tego gazu. Podstawowe właściwości przedstawiono w Tabeli 1.1.16.3.

Tabela 1.1.16.3 Właściwości fizyczne dwutlenku w głą

Temperatura topnienia	Temperatura wrzenia	Ciepłota topnienia	Ciepłota sublimacji	Gęstość w stanie ciekłym	Temperatura krytyczna	Ciepłota krytyczna	Gęstość krytyczna
°C	°C	kJ/mol	kJ/mol	kg/dm <sup>3</sup>	°C	bar	kg/m <sup>3</sup>
-57,6	-78,5	7,95	26,3	1,101	31,04	73,8	0,4

Dwutlenek w głą zależy od panujących ciśnienia i temperatury, może występować w jednym z trzech stanów skupienia a mianowicie:

1. gazowym,
2. stałym,
3. ciekłym



Rys. 1.1.16.19 Przemiany fazowe CO<sub>2</sub>.



Linia równowagi pomiędzy fazami rozróżnia stan skupienia która przedstawiono na Rys. 1.1.16.19 linii równowagi pomiędzy fazami ciekłej i gazowej. Wzrost ciśnienia przy stałej temperaturze może powodować przejście do fazy ciekłej. Obszar nadkrytyczny ma właściwość ciekła o dużej gęstości zależną od ciśnienia i temperatury.

Dla określonej temperatury, rozpuszczalność CO<sub>2</sub> rośnie wraz ze wzrostem ciśnienia oraz maleje ze wzrostem temperatury (przy ciśnieniach poniżej 100 bar, bowiem dla ciśnien powyżej 100 bar rozpuszczalność powoli rośnie).

Istotne jest z punktu widzenia zatęszczania, i lepkość tego gazu, jak również jego gęstość, rośnie ze wzrostem ciśnienia, ale wzrost jest tym mniejszy im większa jest temperatura.

Istotne jest również określenie gęstości dwutlenku węgla w warunkach złożowych oraz potencjał rozpuszczania i mieszania się z porami złożowymi oraz reagowania - ze skałami otaczającymi.

Ważnym elementem, z racji bezpieczeństwa procedur sekwestracji jest szeroko rozumiana szczelność skał występujących w nadkrytycznym obszarze.

Z punktu widzenia geologicznego potencjalnymi zbiornikami mogą być skały cechujące się odpowiednio dużą porowatością i szczelinowością (piaskowce, zlepiece, brekcje oraz wszelkie wapienie, dolomity).

Na efektywność zatęszczania dwutlenku węgla będącą w głównej mierze porowatością i przepuszczalnością skał zbiornikowych. Wszystkie są funkcją wielkości porów istniejących w skałach zbiornikowych, przy czym w skałach w glanowych istotnym elementem oceny serii zbiornikowych jest ich szczelinowość.

Wprowadzeniu gazu do otrocka skalnego (porowego) towarzyszy zjawisko adsorpcji, czyli zwięźnienia struktury gazu na powierzchni ciał stałych. Zjawisko to jest częścią procesów w modelowaniu numerycznym. Parametrem wyznaczanym w trakcie badań jest chłonność adsorbcyjna, czyli maksymalna ilość substancji jaką może zostać zasorbowana w jednostce masy danego ciała w danych warunkach temperatury i ciśnienia. Drugim parametrem jest gazopojemność skał - ilość gazu znajdującej się w jednostce masy, na którą składa się suma gazu wolnego i zasorbowanego.

Takie mechanizmy mogą zachodzić głównie w skałach porowatych, niezawodnionych lub częściowo zawodnionych. Mogą one występować w wyeksploatowanych złożach w gwałowodorów i w mniejszym stopniu w warstwach wodonośnych, gdzie pory są całkowicie wypełnione wodą (Nodzecki, Hoda 2003).

Podczas zatęszczania dwutlenku węgla do warstwy wodonośnej należy liczyć się z procesem rozpuszczania gazu w cieczy. Podczas procesu zatęszczania, CO<sub>2</sub> do podziemnych struktur skalnych mogą również zachodzić różne procesy zmiany stanu skupienia tego gazu, a zwłaszcza może mieć miejsce skraplanie się w otworze zatęszczającym. Dwutlenek węgla może stosunkowo łatwo skraplać się (ciężiej niż metan) bo już w temperaturze od 0°C do 30°C i przy ciśnieniu od 3 do 7 MPa (Wichert, Royan, 1996).

### **Modelowania numeryczne i symulacje komputerowe**

W zakresie modelowania numerycznego zostały wykorzystane oprogramowanie PetraSim z zestawem symulatorów TOUGH2 v2 (Orenburg & Pruess, 1995; 1996a; 1996b; Pruess i in., 1987; 1999). Wykorzystanie wymienionych symulatorów determinowane było głównie przez potrzeby symulacji przepływów wielofazowych z uwzględnieniem m.in. zjawisk adsorpcji i dyfuzji. Wybór tych zestawów był wymuszony na możliwość symulowania zjawisk wielofazowych, których nie posiadają standardowe symulatory typu Modflow.

TOUGH2 jest symulatorem przepływu płynów jedno i wielofazowych izo- i nieizotermicznych znajdującym szerokie zastosowanie w inżynierii złożowej naftowej, geotermii a ostatnio w sekwestracji CO<sub>2</sub> - szczególnie w określeniu i modelowaniu kontaminacji czy prognozowania depozycji odpadów nuklearnych (Pruess, 1987; Pruess 1991, Pruess et al. 1996b).

Badania naukowe budowy symulatora zostały wykonane w Laboratorium Lawrence Berkely (USA) w ostatnich dwudziestu latach, w związku z potrzebą oceny wpływu deponowania odpadów nuklearnych i płynnych zanieczyszczeń w warstwach porowatych węglowych a w ostatnich latach deponowania CO<sub>2</sub> w warstwach wodonośnych.

Od tego czasu szereg nowych zostało wprowadzonych do symulatora, w szczególności nowe typy solverów zmniejszające czas obliczeń bez utraty dokładności. Symulator ma możliwość dowolnej implementacji solvera, umożliwiającą bezproblemową symulację zagadnień 2D i 3D o siatce obejmującej 20 000 bloków i więcej, w zależności od sprzętu. Przykłady takich symulacji pokazuje praca (Pruess et al. 1999) opisująca zastosowanie na wielu platformach sprzecznych.

W istocie swojej symulator TOUGH2 należy do znanej rodziny symulatorów MULTOM zbudowanej w Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL). W obecnej chwili wykorzystuje szereg równań stanu (m. in.):

EOS1 - woda, woda ze znacznikiem,

EOS2 - woda, dwutlenek węgla,

EOS3 - woda, powietrze,

EOS4 - woda, powietrze z efektami kapilarnymi,

EOS5 - woda, wodór,

EOS7 - woda, solanka, powietrze,

EOS7R - woda, solanka, powietrze, pierwiastki promieniotwórcze i produkty ich rozpadu,

EOS8 - woda, martwa ropa, nie skraplające się gazy,

EOS9 - izotermiczny strumień masy w skałach o różnym nasyceniu,

EWASG - woda, sól (NaCl), niekondensujące gazy, warunki wytrącania i rozpuszczania soli powodujące zmiany porowatości i przepuszczalności skały

EGEL- przepływ dwufazowy m.in. z płynem elującym

EOSNN - przepływ 3 fazowy wody, gazu niekondensującego i płynu newtonowskich i nienewtonowskich.

ECO2N - woda, NaCl, dwutlenek węgla.

Równania te umożliwiają wykorzystanie symulatora do wielu obliczeń z zastosowaniem w inżynierii środowiska. W głównym module programu rozwijane są równania bilansu energii i masy, opisujące strumień ciepła i płynu w wielofazowych i wieloskładnikowych systemach. Filtracja płynu jest opisana prawem Darcy'ego rozszerzonym do warunków wielofazowych, z uwzględnieniem przepływu dyfuzyjnego. Opis termodynamicznych warunków przepływu wykorzystuje założenie lokalnej równowagi wszystkich faz.

W symulatorze wykorzystuje się metodę różnic skończonych (the integral finite differences formulation (IFD: Pruess, 1991).

Do dalszych rozważań wykorzystano równania stanu ECO2N. Modelowanie procesu zatęszczania CO<sub>2</sub> w struktury geologiczne jest skomplikowane z uwagi na właściwości fizykochemiczne tego gazu o których już pokrótce wspomniano wyżej.

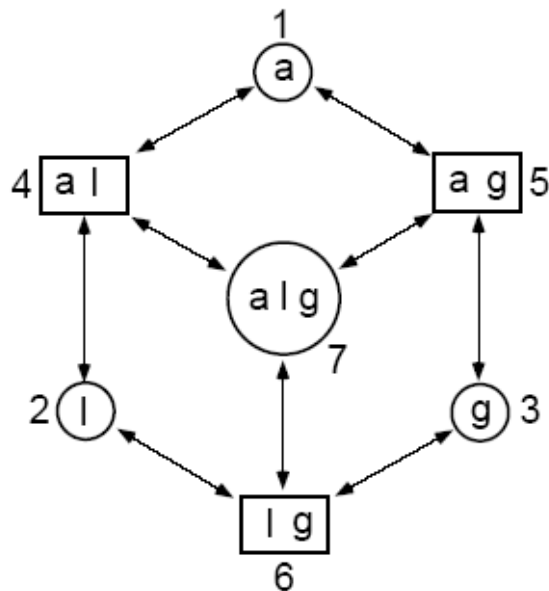
W związku z powyższym skrótkowo wyjaśnię pewne procesy wykorzystane w module ECO2N.

Iniekcja CO<sub>2</sub> do suchych warstw wodonośnych może wywoływać przepływ wielofazowy, wymian ciepła oraz reakcje chemiczne. W laboratorium Berkeley opracowano symulatory dla (czy) modułów tych procesów. Jednym z modułów dla symulatora TOUGH 2 jest moduł ECO2N który jest przeznaczony dla tego rodzaju procesów, choć można również wykorzystać moduł EWASG (Pruess i in. 1999, Pruess, 2004). Moduł ECO2N składa się z dwóch faz: woda- przepływ fazowy fazy ciekłej oraz faz gazów CO<sub>2</sub>, faza stała reprezentowana jako NaCl może również występować w tym module. Reakcje chemiczne prezentowane w module ECO2N obejmują etap równowagi pomiędzy wodą i dwutlenkiem węgla między fazą ciekłą i gazową. Pomiędzy H<sub>2</sub>O i CO<sub>2</sub> między fazą gazową a ciekłą przedstawiona jest w module jako funkcja temperatury, ciśnienia i zasolenia, wykorzystując korelację wg. Spychera i Pruess (2005). Rozpad i rozpuszczalność soli

potraktowany w module ECO2N za pomocą lokalnej równowagi rozpuszczalności. Uwzględniaj zmiany w porowatowości i przepuszczalności ośrodka. Wszystkie fazy, tj. gazowa, ciekła i stała mogą pojawić się, lub zaniknąć w siatce rozpatrywanego bloku podczas rozpoczęcia symulacji numerycznej.

Termodynamiczne warunki objętościowe i warunki temperaturowe z otoczenia rozpatrywanego bloku to znaczy do temperatury około 100°C i ciśnienia do 600 barów oraz zasolenie od 0 do pełnego nasycenia. Te parametry powinny być wystarczające do większości przypadków dotyczących sekwestracji CO<sub>2</sub> do słonych warstw wodonośnych.

W dwuskładnikowym systemie woda i CO<sub>2</sub>, przy temperaturach powyżej 0 °C, rozpatruje się trzy fazy, które mogą być obecne w fazie ciekłej woda może zawierać rozpuszczony CO<sub>2</sub>, może również występować woda i ciekły CO<sub>2</sub>, w fazie gazowej oprócz CO<sub>2</sub> może występować para wodna. W procesie tym może występować 7 połączeń fazowych przedstawionych na Rys. 1.1.16.20. Ciekły i gazowy CO<sub>2</sub> mogą współistnieć wzdłuż krzywej nasycenia, ciśnienia CO<sub>2</sub> który kończy się w punkcie krytycznym, który określony jest temperaturą i ciśnieniem ( $T_{kryt}$ ,  $P_{kryt}$ ) = (31.04°C, 73.82 barów) (Vargaftik, 1975).



Rys. 1.1.1.6.20 Możliwe połączenia faz w systemie woda i CO<sub>2</sub>. Oznaczenia faz: ciekły, l – płynny CO<sub>2</sub>, g – gazowy CO<sub>2</sub>

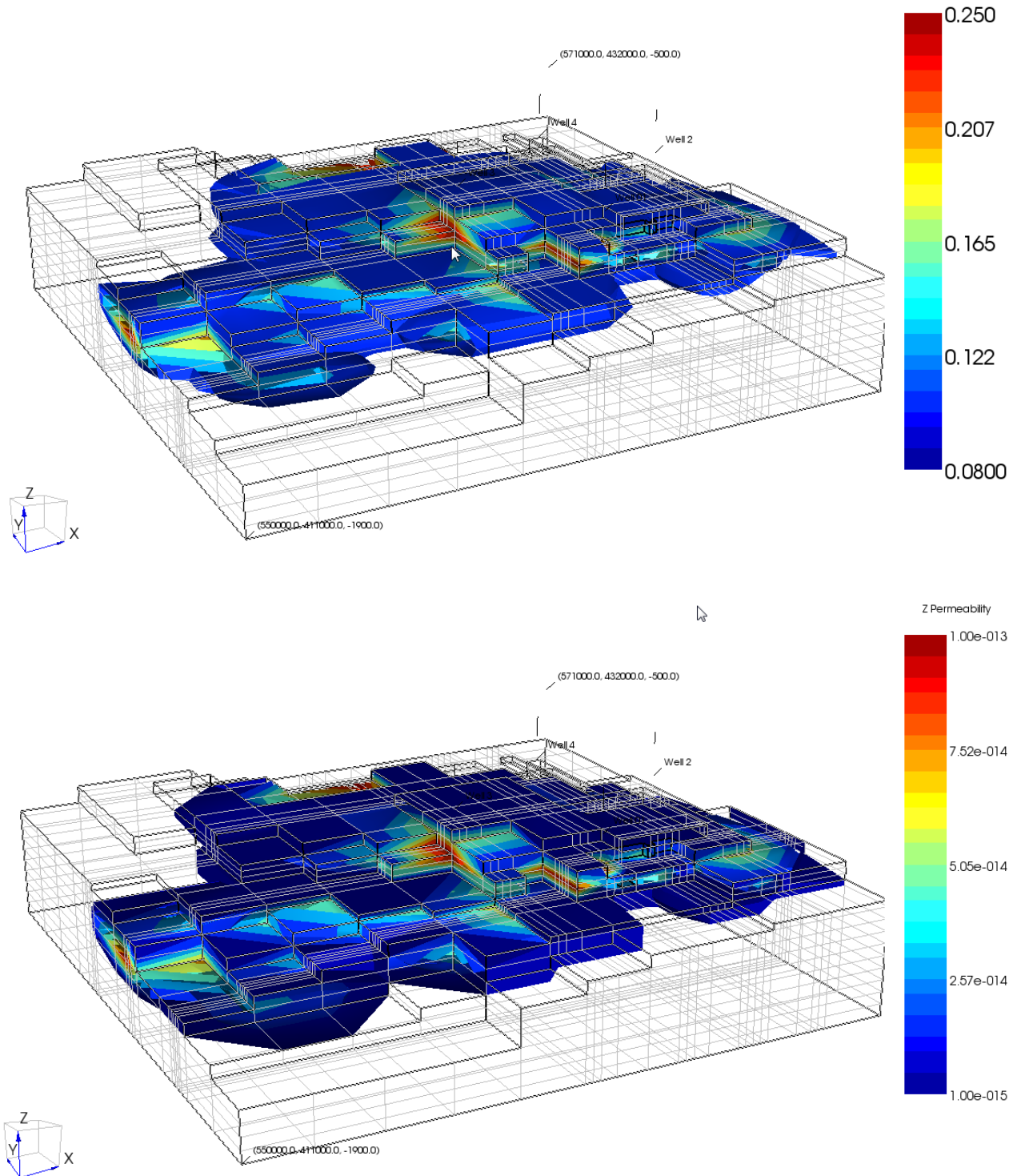
Z siedmiu połączeń przedstawionych na Rys. 1.1.1.6.20, ECO2N może reprezentować ponumerowane fazy 1 (jedna faza wody z rozpuszczonym CO<sub>2</sub> i NaCl), 2,3 jedna faza CO<sub>2</sub>, który może być faza ciekła i gazowa CO<sub>2</sub> i rozpuszczony par wodny), 4,5 (dwufazowe warunki składające się z wodny i CO<sub>2</sub>) i 7 (trójfazowy).

### Budowa modeli numerycznych

Model numeryczny zbudowano w programie PetraSim (z symulatorem TOUGH2). Podstawą modelu numerycznego jest model statyczny obejmujący utwory synechizmu i plensbachu, stanowiące zbiornik i uszczelnienie. Z uwagi na brak możliwości zaimportowania modelu statycznego z uwagi na uwarunkowania programowe, zbudowano model numeryczny (statyczny) w programie PetraSim.

Granice modelu przyjęto tak aby obejmowały zasięgiem całej struktur. Stanowiący

prostokątne ciany o wymiarach 21kmx21km, którego powierzchnia dolna odpowiada rz. dnej 1600m n.p.m. a górna 500 m n.p.m. stanowi ca. szczyt struktury. Tak wyznaczony model, poddano dyskretyzacji przestrzenną siatką ortogonalną, w układzie pionowym wyznaczono przedziały 100m, tak aby zobrazować strukturę antyklinalną w modelu (Rys. 1.1.16.21). Parametry modelu przedstawiono poniżej celem zobrazowania za pomocą modeli.



Rys. 1.1.16.21 Rozkład porowatości (góra) i przepuszczalności modelu (dół) jednostki SI.

## Warunki zatęczenia

Model zbudowano dla kolektora synemuru z hettangiem (formacja ostrowiecka, lokalnie zagajska) o głębokości w szczycie zbiornika 900 ó 1000 m; w kierunku południowo wschodnim opada na głębokość 1600 m.

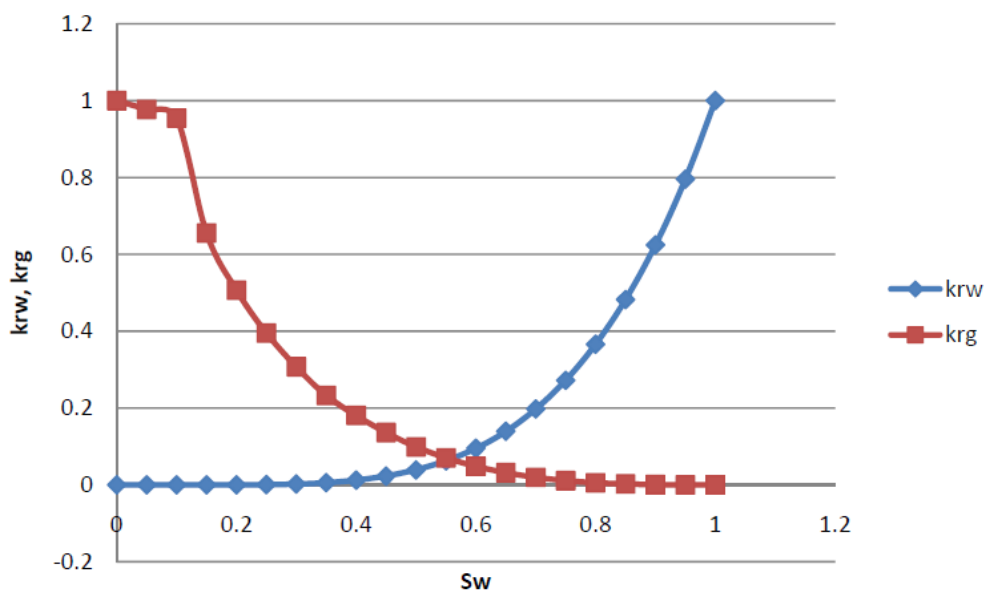
Przyjęto zatęczenie czterema otworami iniekcyjnymi o lokalizacji przedstawionej na Rys. 1.1.16.1-3. Założono, że modelowanie będzie wykonane dwuwariantowo tj. zatęczenie testowe i docelowe.

Zatęczenie testowe dokonano jednym otworem nr 1 (SW), w ilości 20 000 ton przez rok. Natomiast docelowe odbywa się będzie czterema otworami po 450 000 ton CO<sub>2</sub>/rok przez okres 25 lat, czas symulacji do 200 lat po zakończeniu zatęczenia.

Przyjęto, że presje ciśnienia dynamicznego do 2MPa tzn.  $p=20$  bar w odniesieniu do ciśnienia hydrostatycznego.

Uznano należy za najkorzystniejsze warunki magazynowania dla ciśnienia zatęczenia w 8,0 ó 12 MPa co odpowiada średniej głębokości 800 ó 1200 m dla temperatury zewnętrznej mieszczącej się w przedziale 35-50 °C, porowatości 25 ó 35% i przepuszczalności minimum 200 mDarcy, przy miąższości około 80 m. W związku z powyższym optymalne lokalizacje magazynów powinny występować do głębokości 1200 m. W przypadku niniejszego modelu nie przyjęto tak korzystnych warunków ó jak wcześniej wspomniano porowatość przyjęto dla warstw zbiornikowych na 25%, natomiast izolacji na 8%, podobnie co do przepuszczalności przyjęto 1E-13m (100 mD) dla zbiornika, a dla warstwy izolacyjnej 1E-15 m.

Ważną cechą modelu przepuszczalności względnych  $k_{rg}$  i  $k_{rw}$  określono dla piaskowców dolnojurajskich (Rys. 1.1.16.22).



Rys. 1.1.16.22 Zależność przepuszczalności względnych od nasycenia wód wykorzystana w modelu.

Przyjęto ciśnienie zewnętrzne na poziomie 1000 m ppm równe ciśnieniu hydrostatycznemu. Z uwagi na ograniczenia numeryczne przyjęto temperaturę 40°C jako temperaturę minimalną w warstwie zbiornika. Założono na podstawie modeli dynamicznych o zasięgu regionalnym występuje minimalny przepływ wód dolnojurajskich na proces zatęczenia i dla omawianego wariantu modelowego nie wprowadzono istotnego ruchu wód przyjmując 0 m/rok.

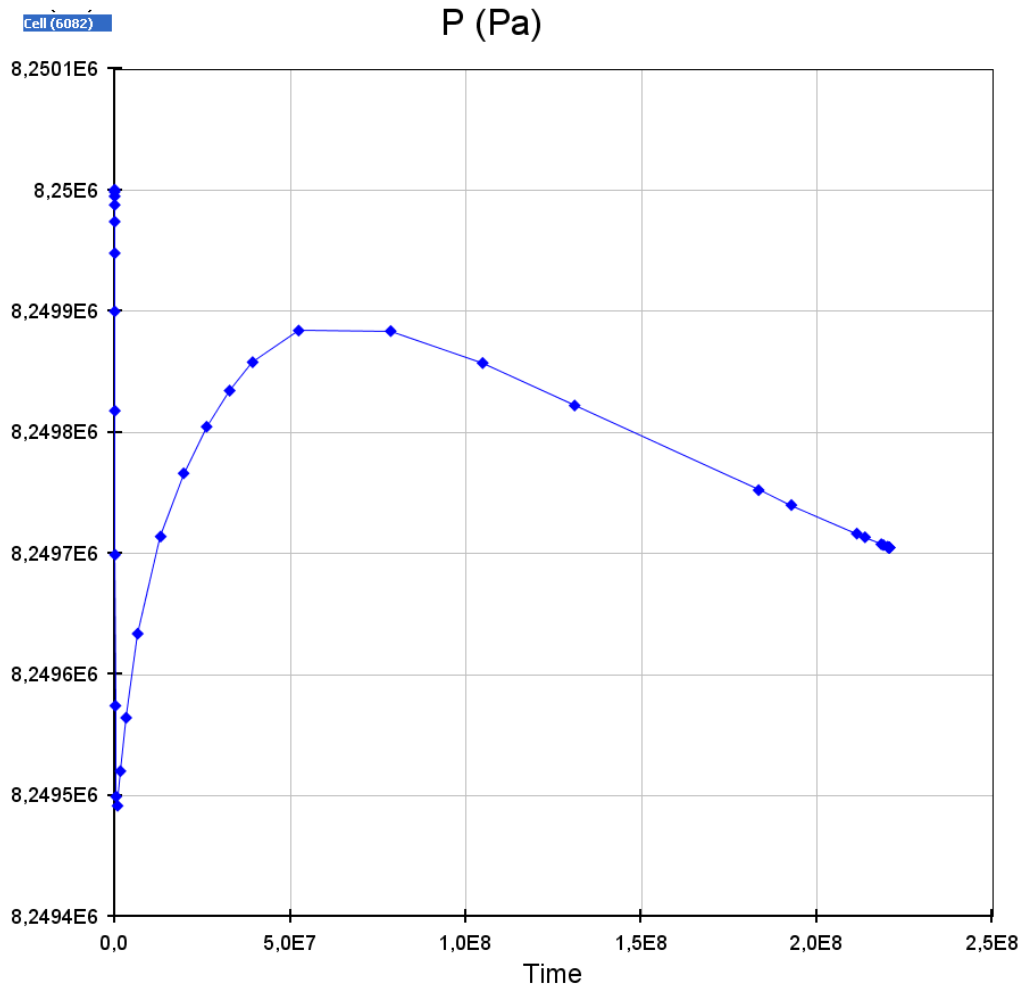


## Wyniki symulacji

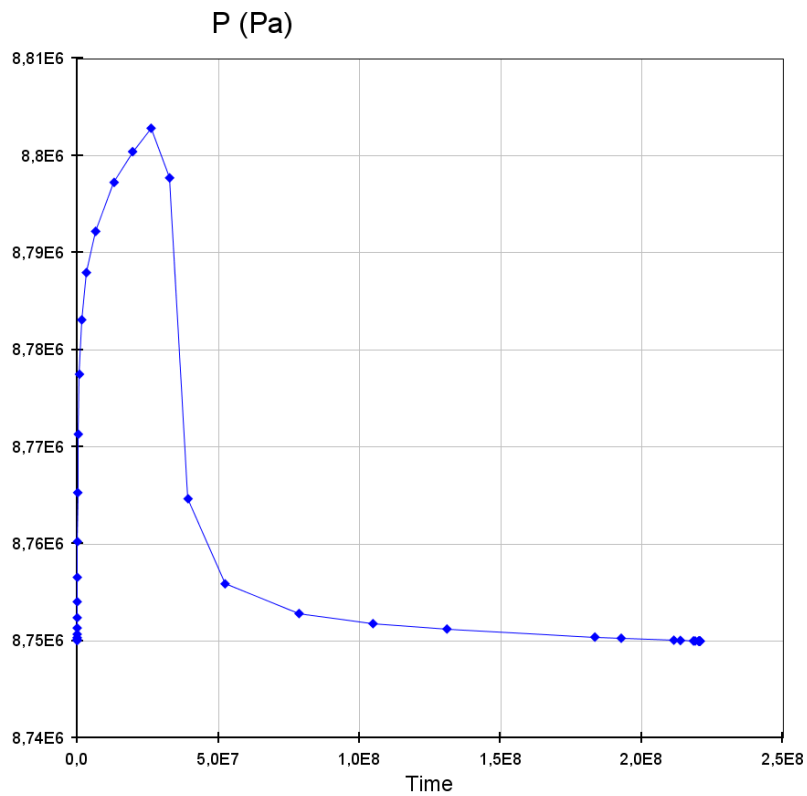
Przeprowadzono dwa warianty symulacji. Dla zatłoczenia jednym otworem iniekcyjnym (well01) w ilości 20 000 ton CO<sub>2</sub> przez jeden rok wyniki symulacji przedstawiaj Rys. 1.1.16.23-27.

Drugi wariant obejmuje zatłoczenie 4 otworami (well01, well2, well3, well4) w ilości 450 000 ton/rok dla każdego otworu przez okres 25 lat wyniki przedstawiaj Rys. 1.1.16.28-37.

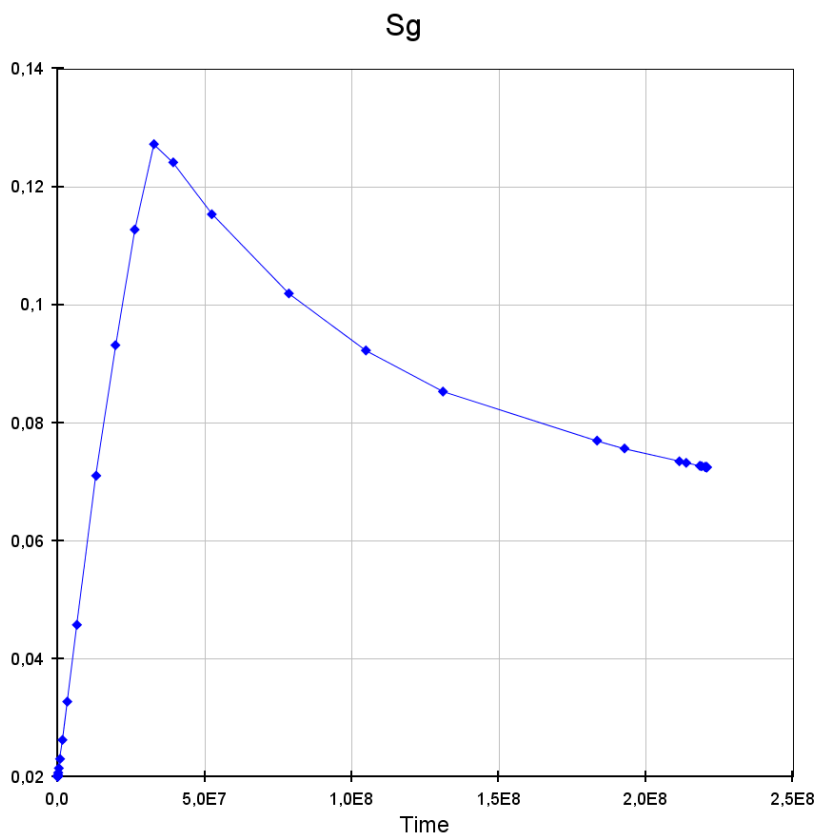
### WARIANT I



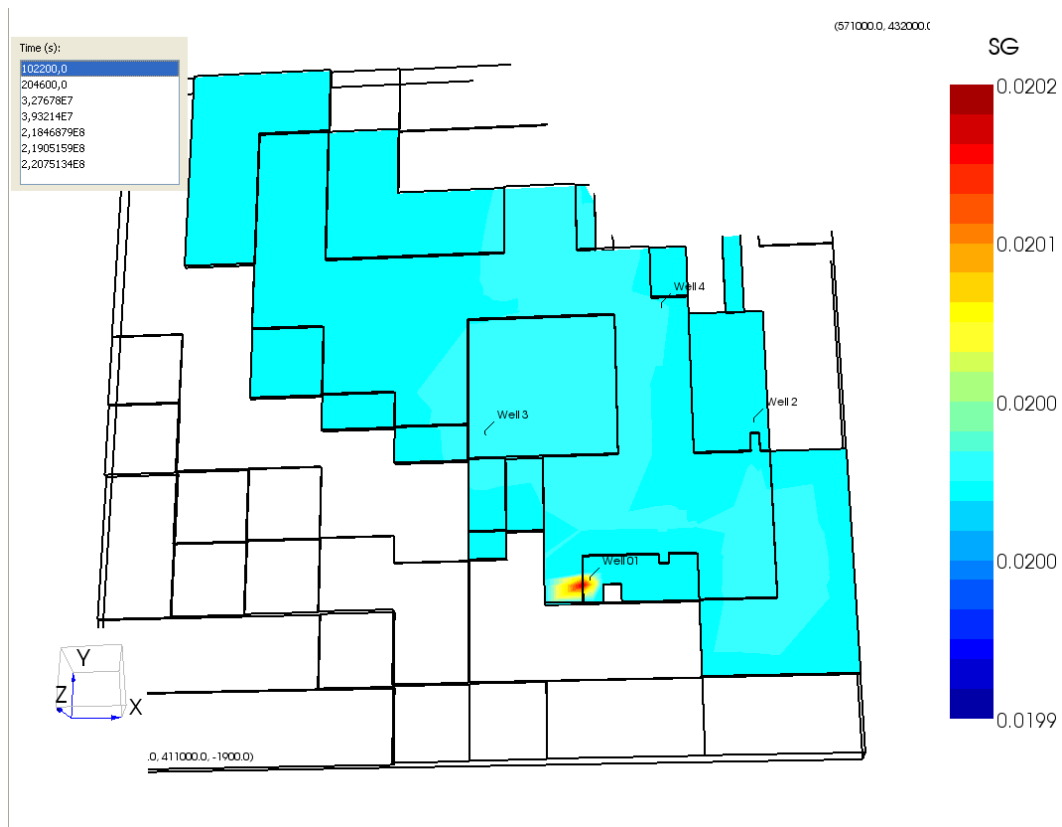
Rys. 1.1.16.23 Przebieg zmian ciśnienia dennego w otworze iniekcyjnym (Well01).



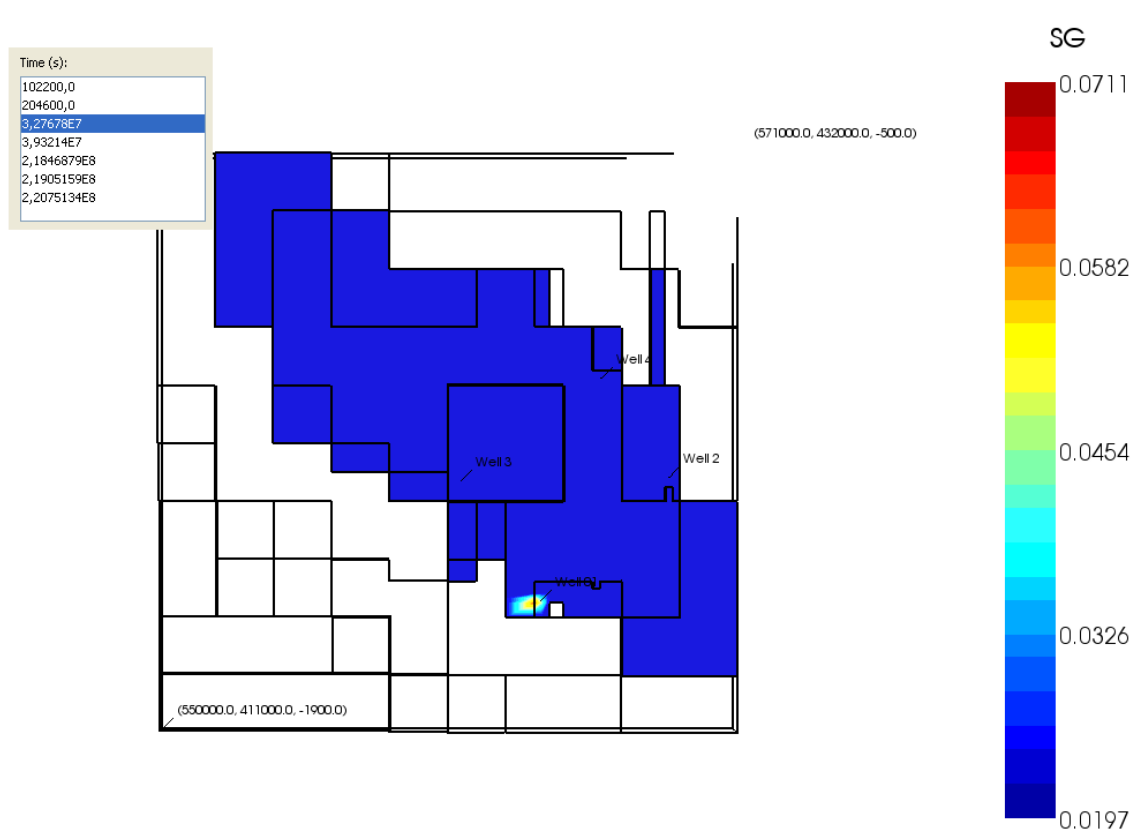
Rys. 1.1.1.6.24 Przebieg zmian ciśnienia dennego w komórce oddalonej o 100m od otworu iniecyjnego (Well01)



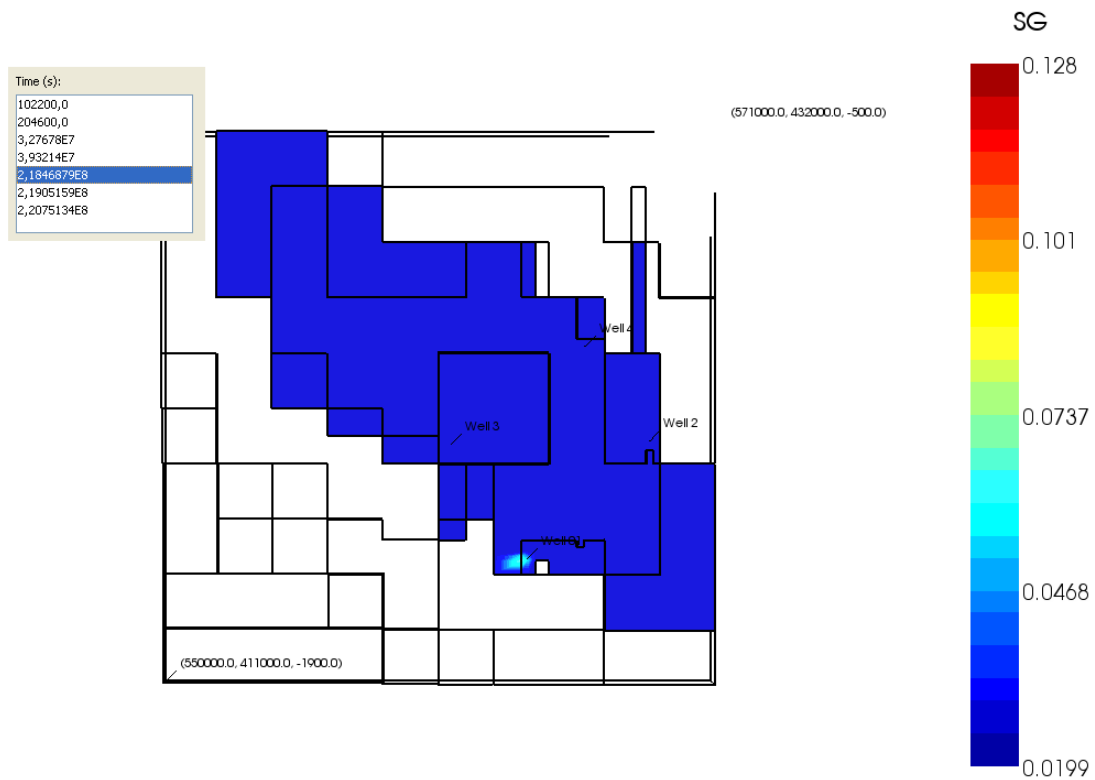
Rys. 1.1.16.25 Przebieg zmian nasycenia CO2 w miejscu iniekcji w czasie 20 lat



Rys.1.1.1.6.26 Nasylenie gazem warstwie na gŁboko ci 800m po kilku godzinach iniekcji CO<sub>2</sub>.

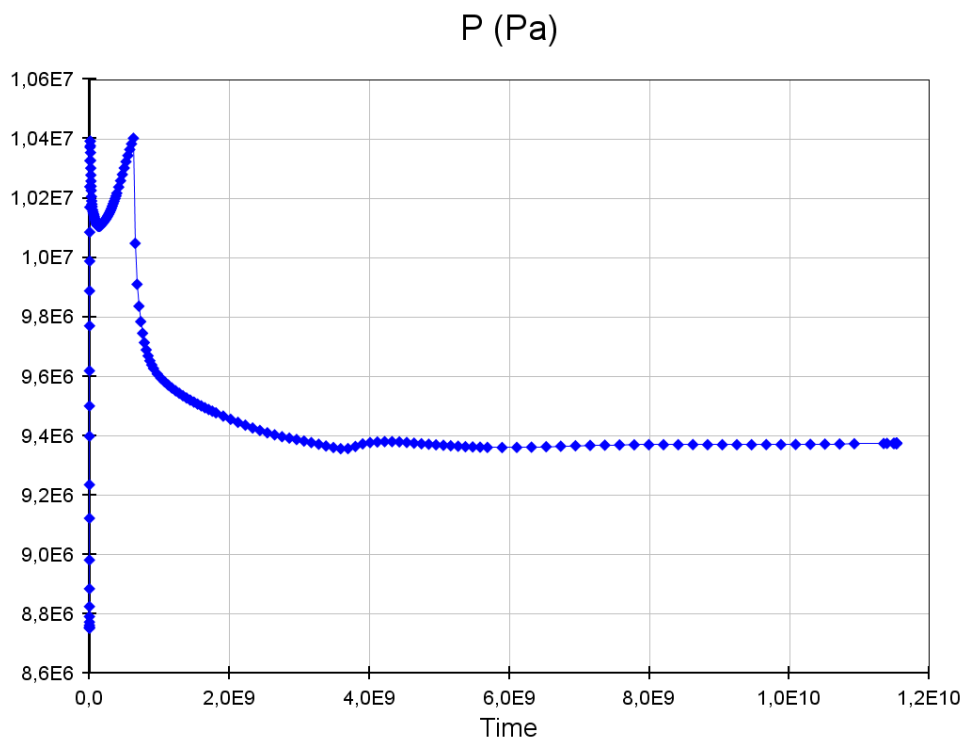


Rys.1.1.1.6.26 Nasylenie gazem warstwie na gŁboko ci 800m po roku iniekcji CO<sub>2</sub>.

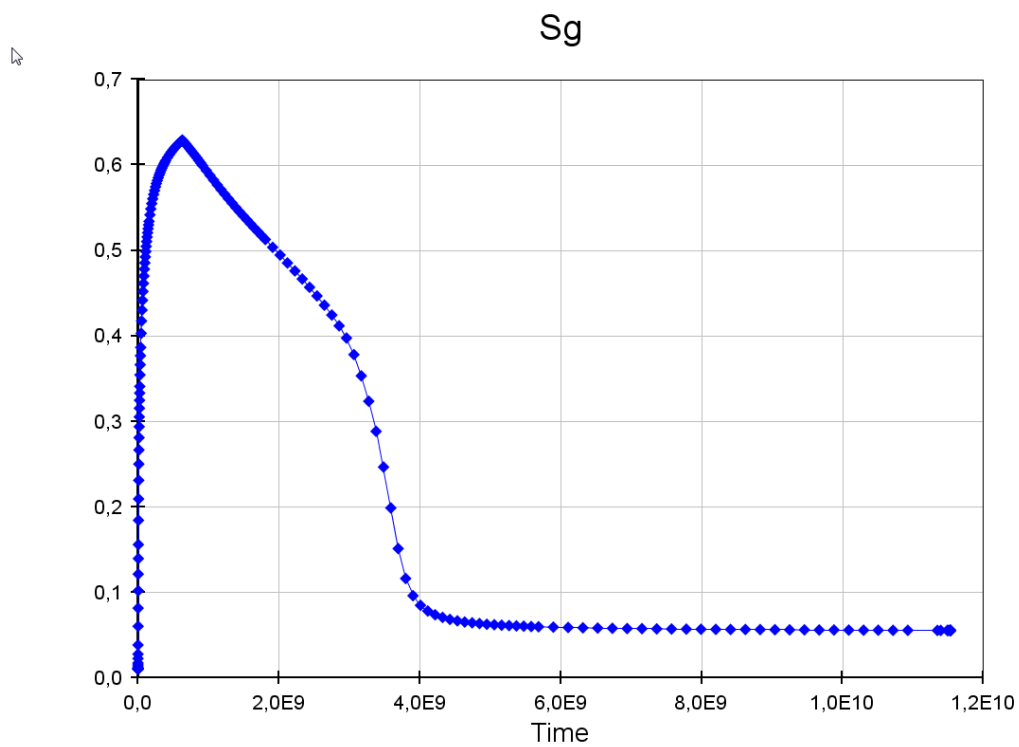


Rys.1.1.1.6.27 Nasycenie gazem warstwie na g€boko ci 800m po 10 latach iniekcji CO2.

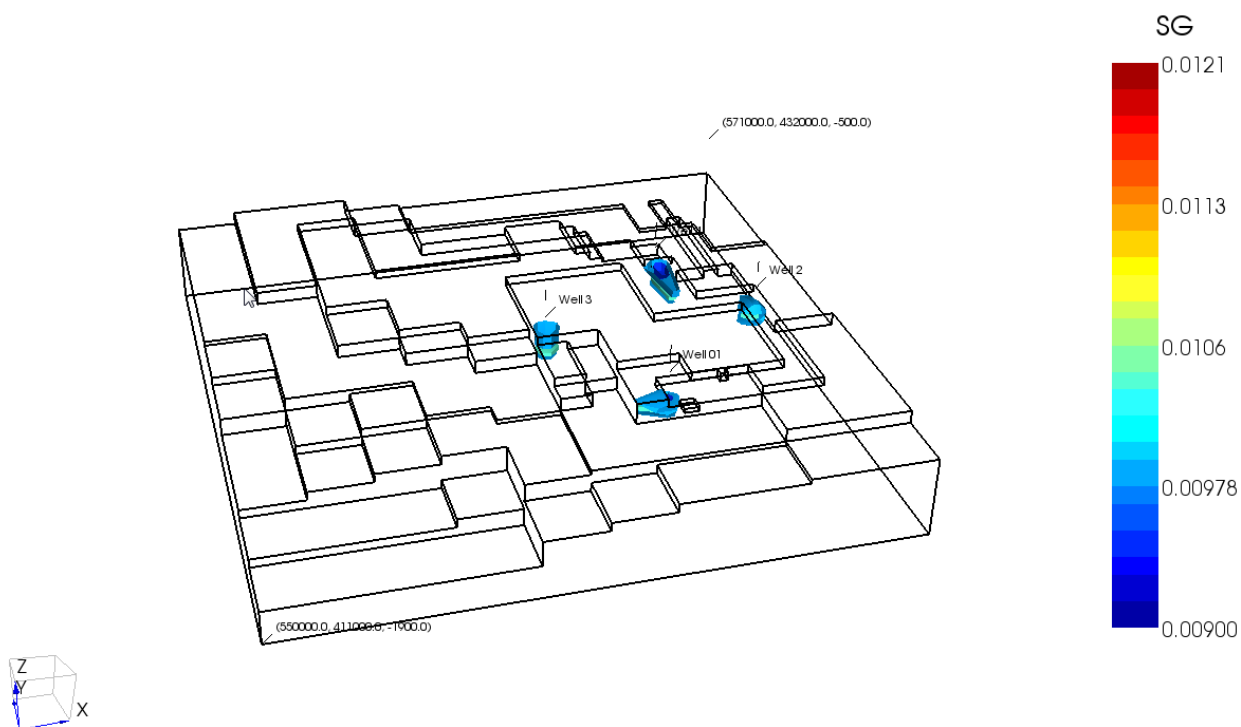
**WARIANT II**



Rys. 1.1.1.6.28 Przebieg zmian ci nienia dennego w otworze iniekcyjnym nr 2.

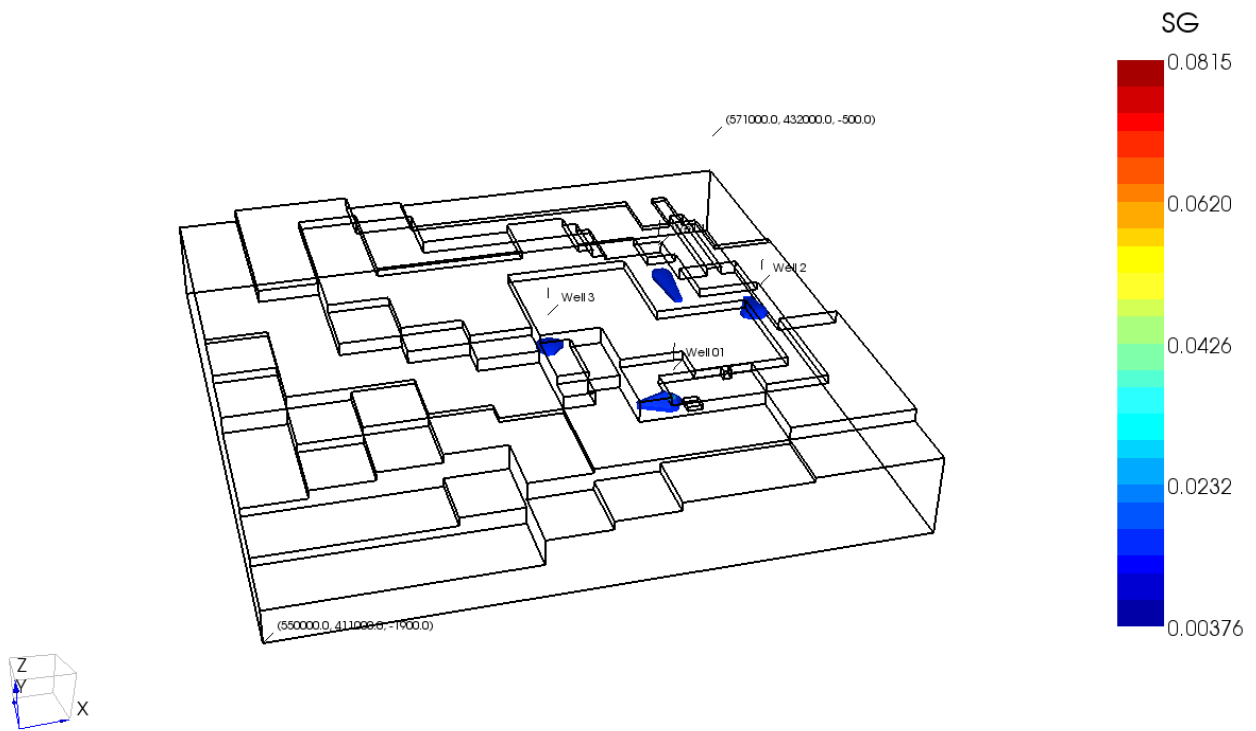


Rys. 1.1.1.6.29 Przebieg zmian nasycenia CO2 w miejscu iniekcji (otw nr 2)

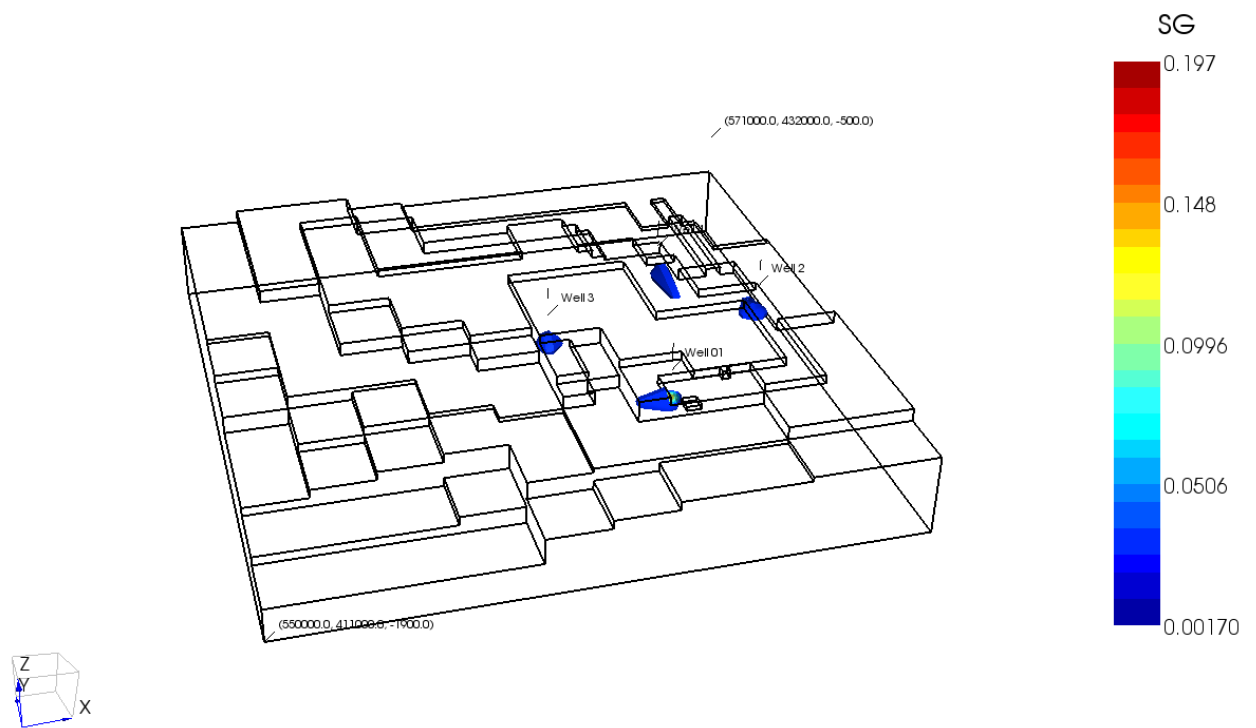


Rys. 1.1.1.6.30 Rozkład nasycenia gazem w modelu po kilku godzinach iniekcji.

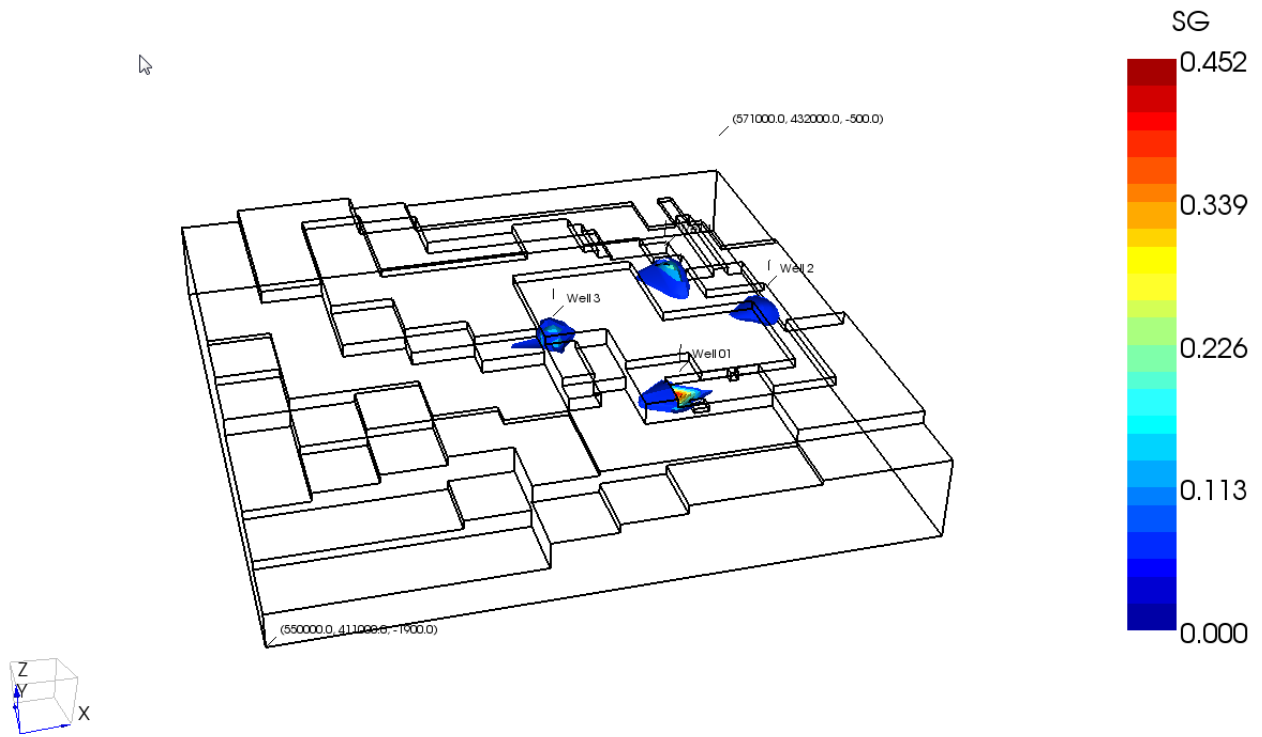




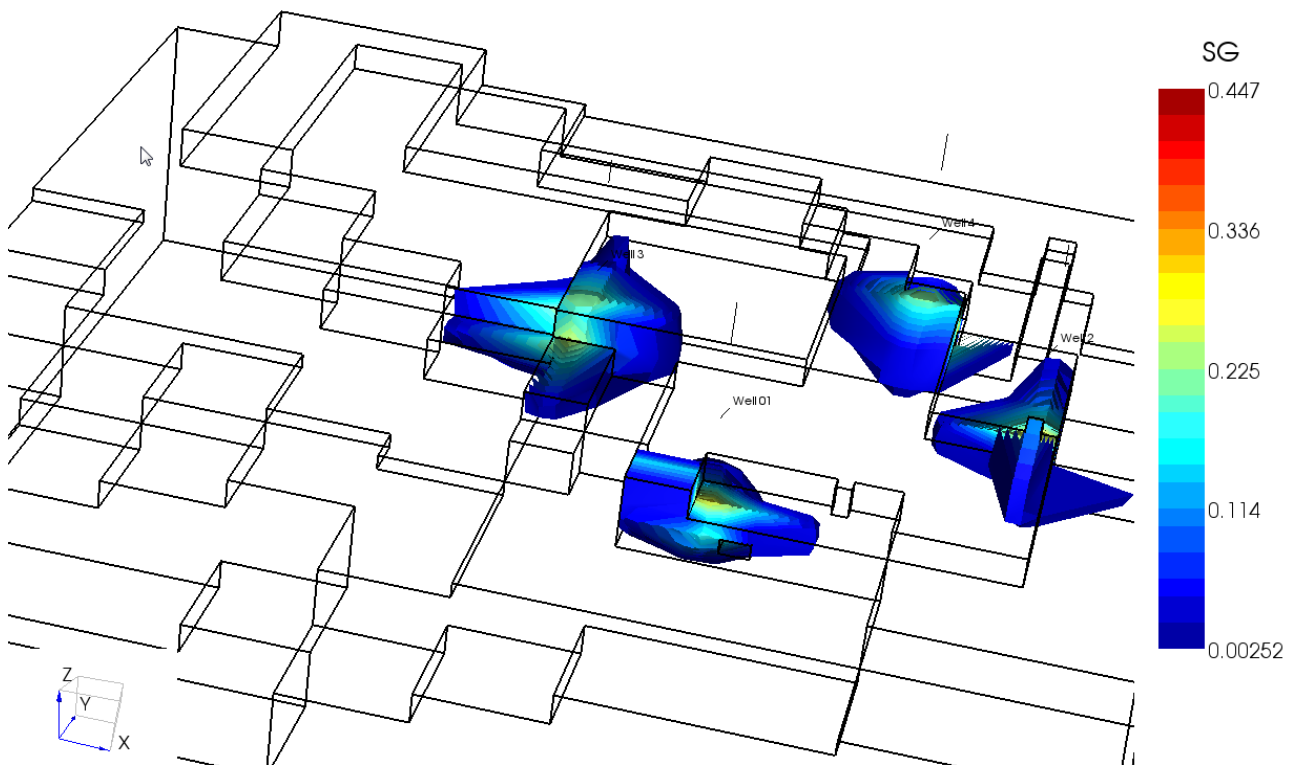
Rys. 1.1.1.6.31 Rozkład nasycenia gazem w modelu po 60 dniach.



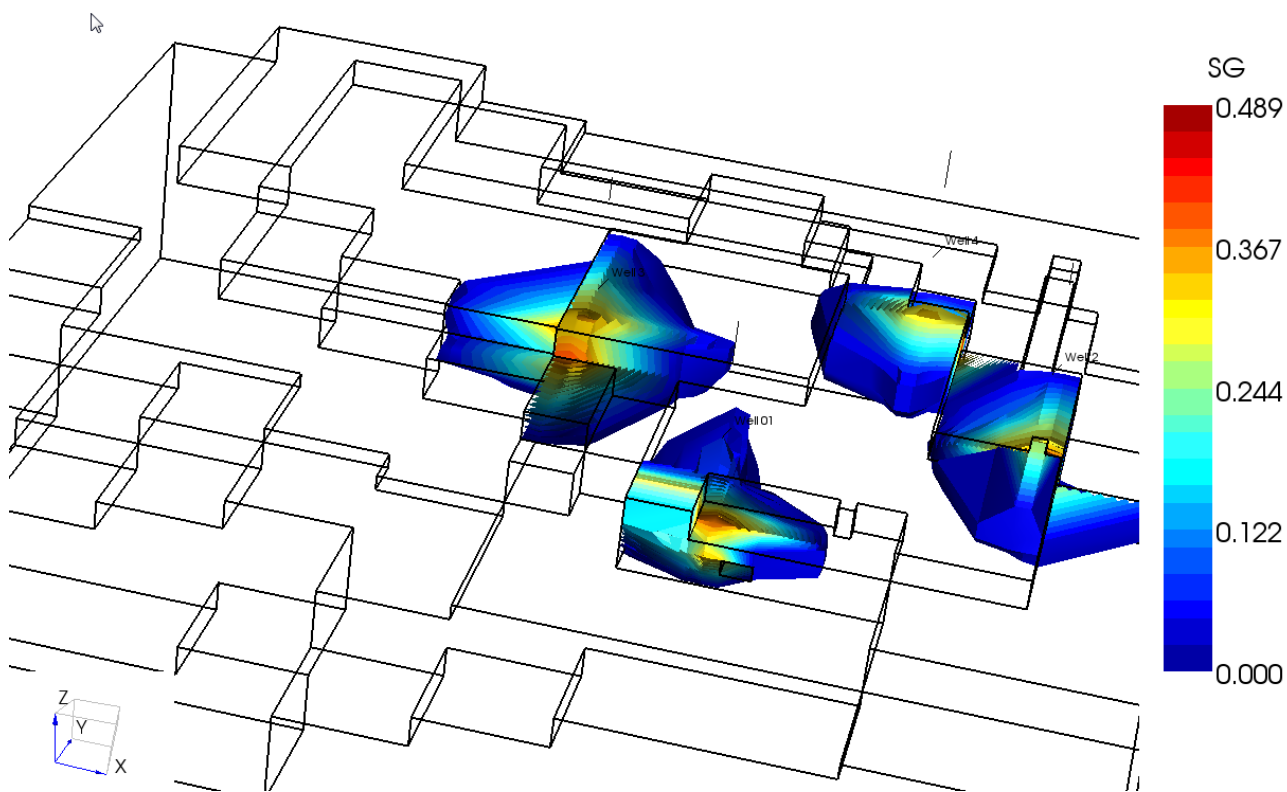
Rys. 1.1.1.6.32 Rozkład nasycenia gazem w modelu po 1 roku.



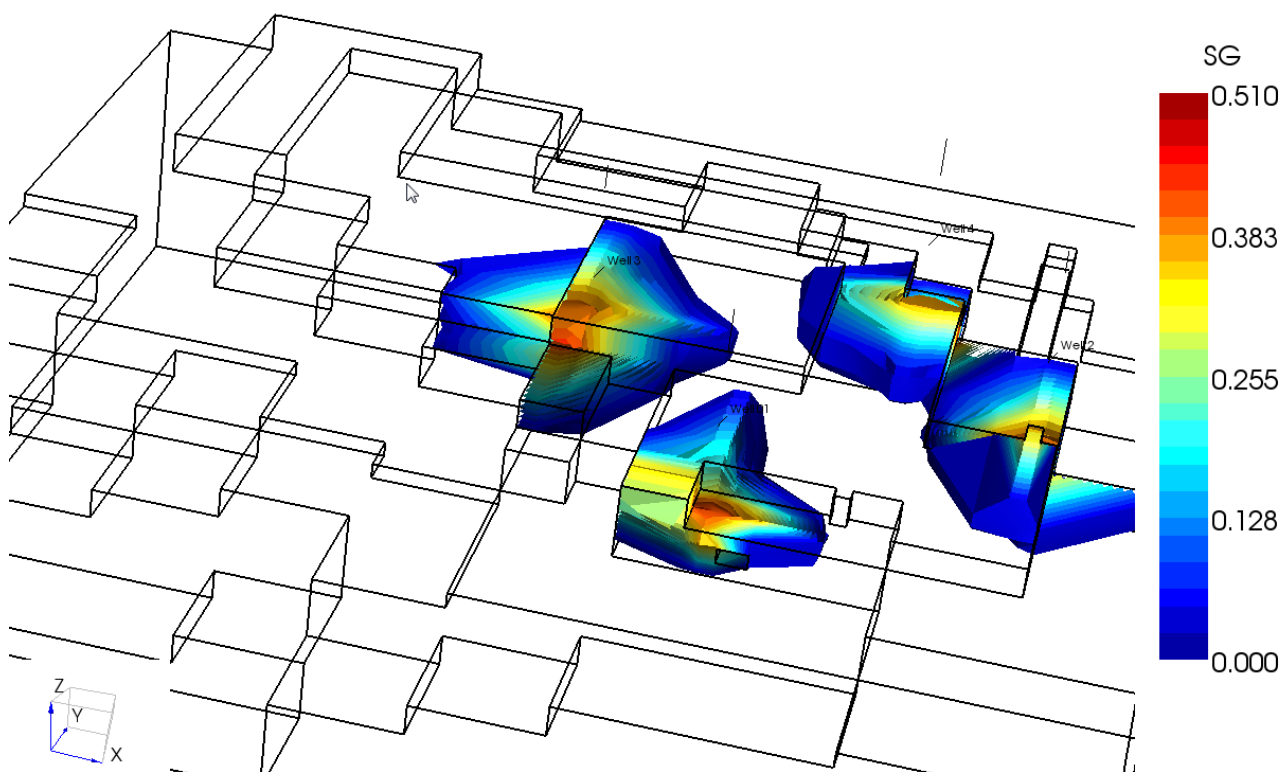
Rys. 1.1.1.6.33 Rozkład nasycenia gazem w modelu po 5 latach.



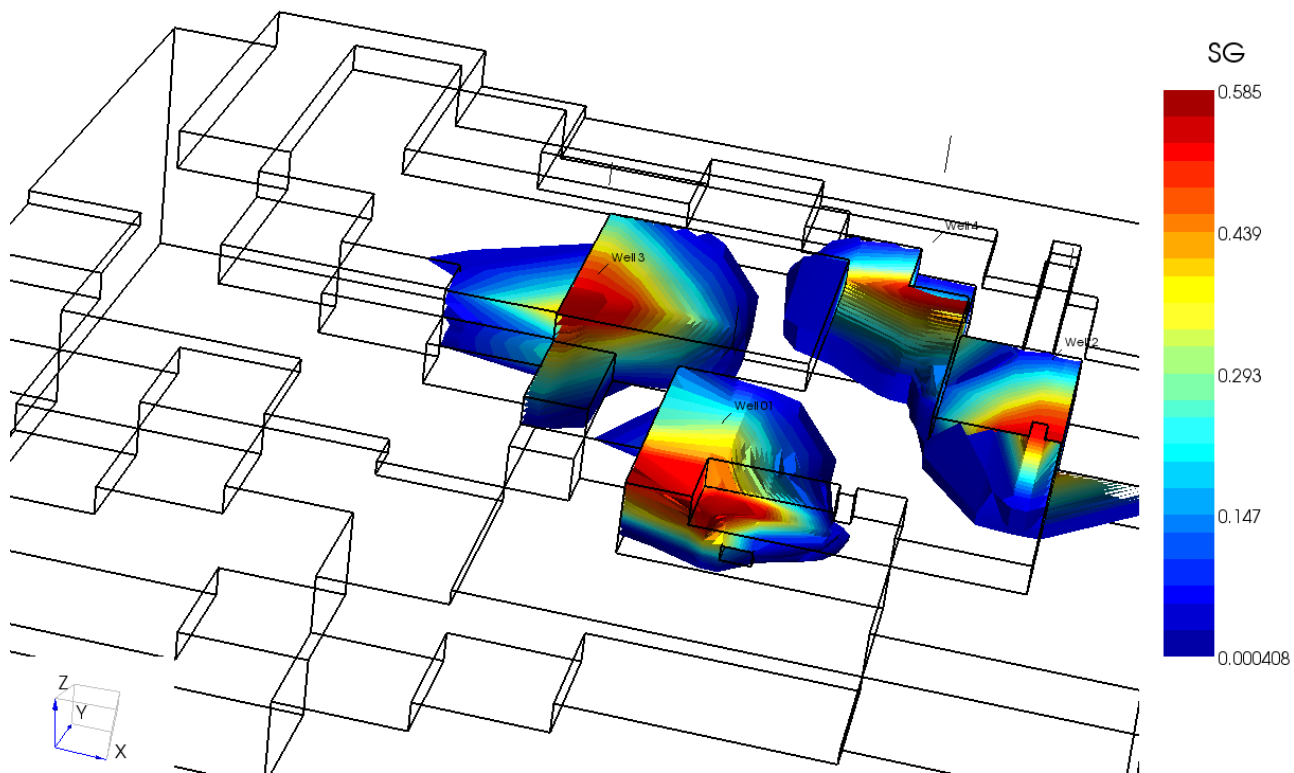
Rys. 1.1.1.6.34 Rozkład nasycenia gazem w modelu po 10 latach.



Rys. 1.1.1.6.35 Rozkład nasycenia gazem w modelu po 20 latach.



Rys. 1.1.1.6.36 Rozkład nasycenia gazem w modelu po 50 latach.



Rys. 1.1.1.6.37 Rozkład nasycenia gazem w modelu po 100 latach.

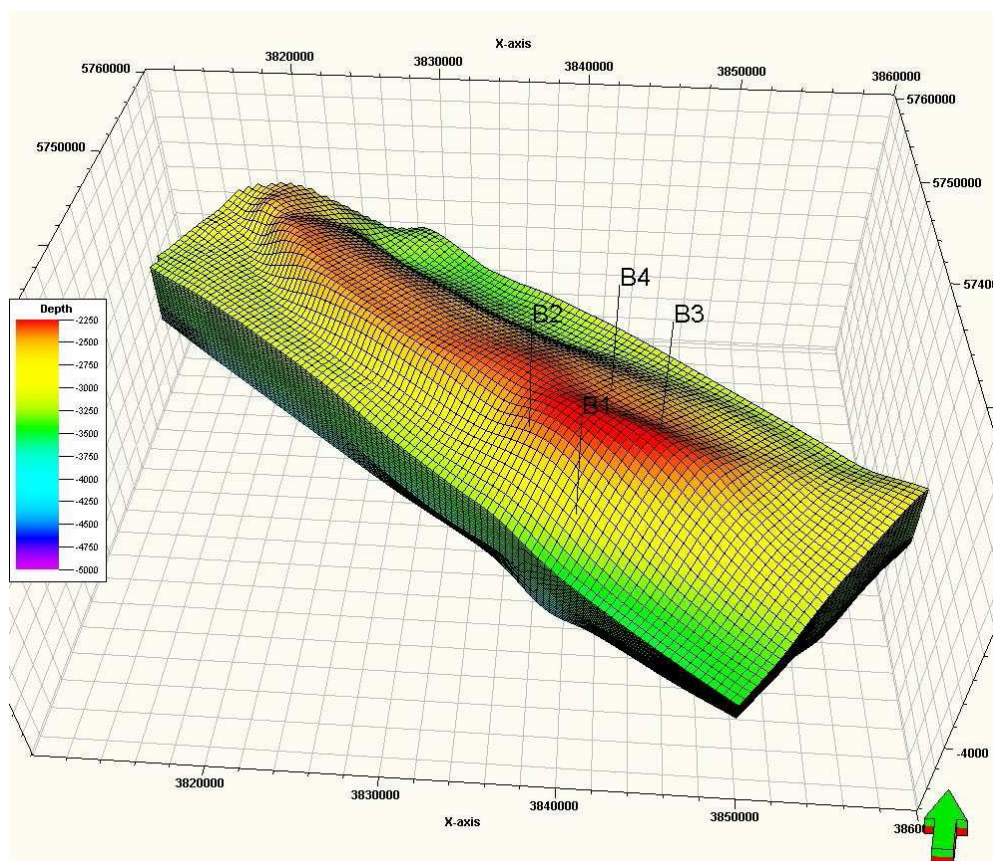
## Modelowania dynamiczne dla formacji triasu dolnego (INiG, Petrel/Eclipse)

W ramach prac INiG dokonano implementacji statycznego (geologicznego) modelu struktury i konstrukcji petroskalowego, trójwymiarowego modelu złowego struktury Budziszewice-Zaosie (w utworach triasu dolnego) uzupełnionego o elementy (własności transportowe w układzie skał-płyn złowe, termodynamiczne własności płynów złowych i ich wzajemne oddziaływanie) niezbędne do przeprowadzenia wielowariantowych i długoczasowych symulacji procesów sekwestracji dwutlenku węgla w badanej strukturze.

W pracy przedstawiono prognozy procesu sekwestracji wg dwu zadanych scenariuszy zatłczania:

1. wariant testowy: zatłczanie CO<sub>2</sub> pojedynczym odwiertem nr 1 (B-1) w ilości 20 tys. ton/rok przez 1 rok,
2. wariant docelowy: zatłczania 4 odwiertami (B-1, 2, 3, 4) w ilości 450 tys. ton/rok łącznie przez 25 lat.

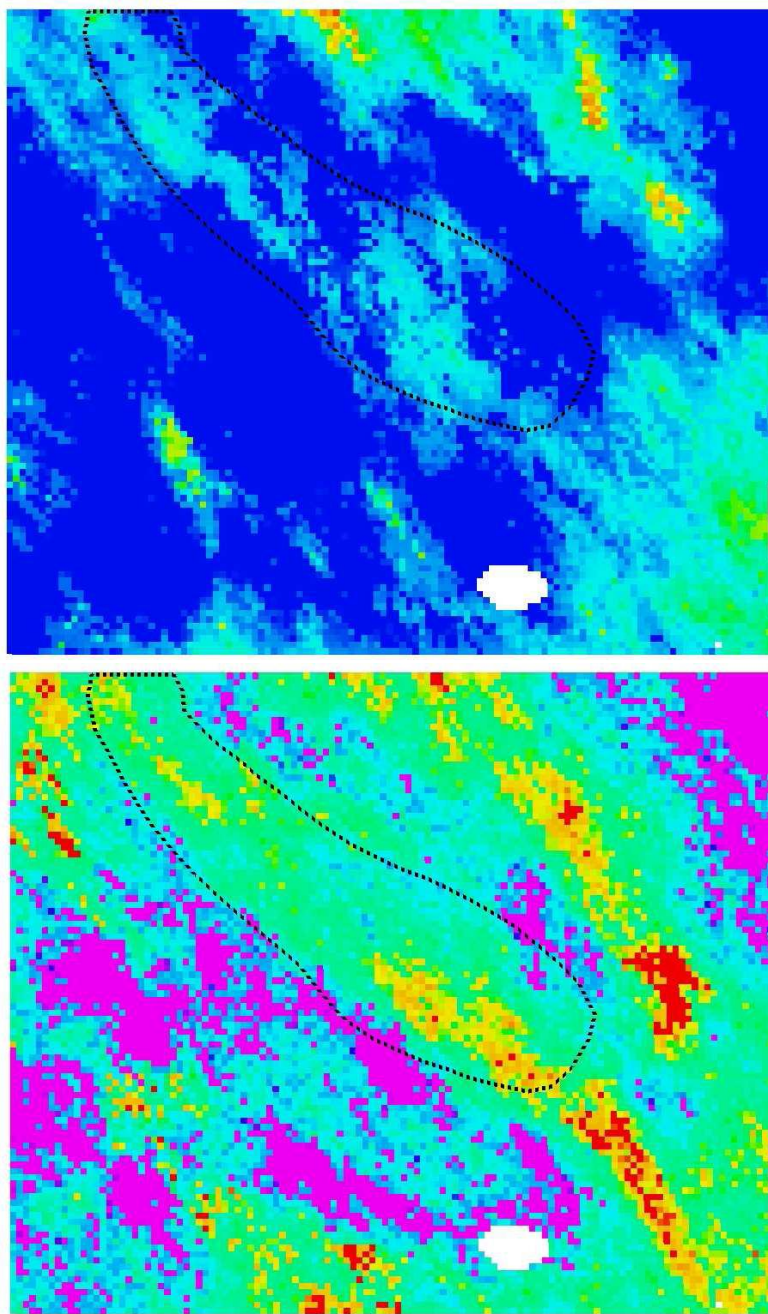
W pracy przedstawiono analizę czułości wyników ze względu na realizację modelu geologicznego (2 realizacje). Zbadano także wpływ stopnia hydrodynamicznej otwartości struktury na przebieg sekwestracji (3 systemy hydrodynamiczne różniące się wielkością akwiferów okalających).



Rys. 1.1.16.38 Widok przestrzenny modelu symulacyjnego z lokalizacją odwiertów.



Do konstrukcji dynamicznego modelu symulacyjnego struktury w warstwach triasu dolnego wykorzystano statyczny model geologiczny struktury skonstruowany w ramach zadania 1.1.15 (Szott i in., 2009). Wyjściowy model symulacyjny składa się z 15 warstw obejmujących Tp2 i 10 warstw obejmujących Tp1. Użyto dla niego metody up-scalingu otrzymując 50 warstw modelu geologicznego o miąższościach w przedziale 17-70 m. Jako obszar sekwestracji określono rejon obejmujący zamkniętą izobatę -2550 m ppm analizowanej antykliny. Obszar ten o kształcie prostokąta posiada przybliżone wymiary 50 × 17 km. Model dynamiczny skonstruowano na bazie regularnej siatki 34×103 bloków o wymiarach powierzchniowych 500×500 m. Orientacja siatki odpowiada osiom głównym struktury w kierunku NW-SE i prostopadłym. Przestrzenny widok modelu od południa pokazano na Rys. 1.1.16.38.



Rys. 1.1.16.39 Rozkłady średniej porowatości i przepuszczalności dla Tp2, Realizacja I.



Dla celów dynamicznych symulacji wybrano po dwie realizacje dla każdego parametru zbiornikowego (porowatość,  $\phi$ , lub objętość porów, PV, przepuszczalność,  $k$ , stosunek miąższości efektywnej do całkowitej, NTG). Kryterium wyboru odnosi się do średnich wartości tych parametrów na obszarze modelowanej struktury (podczas gdy wygenerowane rozkłady obejmowały znacznie większy obszar modelu regionalnego).

Uzyskane w ten sposób warianty geologiczne oznaczono jako:

1. Realizacja I ó z największymi średnimi wartościami parametrów w modelowym obszarze,
2. Realizacja II ó z minimalnymi wartościami średnimi.

Odpowiadać one następującymi średnimi wartościami (w Tp2):

PV = 154 vs 132 tys. m<sup>3</sup>

$k$  = 17.84 vs 17.28 mD

NTG = 0.305 vs 0.251

Rozkłady podstawowych parametrów geofizycznych ( $\phi$ ,  $k$ , NTG) przedstawiono dla 2 powyższych wariantów w postaci mapy dla każdego parametru i każdego z dwu horyzontów (Tp2 i Tp1): mapy te przedstawiają każdy parametr uśredniony w danym horyzoncie.

Ponieważ struktura Budziszewice-Zaosie (w dolnym triasie) nie wykazuje ograniczenia powierzchniowego dlatego warstwy wodonośne okalające obszar struktury objęty modelem numerycznym symulowano przy pomocy półanalitycznych modeli akiferów (o wymiarach 3 i 10-krotnie przewyższających wymiary obszaru modelowanego numerycznie oraz nieskończonego akifera okalającego; za Carter & Tracy, 1960). Jako szczególne własności ( $\phi$ ,  $k$ ,  $h$ ) powyższych akiferów przyjęto wielkości średnie z obszaru modelowanego numerycznie. Jako warunki początkowe panujące w strukturze przyjęto: ciśnienie: 231 barów na głębokość odniesienia -2185 m ppm, temperaturę (stała): 100°C.

## **Właściwości i modele płynów złożowych**

Do symulacji procesów sekwestracji CO<sub>2</sub> w strukturze Budziszewice użyto kompozycyjnej wersji symulatora Eclipse z opcją CO<sub>2</sub>SOL uwzględniając rozpuszczalność CO<sub>2</sub> w wodzie.

W opcji tej własności termodynamiczne i transportowe CO<sub>2</sub> są wyznaczone z równania stanu. Na podstawie wcześniejszych doświadczeń jako optymalne zastosowano 3-parametrowe równanie stanu Penga-Robinsona z poprawką Peneloux. Do określenia lepkości CO<sub>2</sub> użyto korelacji Lorentza-Braya-Clarka (1964) ze standardowymi parametrami.

Właściwości termodynamiczne i transportowe wody złożowej (solanki) z poziomów triasu dolnego w strukturze Budziszewice wyznaczono z pomiarów przeprowadzonych na próbkach pobranych z odwiertu Budziszewice IG1 (Warnecki i in., 2009) oraz przy wykorzystaniu ogólnie przyjętych korelacji.

Wyznaczono i/lub zaimportowano następujące wielkości: gęstość solanki martwej,  $\rho_w$ , mineralizacja solanki,  $S_w$ , ciśnienie,  $C_w$ , rozpuszczalność CO<sub>2</sub> w solance,  $R_{CO_2}$ , lepkość solanki  $\mu_w$ .

Gęstość solanki martwej - przyjęto wg pomiarów  $\rho_w = 1071.6 \text{ kg/m}^3$ .

Mineralizacja solanki - przyjęto wg pomiarów  $S_w = 104.9 \text{ g/dm}^3$

Współczynnik objętościowy; użyto zależności współczynnika objętościowego  $B_w$  od ciśnienia, temperatury i zasolenia wg J. W. Amyxa et al. (1960). Uwzględniono wyniki pomiarów poprzez multiplikatywny czynnik korekcyjny.

ciężkość izotermiczna solanki,  $c_w$ .

Rozpuszczalność  $\text{CO}_2$  w solance - użyto ogólnie przyjętych korelacji [7] dla rozpuszczalności  $\text{CO}_2$  w solance,  $R_{\text{SCO}_2}$  w zależności od temperatury,  $T$ , ciśnienia,  $p$  i zasolenia,  $S_w$ . Uwzględniono wyniki pomiarów (Warnecki i in., 2009) dla rozpuszczalności  $\text{CO}_2$  w solance dla struktury Budziszewice poprzez czynnik korekcyjny wprowadzony do powyższych zależności.

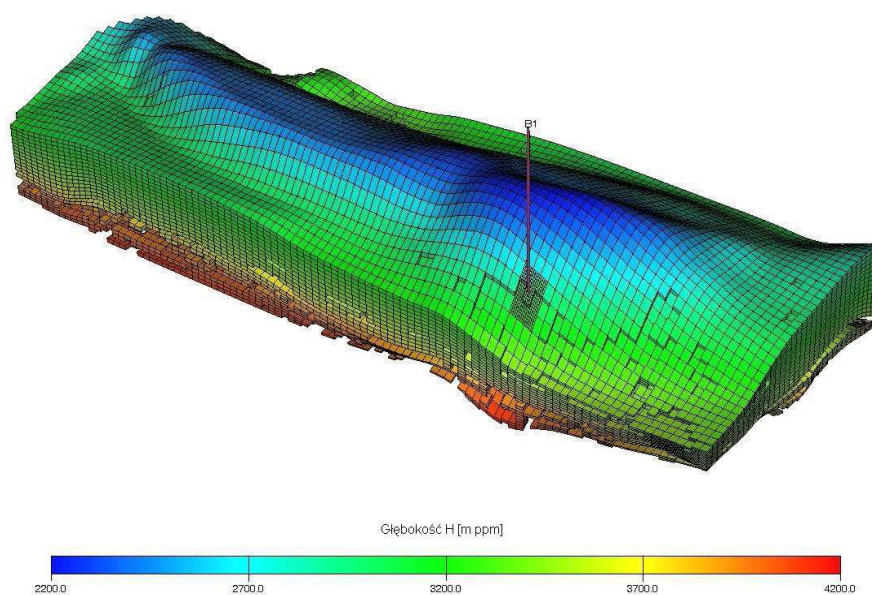
Lepkość solanki,  $\mu_w$ , jako funkcję temperatury,  $T$ , ciśnienia,  $p$ , i zasolenia,  $S_w$  wyznaczono przy pomocy następujących korelacji: zależność od  $T$  i  $S$  wg I. Ershaghi et al. (1983); zależność od  $p$  wg D. Numbere et al. (1977). Pominięto zależność  $\mu_w$  od zawartości rozpuszczonego  $\text{CO}_2$  zgodnie z Seyegh & Najman (1987).

### Założenia eksploatacyjne procesu sekwestracji

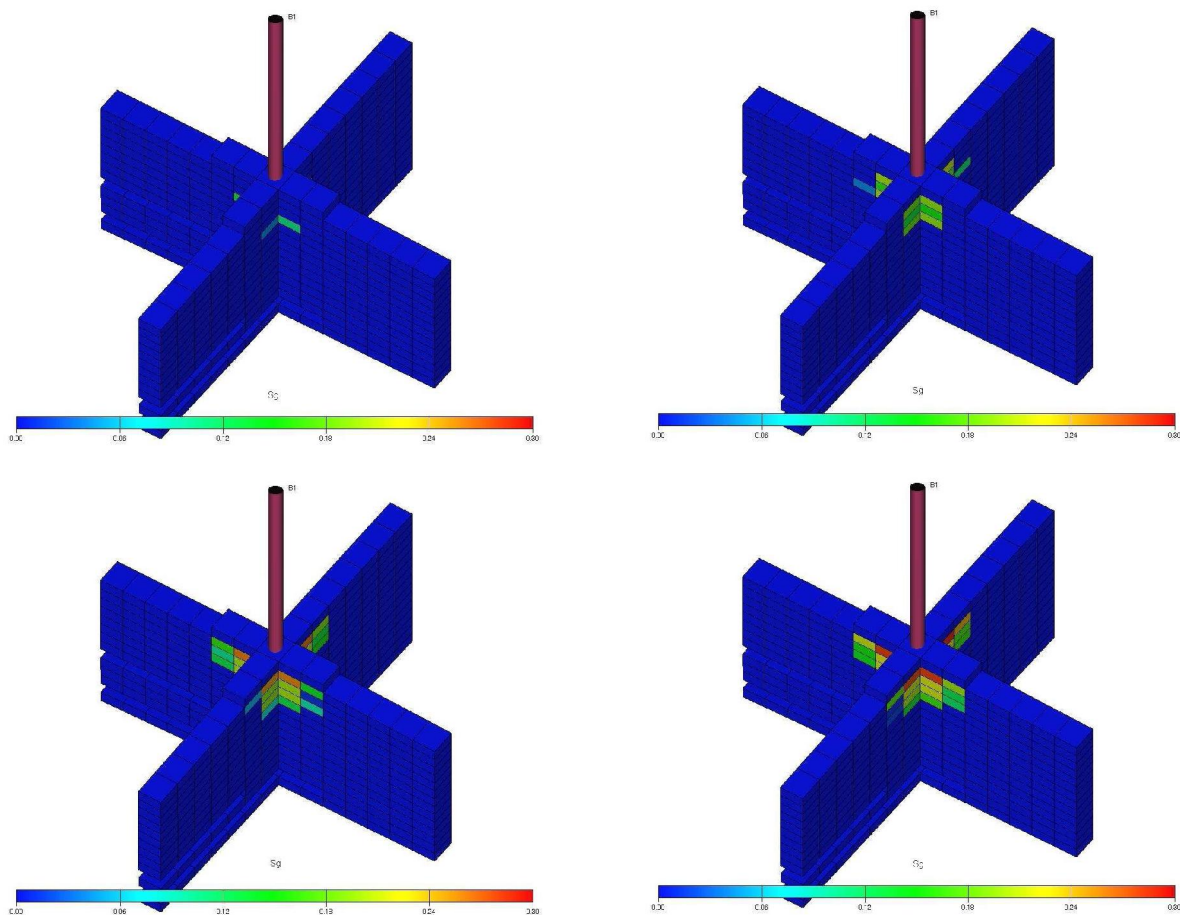
Przyjęto dwa scenariusze zatłaczania  $\text{CO}_2$  do struktury Budziszewice-Zaosie (poziom: trias dolny):

1. testowy: zatłaczanie do odwiertu nr 1 (oznaczonego dalej jako B-1) z wydajnością 20 tys. ton/rok w okresie 1 roku;
2. docelowy: zatłaczanie 4 odwiertami (oznaczonymi: B-1, B-2, B-3 i B-4) łącznie z wydajnością 450 tys. ton/rok w okresie 25 lat.

Odwierty, zgodnie z otrzymanymi założeniami, są typu pionowego. Położenie odwiertów pokazano na Rys. 1.1.16.38 na tle przestrzennej struktury modelu symulacyjnego. Wszystkie 4 odwierty udostępniają 15 górnych warstw w utworach średniego piaskowca (Tp2) o wytrzymałościach lepszych niż w warstwach dolnego piaskowca (Tp1). Symulacje procesów migracji prowadzono przez 200/1000 lat po zakończeniu zatłaczania (tzw. okres relaksacji). Dla każdego z powyższych scenariuszy rozpatrzono po dwa warianty o różnicowanej geologii (Realizacja I i II) i po 3 warianty z różnym stopniem otwartości hydrodynamicznej.



Rys. 1.1.16.40 Model struktury z zaznaczonym obszarem odwiertu B-1.



Rys. 1.1.16.41 Rozkład nasyce swobodnego CO<sub>2</sub> na przekrojach wokół otworu B-1 po 3 miesi cach od rozpocz cia zatęczania (lewy, góra), 6 miesi cach (prawy, góra), 9 miesi cach (lewy, dół) i 12 miesi cach (prawy, dół) koniec zatęczania).

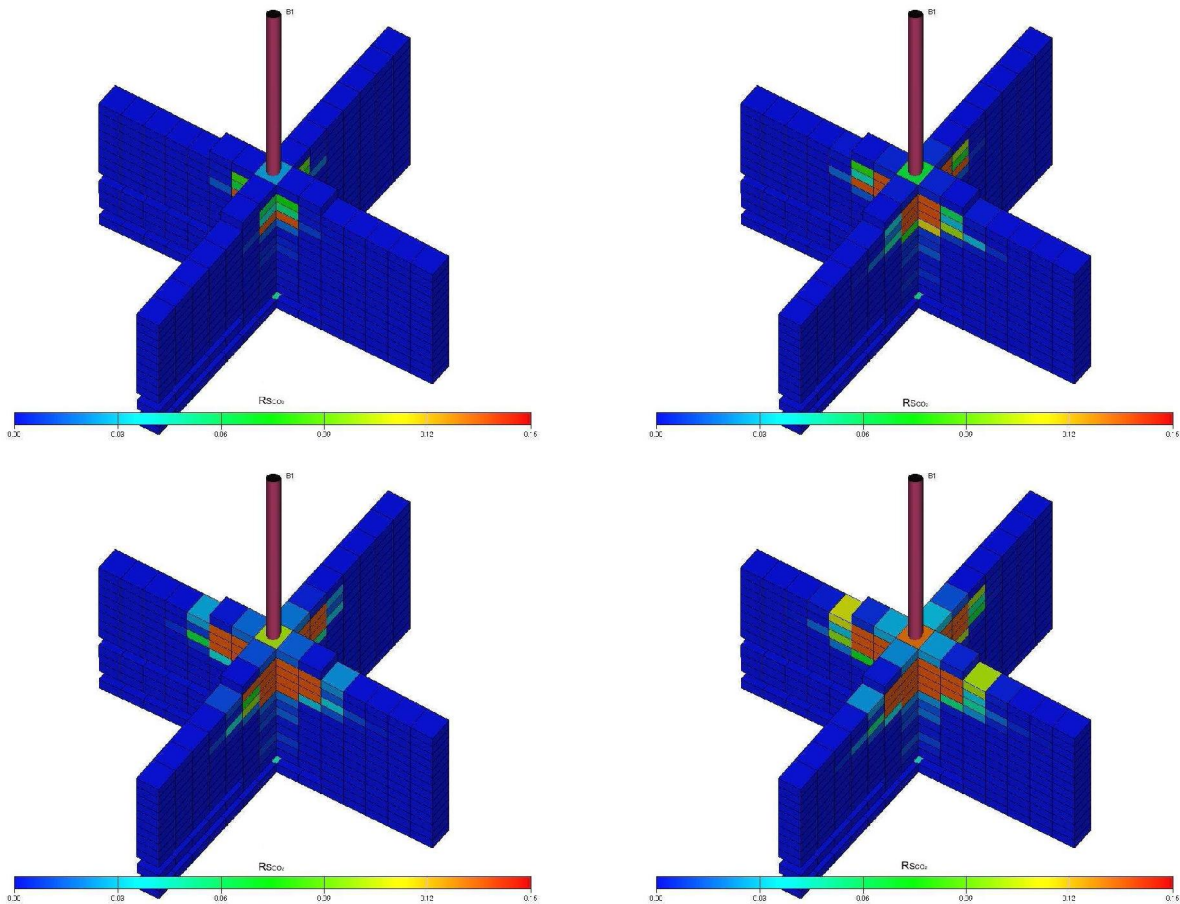
### Symulacje procesu sekwestracji ó wariant testowy

W wariantcie tym utrzymano stać dobowo wydajno zatęczania CO<sub>2</sub>,  $q_{inj} = 27719 \text{ Nm}^3/\text{d}$  odwiertem B-1 odpowiadaj c sumarycznemu zatęczeniu:  $G_{inj} = 10117 \text{ tys. Nm}^3$ . Poni sze wyniki odnosz si do Realizacji I oraz do niesko czonego systemu hydrodynamicznego (akifera) otaczaj cego analizowan struktur .

W wyniku zatęczania CO<sub>2</sub> w strukturze obserwuje si powstanie i ewolucj strefy czystego CO<sub>2</sub> wokół odwiertu. Ze wzgl du na wa ciwo ci poszczególnych warstw w Tp2 oraz dominuj ce znaczenie sićwyporu, CO<sub>2</sub> koncentruje si w górnych warstwach.

Rozkady nasyce CO<sub>2</sub> w 2 wzajemnie prostopadłych przekrojach pionowych przechodz cych przez odwiert B-1 (patrz Rys. 1.1.16.40) pokazano na Rys. 1.1.16.41 po 3, 6, 9 i 12 miesi cach od rozpocz cia zatęczania. Rysunki te obrazuj rozwój strefy wolnego CO<sub>2</sub> w całym okresie zatęczania.

W trakcie zatęczania CO<sub>2</sub> do strefy zachodzi proces jego rozpuszczania si w solance. Obszar intensywnego rozpuszczania pokrywa si z obszarem nasyconym swobodnym CO<sub>2</sub>. Rozkady ilo ci rozpuszczonego CO<sub>2</sub> w postaci ućmka molowego przedstawiono dla podanych powy ej chwil czasowych na Rys. 1.1.16.42.



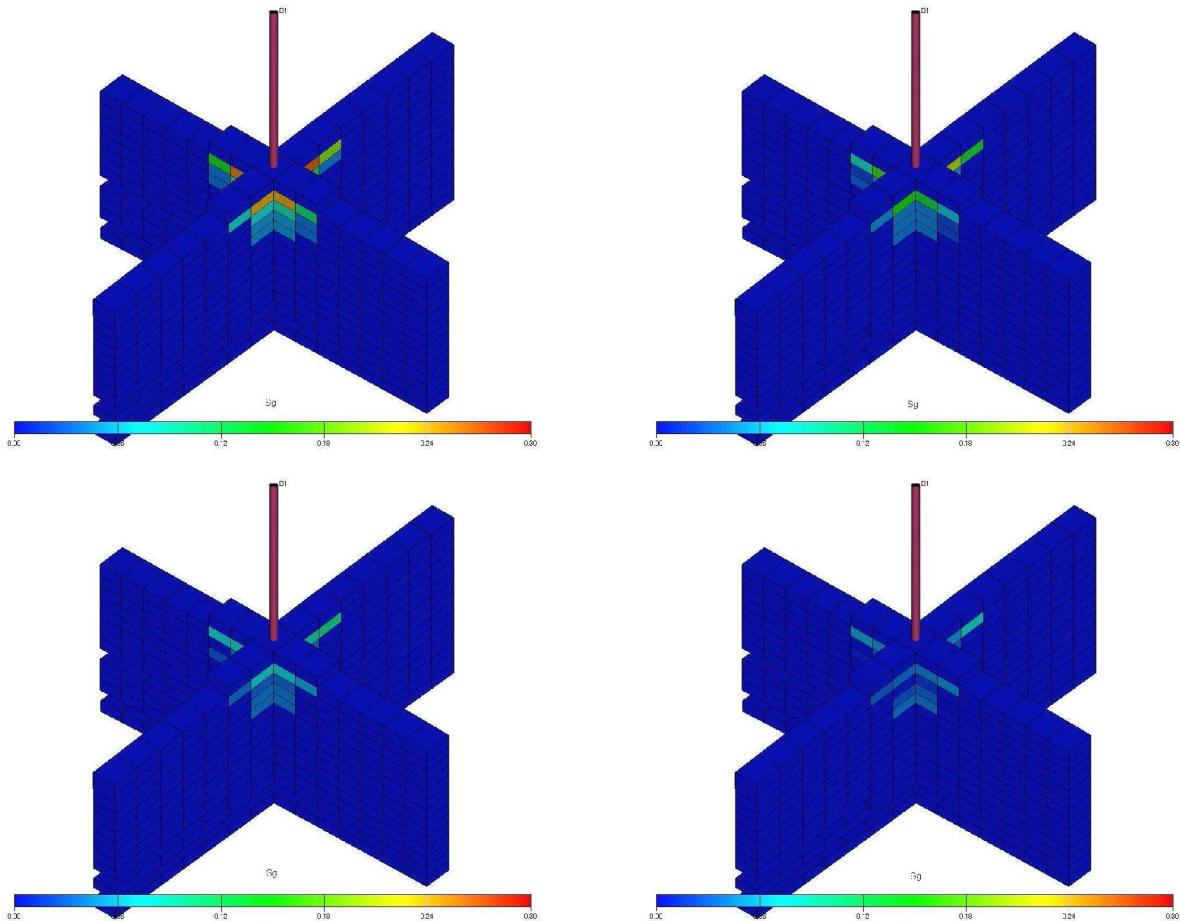
Rys. 1.1.16.42 Rozkład  $\text{CO}_2$  rozpuszczonego w solance ( $R_{\text{SCO}_2}$  - ułamek molowy) na przekrojach wokół otworu B-1 po 3 miesi cach od rozpoczęcia zatłaczania (lewy, góra), 6 miesi cach (prawy, góra), 9 miesi cach (lewy, dół) i 12 miesi cach (prawy, dół) zatłaczania).

Celem zbadania długoczasowych procesów, którym poddany jest  $\text{CO}_2$  zatłaczany do analizowanej struktury w wariancie testowym przeprowadzono symulacje przez kolejne 200 lat po zakończeniu zatłaczania. Pozwoliły one wykazać istotne zmiany w sekwestracji  $\text{CO}_2$  w postaci:

1. dalszego rozpuszczania się  $\text{CO}_2$  w solance a do zupełnego zaniku fazy swobodnej,
2. konwekcji solanki pod wpływem zmian jej gęstości w efekcie rozpuszczania się  $\text{CO}_2$ .

Rozkłady nasyce swobodnego  $\text{CO}_2$ ,  $S_g$ , wraz z upływem czasu po zakończeniu zatłaczania przedstawiono na Rys. 1.1.16.43 dla kolejnych okresów 3-miesięcznych. Obrazują one stopniową redukcję fazy swobodnej na skutek zjawiska rozpuszczania się  $\text{CO}_2$  w solance. W ciągu roku od zakończenia testowego zatłaczania spadek ten jest bardzo znaczny. W dłuższej skali czasowej obserwuje się zjawisko konwekcji i opadania solanki z rozpuszczonym  $\text{CO}_2$ . Odpowiednie rozkłady  $\text{CO}_2$  rozpuszczonego w solance ( $R_{\text{SCO}_2}$  [ułamek molowy]) przedstawiono na Rys. 1.1.16.44 odpowiednio dla 3, 7, 11, 15, 19, 49, 99 i 199 lat po zakończeniu zatłaczania.





Rys. 1.1.16.43 Rozkład nasycenie swobodnego CO<sub>2</sub> na przekrojach wokół otworu B-1 po 3 miesi cach od zakoczzenia zataczania (lewy, góra), 6 miesi cach (prawy, góra), 9 miesi cach (lewy, dół) i 12 miesi cach (prawy, dół).

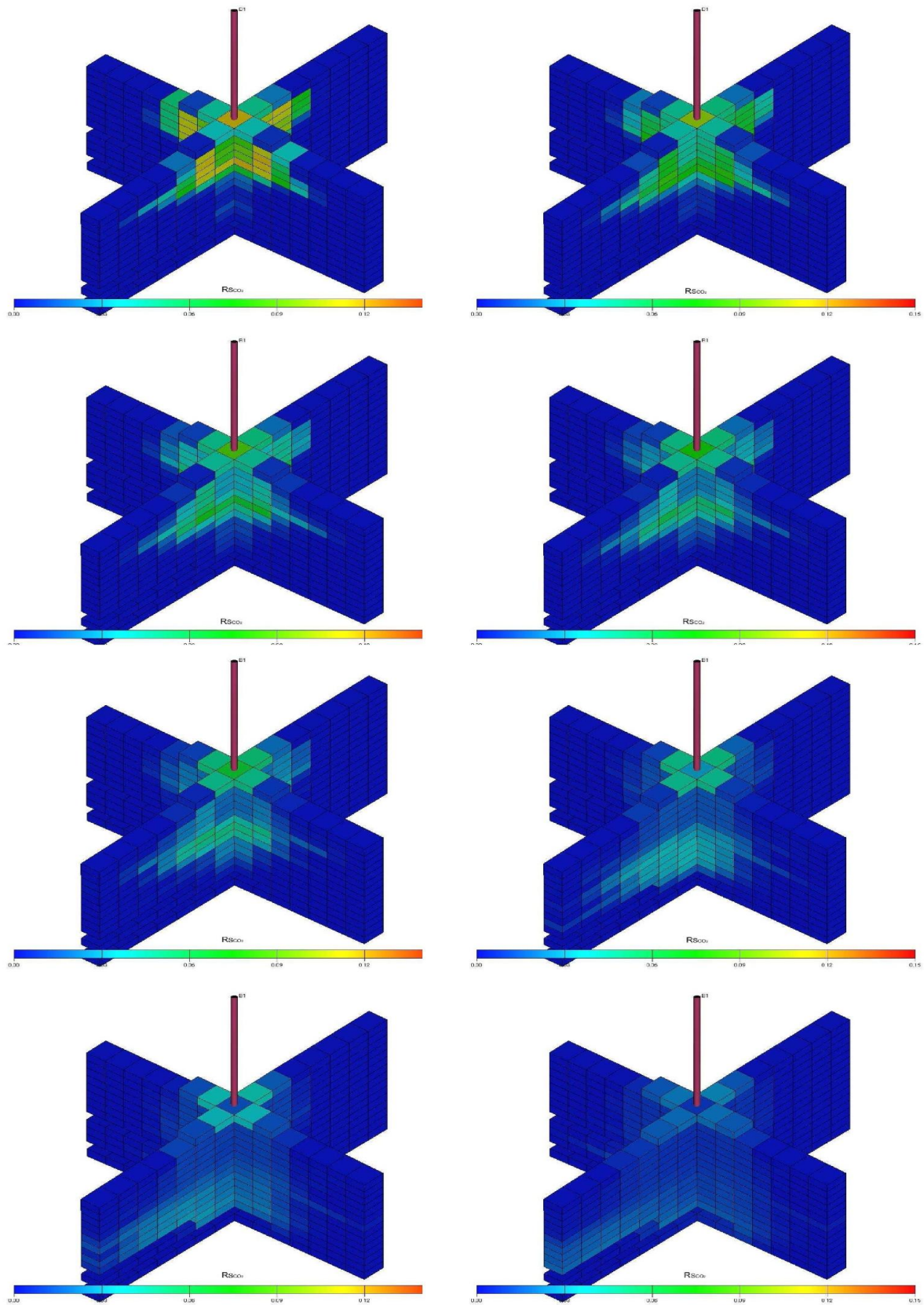
W trakcie symulacji procesu sekwestracji rejestrowano ci nienia na spodzie odwiertu oraz w obr bie caej modelowanej struktury. Z punktu widzenia znaczenia dla przebiegu procesu i jego ogranicze najistotniejsze s :

1. maksymalne przewy szenie ci nienia na stropie struktury ze wzgl du na kwestie szczelno ci skaekadu,
2. maksymalne ci nienie w caej strukturze (gradient ci nienia z gboko ci ) w zwi zku z niebezpiecze stwem indukowania niekontrolowanych szczelin,
3. ci nienia dynamiczne w odwiertach ze wzgl du na konieczno doboru instalacji napowierzchniowych.

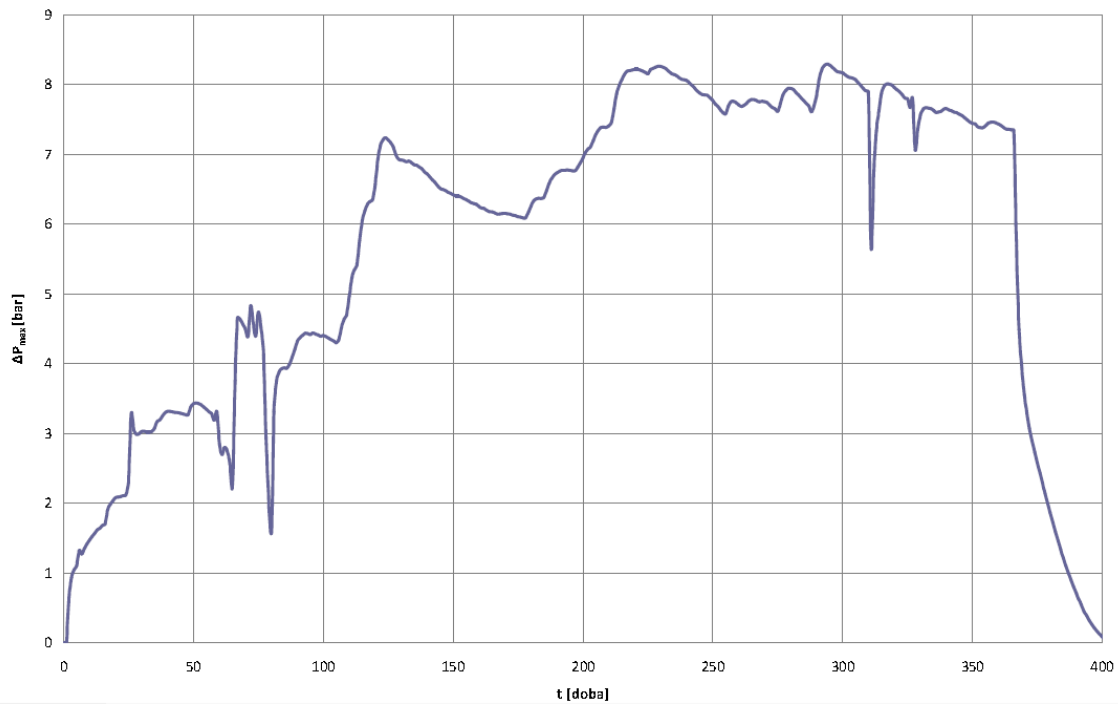
Maksymalne ci nienia na stropie w postaci jego przewy szenia w stosunku do warto ci pierwotnej przedstawiono na Rys. 1.1.16.45. Przewy szenie to nie przekracza 9 barów, tj. 3% pierwotnego ci nienia na stropie. Warto maksymalnego gradientu ci nienia z gboko ci w caej obj to ci struktury nie przekracza 0.11 bar/m i jest wyra nie mniejszy od typowych gradientów szczelinowania w skaekach analizowanego typu.

Ci nienie na spodzie odwiertu zataczaj cego,  $P_{BHP}$ , w funkcji czasu gwaownie spada po zakoczzeniu zataczania i rok pó niej osiaga warto zbli ona do cisnienia pierwotnego.



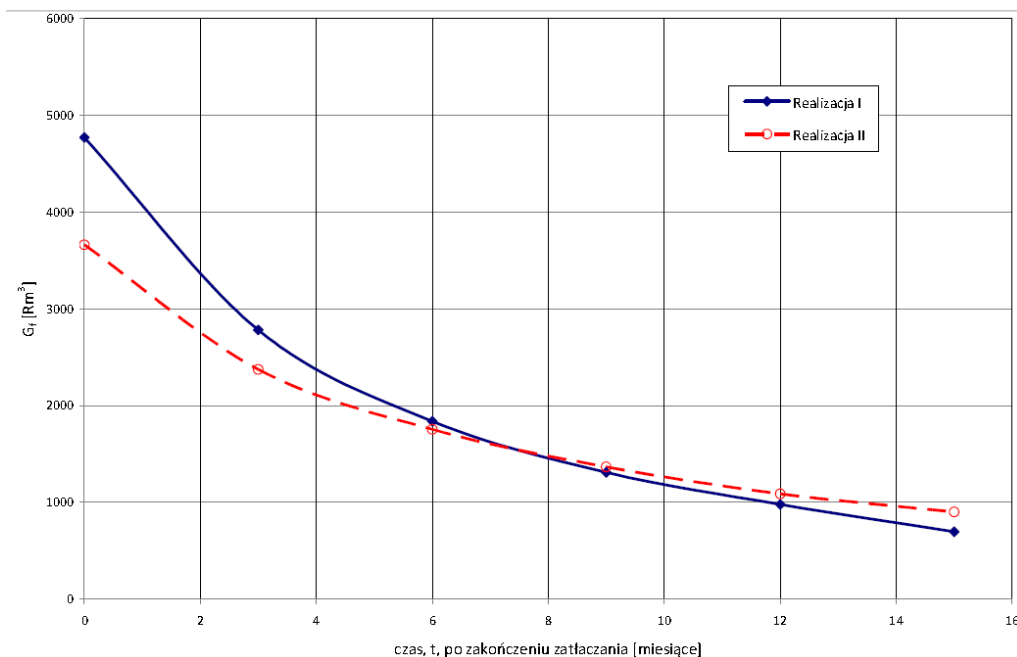


Rys. 1.1.16.44 Rozkład  $CO_2$  rozpuszczonego w solance ( $R_{SCO_2}$  - ułamek molowy) na przekrojach wokół otworu B-1 po 3 latach od rozpoczęcia zatęszczania (lewy, góra), 7, 11, 15, 19, 49, 99 i 199 latach (prawy, dół).



Rys. 1.1.16.45 Maksymalne przewy szenie ci nienia  $\Delta p_{max}$  na stopie struktury w funkcji czasu zatłaczania, t

Zmiany ci nienia charakteryzuj si silnymi fluktuacjami w okresie zatłaczania spowodowanymi du ym stopniem niejednorodno ci struktury oraz podwójnym czasem relaksacji do ci nienia pierwotnego: pierwsza faza relaksacji trwa kilka miesi cy, obejmuje ponad 90% zmian ci nienia i zwi zana jest gównie ze zjawiskiem rozpuszczania si CO<sub>2</sub> w solance, podczas gdy druga faza trwa co najmniej 20 lat, dotyczy zmian ci nienia poni ej 1 bara i odpowiada zjawisku konwekcji.



Rys. 1.1.16.46 Porównanie zmian w czasie ilo ci swobodnego CO<sub>2</sub> w strukturze.

Ze względu na niepewność w określeniu podstawowych parametrów geologicznych struktury (porowatość, przepuszczalność itd.) wyrażają się istnieniem wielu statystycznie różnorodnych realizacji rozkładów tych parametrów zbadano wpływ nieoznaczoności tych wielkości na podstawowe wyniki symulacji procesu sekwestracji. Procedurę tę zrealizowano poprzez wybór 2 realizacji rozkładów dla każdego z istniejących parametrów geologicznych. Skonstruowano dla nich kompletne modele symulacyjne i przeprowadzono zestaw analogicznych symulacji prognostycznych. W rezultacie otrzymano zróżnicowane wyniki dla zmiennych w czasie rozkładów nasycenia CO<sub>2</sub>, ilości CO<sub>2</sub> rozpuszczonego w solance oraz przebiegu ciśnienia w odwiertach i pozostałych ciśnieniach charakteryzujących proces. Spośród analizowanych wielkości najbardziej systematycznie różnicę wykazują wykresy ilości swobodnego CO<sub>2</sub> w funkcji czasu (Rys. 1.1.16.46) wynikające z warunków wpływających na tempo rozpuszczania się CO<sub>2</sub> w solance, co w dużym stopniu zależy od efektywnej powierzchni kontaktu CO<sub>2</sub> z solanką.

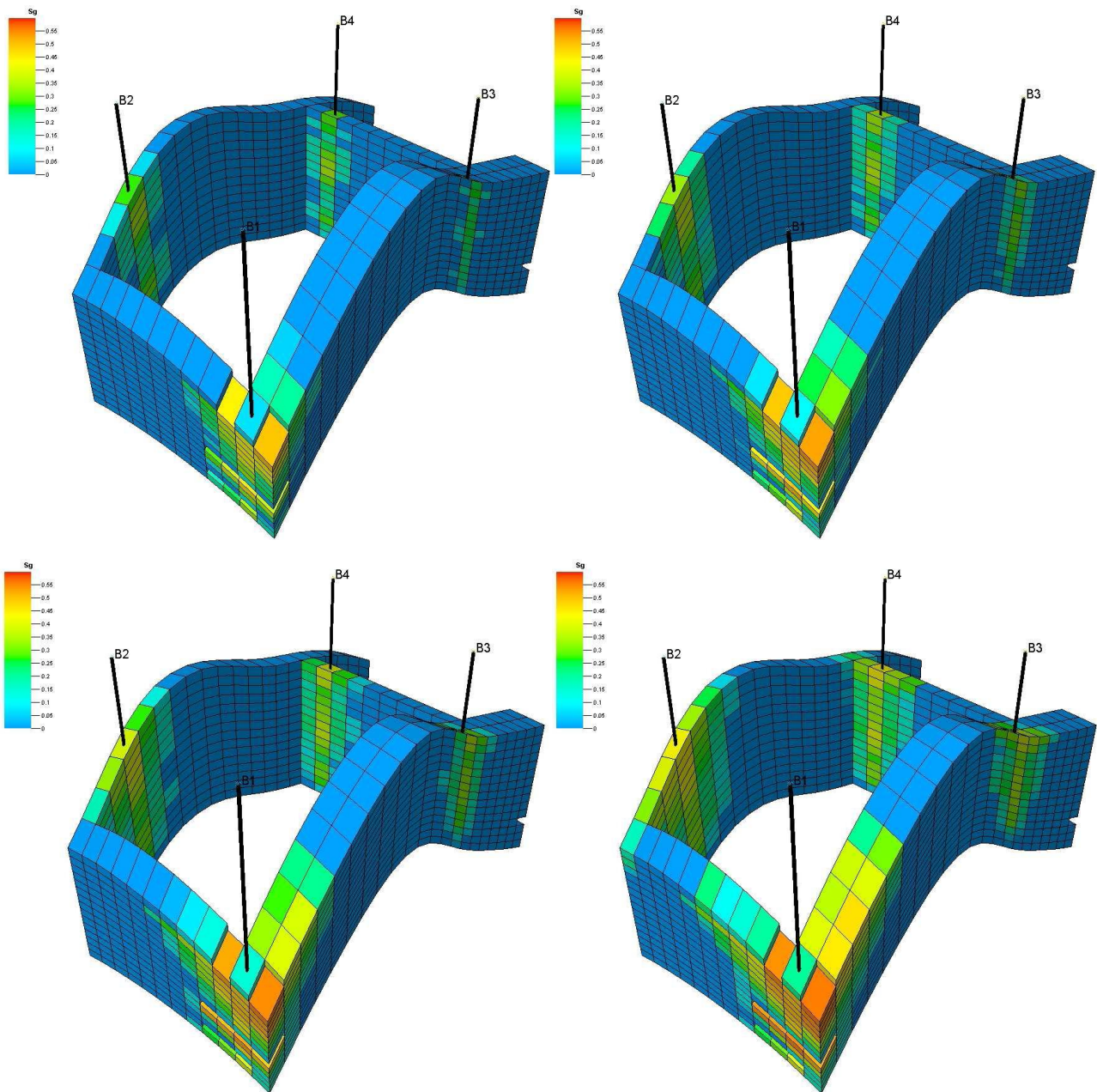
### **Wariant docelowy 6 odwierty B1, B2, B3, B4**

W wariantcie tym założono zatłaczanie CO<sub>2</sub> czterema odwiertami (B-1, B-2, B-3, B4) ze stałą wydajnością tłoczenia  $q_{inj} = 623.7$  tys. Nm<sup>3</sup>/d każdemu z odwiertów przez 25 lat z sumarycznym zatłoczeniem  $G_{inj} = 5.695 \times 10^9$  Nm<sup>3</sup>/odwiert.

Powyższe wyniki odnoszą się do Realizacji I modelu geologicznego oraz do nieskończonego systemu hydrodynamicznego (akifera) otaczającego analizowaną strukturę. Badania typu „sensitivity” ze względu na własności geologiczne oraz stopień otwartości systemu przedstawiono w dalszych rozdziałach.

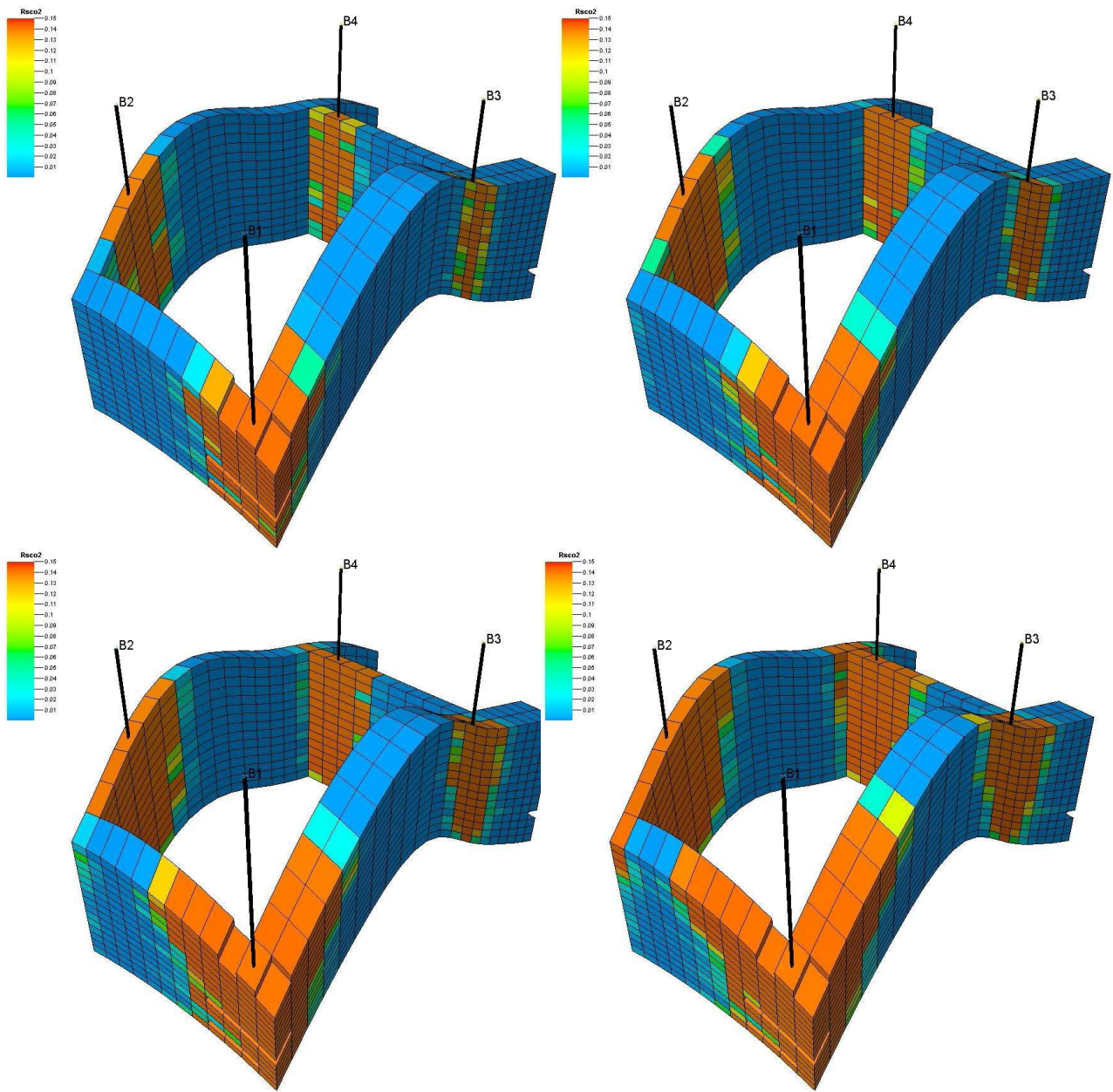
Efektom zatłaczania CO<sub>2</sub> do struktury jest powstanie i rozwój stref wolnego CO<sub>2</sub> wokół każdego z odwiertów zatłaczających. Ze względu na relatywnie znaczne odległości między poszczególnymi odwiertami strefy te nie interferują ze sobą. Pomimo identycznych ilości CO<sub>2</sub> tłoczonych przez każdą z odwiertów rozmiary omawianych stref są zróżnicowane ze względu na silnie niejednorodne rozkłady właściwości zbiornikowych (decydujące znaczenie mają tu rozkłady porowatości). Cechy te są widoczne na Rys. 1.1.16.47, na których pokazano rozkłady nasycenia CO<sub>2</sub>,  $S_g$ , wzdłuż pionowych przekrojów wokół odwiertów zatłaczających dla kolejnych chwil czasowych, tj. odpowiednio po 6, 10, 16 i 25 latach od rozpoczęcia zatłaczania. Rysunki te obrazują nie tylko oczywisty proces zwikszania się stref CO<sub>2</sub>, ale również jego migrację do góry w kierunku stropu i dalej w tym samym kierunku wzdłuż stropu z powodu dominujących sił wyporu.

Innym istotnym efektem jest rozpuszczanie się zatłaczanego CO<sub>2</sub> w solance. Rozkłady rozpuszczonego CO<sub>2</sub>,  $R_{CO_2}$  (w ułamkach molowych) wokół odwiertów i ich zmiany w czasie przedstawiono na Rys. 1.1.16.48 dla powyższych chwil czasowych. Obszary solanki z rozpuszczonym CO<sub>2</sub> odpowiadają miejscom, do których dotarł zatłaczany gaz albo na skutek bezpośredniego wtłaczania w strefy przyodwiertowe albo w efekcie migracji wyporowej. W odróżnieniu od nasycenia swobodnym CO<sub>2</sub>, solanka z rozpuszczonym gazem nie migruje ku górze, ale przeciwnie, wykazuje tendencję opadania choć jest to proces znacznie wolniejszy od migracji wyporowej gazu i będzie lepiej widoczny w dalszej skali czasowej przedstawionej w kolejnym rozdziale. W tym dla procesu sekwestracji efektem jest obecność solanki z rozpuszczonym CO<sub>2</sub> na znacznie większym obszarze aniżeli kiedykolwiek obszar nasycony gazem swobodnym.



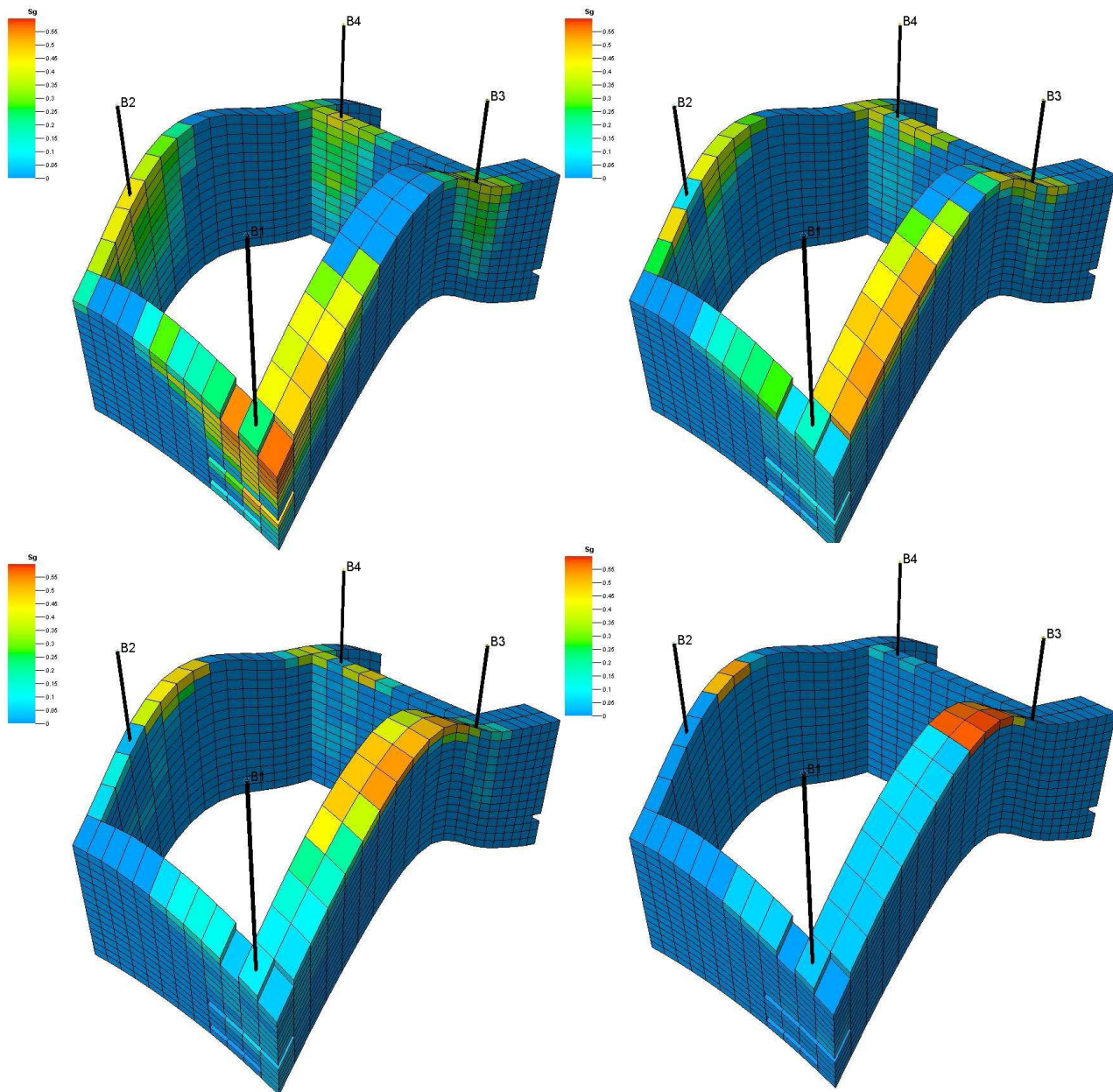
Rys. 1.1.16.47 Rozkład nasycenie swobodnego CO<sub>2</sub> na przekrojach wokół otworów zatęszczających po 6 latach od rozpoczęcia zatęszczania (lewy, góra), 10 latach (prawy, góra), 16 latach (lewy, dół) i 25 latach (prawy, dół) konieca zatęszczania).



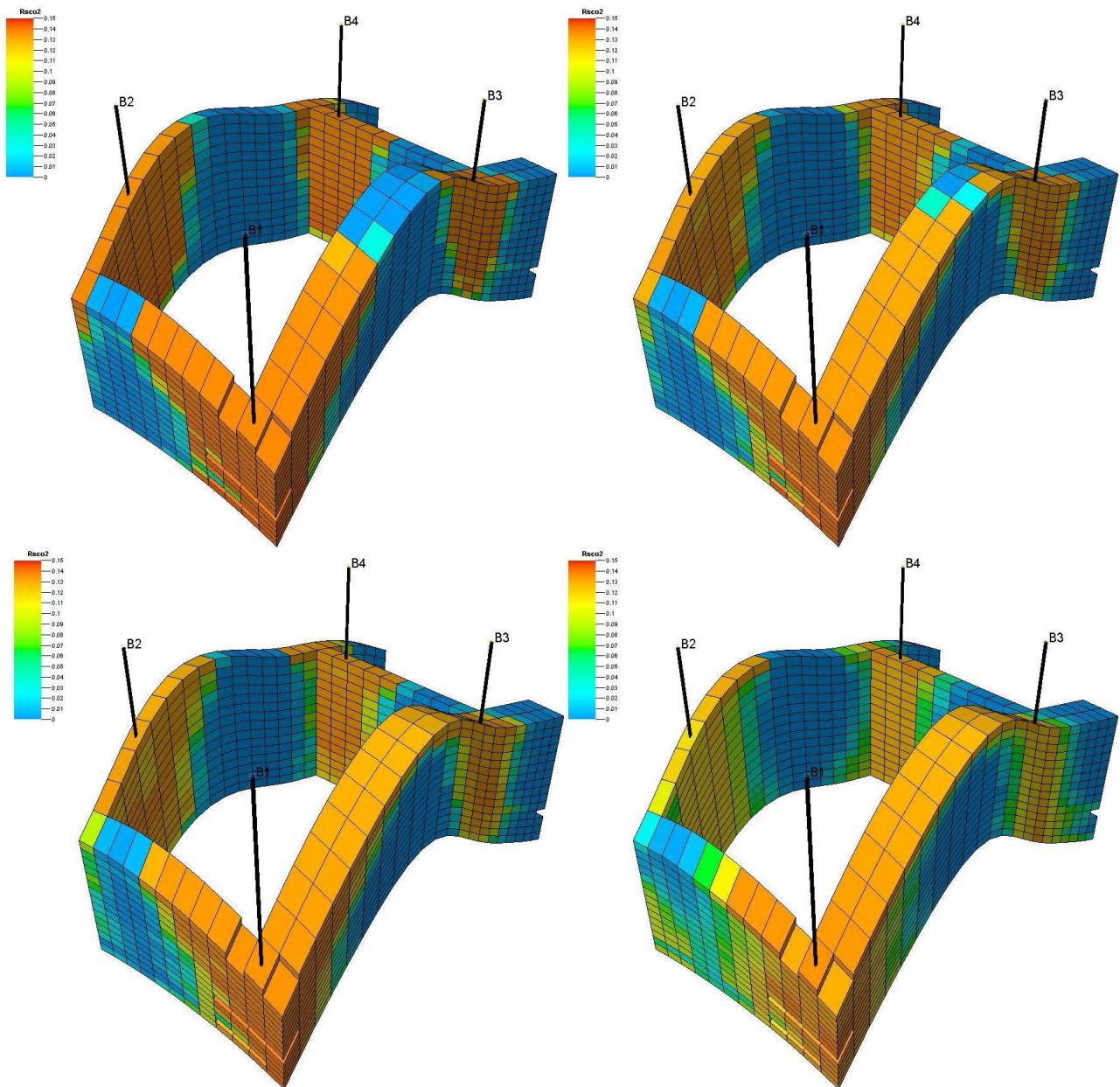


Rys. 1.1.16.48 Rozkład  $\text{CO}_2$  rozpuszczonego w solance ( $R_{\text{SCO}_2}$  - ułamek molowy) na przekrojach wokół otworów zatłaczających po 6 latach od rozpoczęcia zatłaczania (lewy, góra), 10 latach (prawy, góra), 16 latach (lewy, dół) i 25 latach (prawy, dół) zatłaczania).





Rys. 1.1.16.49 Rozkład nasycenia swobodnego CO<sub>2</sub> na przekrojach wokół otworów zafalowanych po 6 latach od zakończenia zafalowania (lewy, góra), 20 latach (prawy, góra), 45 latach (lewy, dół) i 200 latach (prawy, dół).



Rys. 1.1.16.50 Rozkład  $\text{CO}_2$  rozpuszczonego w solance ( $R_{\text{SCO}_2}$  - ułamek mowy) na przekrojach wokół otworów zatęczających po 6 latach od zakończenia zatęczania (lewy, góra), 20 latach (prawy, góra), 45 latach (lewy, dół) i 200 latach (prawy, dół).

Dla zbadania długoczasowych procesów zachodzących w analizowanej strukturze po zakończeniu zatęczania 4 odwiertami w wariancie docelowym przeprowadzono symulacje przez kolejne 200 lat od zakończenia zatęczania. Podobnie do sytuacji przedstawionej w odniesieniu do wariantu testowego w okresie tym obserwuje się :

1. kontynuację przemieszczania się swobodnego  $\text{CO}_2$  ku górze ó w tym okresie jest to głównie migracja warstwami przystropowymi w kierunku lokalnego szczytu struktury.
2. dalsze rozpuszczanie się  $\text{CO}_2$  w solance ó jest to proces bardzo efektywny ze względu na poszerzony kontakt  $\text{CO}_2$  z nienasyconymi solankami w efekcie zjawisk opisanych w punkcie 1, i 3.

3. konwekcja solanki pod wpływem zmian jej gęstości (wzrostu) w efekcie rozpuszczania się CO<sub>2</sub>.

Zjawiska powyższe zilustrowano zmiennymi w czasie:

a) rozkładami swobodnego CO<sub>2</sub>, S<sub>g</sub>, zarejestrowanymi dla 6, 10, 20, 45, i 200 lat po zakończeniu zatęszczania na Rys. 1.1.16.49 o migracja CO<sub>2</sub>, zanik fazy gazu swobodnego na skutek rozpuszczania.

b) rozkładami CO<sub>2</sub> rozpuszczonego, R<sub>scO2</sub> dla czasów j.w. na Rys. 1.1.16.50

– wzrost objętości obszaru solanki z rozpuszczonym CO<sub>2</sub>,

– opadanie solanki z rozpuszczonym CO<sub>2</sub> (konwekcja).

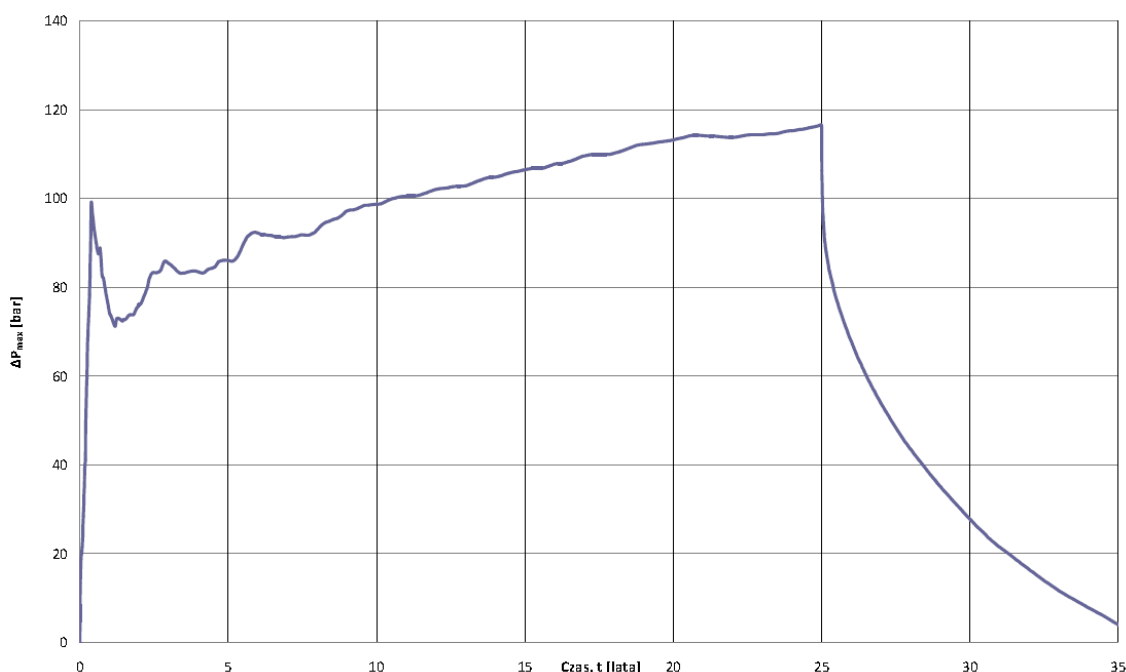
Tak jak dla wariantu testowego poniżej scharakteryzowano wyniki dla:

1. maksymalnego przewyższenia ciśnienia na stopie struktury ze względu na szczelność skał i nadkładu,

2. maksymalnego ciśnienia w całej objętości struktury (gradientu ciśnienia z głębokości) ze względu na niebezpieczeństwo powstania szczelin,

3. ciśnienia dynamicznych na spodzie odwiertów ze względu na techniczne parametry sekwestracji.

Maksymalne przewyższenie ciśnienia na stopie struktury przedstawiono na Rys. 1.1.16.51 i wynosi ono 118 barów i 42%. Maksymalny gradient ciśnienia z głębokości w całej objętości struktury wynosi ok. 0.152 bar/m. Ciśnienie na spodzie odwiertów zatęszczających PBHP w funkcji czasu spada gwałtownie po zakończeniu zatęszczania a w okresie następnym 20-30 lat praktycznie stabilizuje się. Wszystkie odwierty wykazują maksymalny wzrost ciśnienia na koniec okresu zatęszczania wynoszący od 98.5 bara dla B-3 do 119.6 bara dla B-1. Analogicznie wszystkie 4 odwierty charakteryzuje czas relaksacji ciśnienia po zakończeniu zatęszczania wynoszący ok. 35 lat. W późniejszym okresie obserwuje się niewielkie zmiany ciśnienia w odwiertach w skali czasowej setek lat.

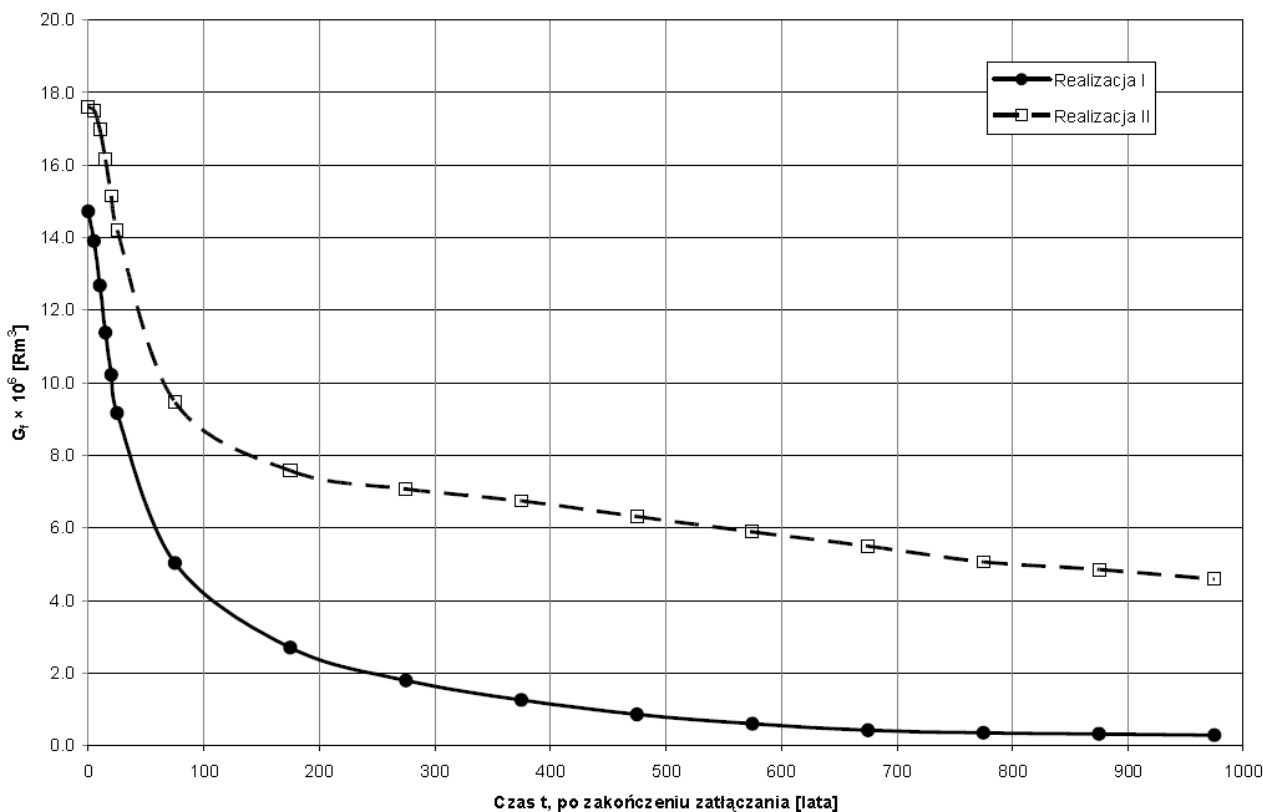


Rys. 1.1.16.51 Maksymalne przewyższenie ciśnienia  $\Delta P_{max}$  na stopie struktury w funkcji czasu zatęszczania, t

Analogicznie do analizy przeprowadzonej dla wariantu testowego, również w niniejszym wariantcie docelowym zbadano wpływ rozmiaru efektywnego systemu hydrodynamicznego, którego cząści jest modelowana struktura, na uzyskane wyniki a w szczególności czynniki charakterystyczne procesu sekwestracji.

W niniejszym wariantcie objętość zataczanego gazu wynosi ok.  $75 \times 10^6$  Rm<sup>3</sup> co stanowi  $1.67 \times 10^{-2}$  objętości porów modelowanej struktury. W konsekwencji zmiany czynniki nie zauważalne dopiero po zakończeniu zataczania i nie przekraczają 2 barów (dla akifera 3-krotnego względem akifera 10-krotnego i nieskompresowanego).

Podobnie jak w przypadku wariantu testowego, również w przypadku niniejszego wariantu docelowego, badano wpływ nieoznaczonych rozkładów podstawowych parametrów geologicznych na wyniki symulacji procesu sekwestracji. Przeprowadzono równoległe symulacje dla dwu wybranych realizacji rozkładów każdego z parametrów. Otrzymano wyraźnie zróżnicowane wyniki zarówno dla rozkładów nasycenia CO<sub>2</sub>, ilości CO<sub>2</sub> rozpuszczonego w solance, czynniki charakterystycznych sekwestracji i innych. Z porównania powyższych wyników wyraźnie gorsze widać czynniki Realizacji II, co przejawia się wyższymi o ok. 20 barów czynniki w odwiertach i w samej strukturze (na stopie) widać czynniki te wpływają również na wolniejsze rozpuszczanie się zataczanego CO<sub>2</sub> w solance, co pokazuje Rys. 1.1.16.52.



Rys. 1.1.16.52 Porównanie zmian w czasie ilości swobodnego CO<sub>2</sub>, G<sub>f</sub>, w strukturze.



## Podsumowanie

W pracy skonstruowano dynamiczny model symulacyjny struktury wodono nej Budziszewice-Zaosie w utworach triasu dolnego jako potencjalnego składowiska dla sekwestracji CO<sub>2</sub>. Dokonano implementacji statycznego modelu geologicznego struktury z uwzględnieniem jego wielokrotnych realizacji geostatystycznych. Informacje geologiczne uzupełniono w sposób wiarygodny termodynamicznymi parametrami z uwzględnieniem warunków do zastosowania symulacji kompozycyjnych stworzonego modelu.

Stworzony dynamiczny model symulacyjny umożliwił do przeprowadzenia wielokrotnych prognoz symulacyjnych procesu sekwestracji wg zadanych warunków programu zatłaczania (wariant testowy i docelowy).

Zaprezentowano wyniki symulacji w zakresie: (i) rozkładów nasycenia CO<sub>2</sub> i ich ewolucji w czasie zatłaczania i następującym po nim okresie relaksacji, (ii) przestrzennych rozkładów ilości CO<sub>2</sub> rozpuszczonego w solance i ich zmian w fazie zatłaczania i relaksacji, (iii) czynników charakteryzujących proces: maksymalnego przewyższenia ciśnienia na stropie; maksymalnego gradientu ciśnienia z głębokości; ciśnienia na spodzie odwiertów.

Przeprowadzono analizę wpływu stopnia otwartości systemu hydrodynamicznego struktury na wyniki procesu sekwestracji.

Oszacowano zmienność wyników procesu wynikającą z niejednoznaczności danych geologicznych poprzez porównanie skrajnych realizacji rozkładów geologicznych.

## Wnioski

Przedstawione wyniki symulacji procesu sekwestracji uzyskane na modelu analizowanej struktury pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

### *Wariant testowy*

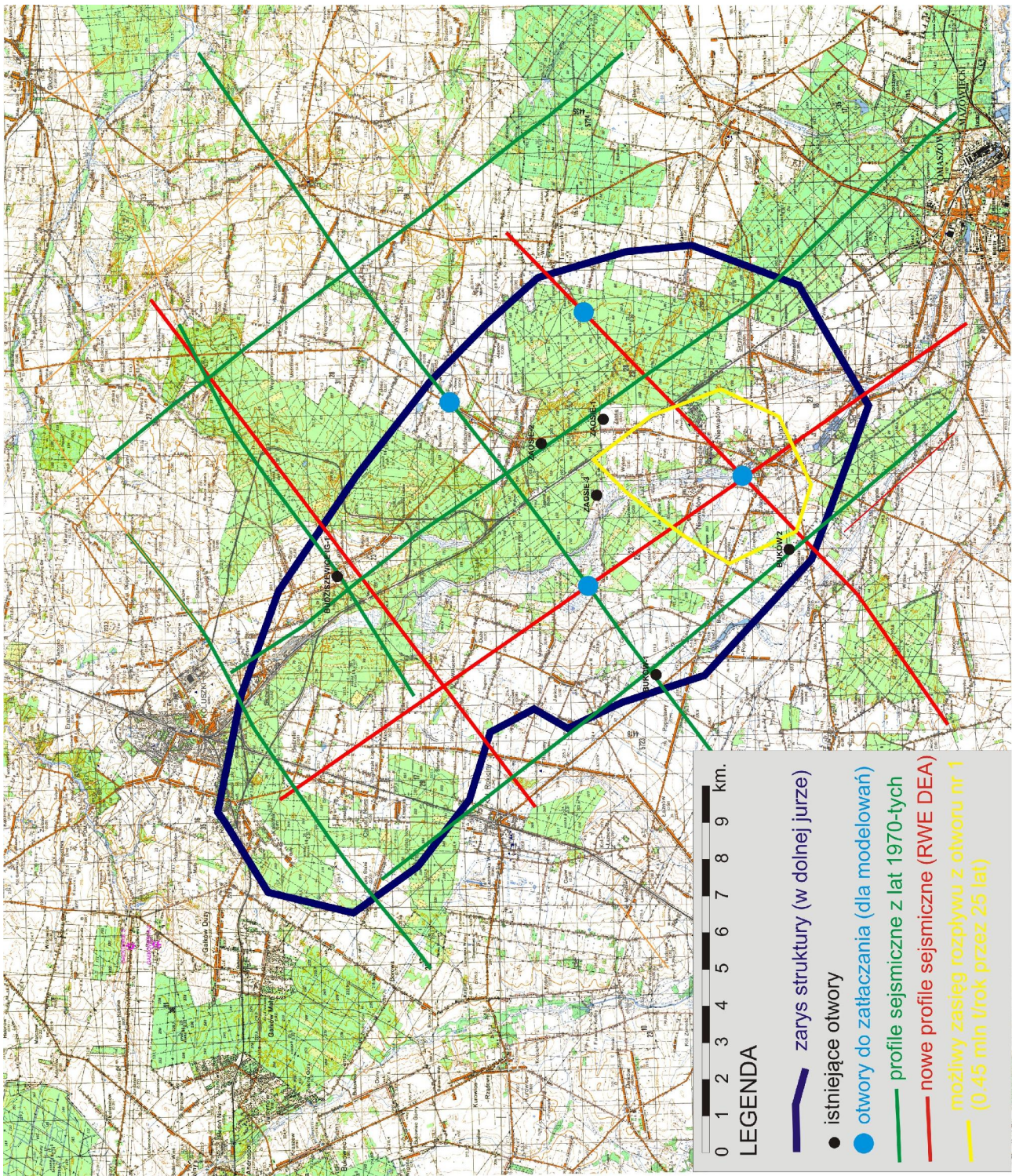
1. Czas trwania testu i wydajność zatłaczania CO<sub>2</sub> w jego trakcie określają zasięgi strefy sekwestracji, która wg symulacji przeprowadzonych na skonstruowanym modelu struktury nie przekracza 1 km.
2. Wyniki testu mogą zweryfikować i/lub precyzyjniej określić wiarygodność powiększenia strefy.
3. Wyniki testu niezależnie od szczegółowych informacji o strukturze nie pozwolą określić stopnia otwartości hydrodynamicznej struktury.
4. Dla zoptymalizowania testu pod kątem technicznych szczegółów i możliwości uzyskania maksimum istotnych informacji o strukturze należy skonstruować model strefy przyodwiertowej o podwyższonej rozdzielczości i użyć go zarówno na etapie projektowania testu jak i analizy jego wyników.

### *Wariant docelowy*

1. Zakładane ilości zatłaczanego CO<sub>2</sub> obejmują stosunkowo niewielki objętość struktury wokół odwiertów zatłaczających.
2. Istotne parametry procesu sekwestracji (w tym ciśnienie przewyższenia na stropie, gradient z głębokości i inne) są albo lub wcale nie zależą od charakterystycznych rozmiarów struktury, których części jest analizowany obszar.
3. Krytycznym wielkością limitującą efektywność pojemności sekwestracji jest przewyższenie ciśnienia na stropie (przewyższenie ciśnienia pierwotnego bądź celem ryzyka rozszczenia skał nadkładu), które przekroczy 110 barów lub 42% ciśnienia pierwotnego.
4. Kolejnym parametrem podwyższonego ryzyka będzie maksymalny gradient ciśnienia z głębokości który przekroczy 0.15 bar/m.
5. Niepewność w określeniu wiarygodności geologicznych struktury może oznaczać dodatkowy wzrost wyliczonych ciśnienia rzędu 20 barów
6. Procesy migracji gazu na skutek siły wyporu oraz efekty rozpuszczania się CO<sub>2</sub> w solance wraz ze zjawiskiem konwekcji solanki powodują efektywny wzrost pojemności sekwestracyjnej struktury w okresie kilku dziesięcioleci od rozpoczęcia zatłaczania.



## 1.1.17 ZARZĄDZANIE RYZYKIEM GEOLOGICZNEGO SKŁADOWANIA CO<sub>2</sub>



Rys. 1.1.17.1 Mapa topograficzna w rejonie Budziszewice-Zaosie z oznaczeniem skupisk ludzkich w rejonie struktury i otworów (symulacyjnych) do zatlaczania.

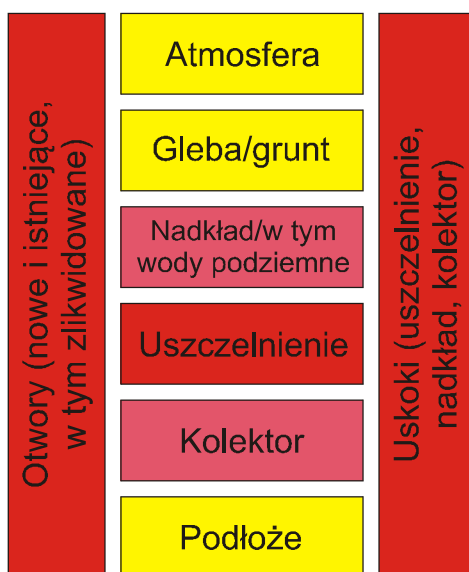


Ryzyko geologicznego składowania zdefiniowane jest (Chadwick et al., 2008) jako iloczyn prawdopodobieństwa wystąpienia zagrożenia i skutków zagrożenia. Z ryzykiem geologicznym, dotyczącym ściśle i integralnie kompleksu składowania, związane są zagrożenia wycieków dwutlenku węgla (do śródkich wód podziemnych i atmosfery; to ostatnie ma aspekt lokalny i globalny, związane z emisją CO<sub>2</sub> do atmosfery) oraz solanki (do wód podziemnych) na środowisko oraz zdrowie i bezpieczeństwo ludzi. Poza tym mamy jeszcze ryzyko ekonomiczne, związane z opłacalnością inwestycji oraz ryzyko akceptacji społecznej dla inwestycji i szeregi innych.

Na Rys. 1.1.17.1 przedstawiono rozkład skupisk ludzkich w rejonie struktury i otworów (symulacyjnych) do zatęszczania oraz istniejących otworów nawierczających jur i górsze formacje. Lokalizacja otworów symulacyjnych (modelowanie procesów zatęszczania) została wybrana orientacyjnie, na podstawie znanej geometrii struktury i przebiegu wykorzystanych linii sejsmicznych. Ostateczna lokalizacja może być wybrana dopiero w wyniku uzgodnień z władzami lokalnymi i właścicielami gruntów, przez inwestora w przypadku wyboru tej struktury jako składowiska dla projektu demonstracyjnego firmy PGE Elektrownia Bełchatów S.A.

W następnych podrozdziałach przedstawiono analizy różnych aspektów ryzyka geologicznego składowania wykonane przez GIG (skutki wycieków i ich możliwe źródła w naszym przypadku), INiG (możliwość wystąpienia wycieków dwutlenku węgla i migracji solanki) i AGH (zagrożenia integralnie składowiska i wykonalność składowania). Jako podstawę do analiz przyjęto metodologię z podręcznika najlepszych praktyk projektów CO<sub>2</sub>STORE, SACS i SACS2 (Chadwick et al., 2008), w szczególności analizę FEP (Feature-Events-Procedures). Zagrożenia te zostały szczegółowo scharakteryzowane w poszczególnych podrozdziałach poniżej.

Podstawowe zagrożenia planu ryzyka obejmującego powyższy zakres prac przedstawiono na Rys. 1.1.17.2, przy czym odcieniami koloru czerwonego zaznaczono elementy krytyczne dla przedsięwzięcia geologicznego składowania (ciemniejszy odcień oznacza większą wagę niż jaśniejszy) a różnym nie tak ważnymi, choć równie istotnymi. Najistotniejsze w naszym przypadku dla bezpieczeństwa geologicznego składowania dwutlenku węgla jest jako uszczelnienie, brak uskoków przecinających je i nadkład, oraz ściśle nowych (przewidywanych do odwiercenia w przypadku wyboru struktury na składowisko) i starych zlikwidowanych otworów wiertniczych. Prawie równie ważnym jest jako kolektora i ochrona śródkich wód podziemnych (górnourajski nieudokumentowany GZWP nr 404).



Rys.1.1.17.2 Podstawowe zagrożenia planu ryzyka dla struktury Budziszewice-Zaosie.

## **Ocena ryzyka składowania CO<sub>2</sub>, w tym skutków potencjalnych wycieków (GIG)**

GIG wykonał analizy i oceny ryzyka w oparciu o dotychczasowe wyniki badań prowadzonych przez członków konsorcjum w ramach segmentu II.

Składowanie dwutlenku węgla w formacjach geologicznych niesie za sobą ryzyko niekontrolowanego wydostania się gazu poza zbiornik, co może być wynikiem przenikania przez warstwowe struktury geologiczne wskutek różnic ciśnienia pomiędzy gazem a otaczającymi formacjami geologicznymi, przenikaniem przez szczeliny nieopieczętowane CO<sub>2</sub> struktury budowane przez wykonane w trakcie realizacji otwory wiertnicze. Analiza i ocena ryzyka geologicznego składowania dwutlenku węgla uwzględnia wszystkie możliwe drogi migracji dwutlenku węgla. W analizie uwzględniono wyniki wcześniejszych prac, tj. uwarunkowania petrofizyczne i termodynamiczne, wyniki przeprowadzonych badań i analiz geofizycznych i geologicznych oraz charakterystyk hydrogeologicznych formacji ostrowieckiej obiektu w rejonie Bełchatowa i geochemicznych danych z otworów z uwzględnieniem reakcji CO<sub>2</sub> ze skałami i solankami.

Zakres opracowania obejmuje:

- 1) Analizy geologicznej, hydrogeologicznej i petrograficznej zbiornika,
- 2) Zidentyfikowanie czynników kształtujących i wpływających na wysokość ryzyka geologicznego składowania CO<sub>2</sub>,
- 3) Analizy modelowej rozpływu dwutlenku węgla w wybranej strukturze geologicznej dla określonych czasookresów oraz ilości zatłaczanego gazu,
- 4) Analizy i ocen ryzyka geologicznego składowania dwutlenku węgla w wybranej formacji geologicznej
- 5) Opracowanie kryteriów akceptowalności ryzyka geologicznego składowania CO<sub>2</sub> w formacjach solankowych formacji ostrowieckiej dla obiektu Bełchatów.

### **Analiza i ocena ryzyka niekontrolowanego wycieku CO<sub>2</sub>**

Zgodnie z wymaganiami Dyrektywy 2009/31/WE, w sprawie geologicznego składowania dwutlenku węgla *„celem bezpiecznego dla środowiska geologicznego składowania CO<sub>2</sub> jest stałe hermetyczne składowanie CO<sub>2</sub> w taki sposób, aby uniemożliwić lub ograniczyć w przypadku gdy nie jest to możliwe w możliwie najwyższym stopniu wyeliminowanie negatywnego oddziaływanie na środowisko i zdrowie ludzkie oraz wszelkie zagrożenia dla nich.”* Ocena ryzyka powinna wykonywana być w każdej fazie realizacji przedsięwzięcia: przed operacyjną, operacyjną oraz po operacyjną, i powinna wykorzystywać wyniki modelowania dynamicznego i przeprowadzonych charakterystyk bezpieczeństwa kolektora. Ocena ryzyka prowadzona jest kolejno poprzez charakterystykę zagrożenia, ocenę narażenia, ocenę skutków oraz charakterystykę ryzyka.

W ocenie ryzyka wykorzystano wyniki modelowania dynamicznego dwuwariantowego: testowego, w którym zatłaczanie prowadzone było otworem nr 1, w ilości 20 000 Mg przez rok oraz docelowego gdzie symulacja zatłaczania obejmowała cztery otwory po 450 000 Mg CO<sub>2</sub>/rok przez okres 25 lat, czas symulacji do 200 lat po zakończeniu zatłaczania.

Do oceny ryzyka wykorzystano bazę Quintessa (Quintessa FEP database (Features, Events and Processes)). Na jej podstawie opracowano i przedstawiono najważniejsze zagrożenia dla analizowanego kolektora formacji ostrowieckiej.

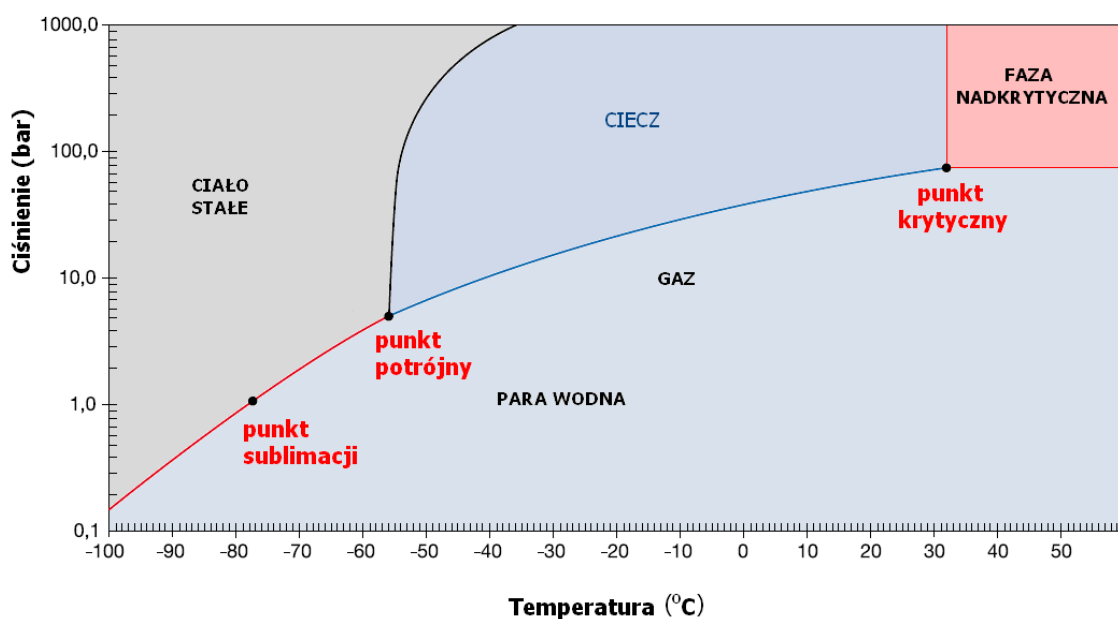
### **Charakterystyka zagrożeń związanych z geologicznym składowaniem CO<sub>2</sub>**

- W celu właściwej oceny czynników wpływających na wysokość ryzyka należy zidentyfikować i ocenić potencjalne skutki sejsmicznych ogniw systemu geologicznego składowania CO<sub>2</sub>.
- Potencjalnymi ścieżkami ucieczek zatłaczanego CO<sub>2</sub> w wybrane formacje geologiczne mogą być:
  - system porów słabo przepuszczalnych warstw skalnych, jeżeli ciśnienie wyciekowe przewyższa ciśnienie kapilarne w górotworze,

- system spłaskawienia i szczelin w górotworze w tym uskoki,
- ciekłe antropogeniczne, jak na przykład zabezpieczone lub opuszczone otwory produkcyjne ropy i gazu.
- Bezpieczeństwo podziemnego składowania dwutlenku węgla zależy od właściwego wyboru lokalizacji, który, zgodnie z Dyrektywą uwzględnia powinien (Dyrektywa 2009/31/WE):
  - geologii i geofizyk;
  - hydrogeologii (w szczególności występowanie wody gruntowej przeznaczonej do spożycia, poziomów i pitem wodonośnych);
  - inżynierii zbiornika (w tym wyliczenia wolumetryczne objętości porów dla celów zatęszczania CO<sub>2</sub> i ostatecznej pojemności składowania);
  - geochemii (współczynniki rozpuszczalności, współczynniki mineralizacji);
  - geomechaniki (przepuszczalność, ciśnienie szczelinowania);
  - sytuacji sejsmicznej;
  - obecności i stanu naturalnych i antropogenicznych dróg, w tym odwiertów eksploatacyjnych i otworów wiertniczych, które mogłyby stanowić drogi wycieków.

### Charakterystyka zagrożeń powodowanych przez CO<sub>2</sub>

Dwutlenek węgla to nieorganiczny związek chemiczny, tlenek węgla na IV stopniu utlenienia. W temperaturze pokojowej jest to bezbarwny, bezwonny i niepalny gaz, dobrze rozpuszczalny w wodzie i cięższy od powietrza (ok. 1,5 raza). Pod normalnym ciśnieniem przechodzi ze stanu stałego do gazowego (sublimuje) z pominięciem fazy ciekłej w temperaturze  $-78,5^{\circ}\text{C}$ . Pod zwiększonym ciśnieniem (5.1 bar) można go jednak skroplić w temperaturze  $-57^{\circ}\text{C}$  (Rys. 1.1.17.3). W naturze występuje w stanie wolnym w atmosferze i związanym (np. jako składnik wapieni  $\text{CaCO}_3$ ). Rozpuszczalność CO<sub>2</sub> w wodzie wzrasta z podwyższeniem temperatury i maleje wraz z obniżeniem ciśnienia. Rozpuszczalność CO<sub>2</sub> w wodzie także maleje wraz ze wzrostem zasolenia.



Rys. 1.1.17.3 Obszary termodynamiczne dla dwutlenku węgla (na podstawie: IPCC, 2005; Rybicki & / aciak, 2008)

Powszechnie występuje nazwa suchy lód określa dwutlenek węgla (CO<sub>2</sub>) w stanie stałym. Produkt ten nazywamy lodem suchym ponieważ sublimując (utleniając) się oddaje do otoczenia swojej temperaturze  $-73^{\circ}\text{C}$  nie zostawiając przy tym wody. Suchy lód sublimuje pod

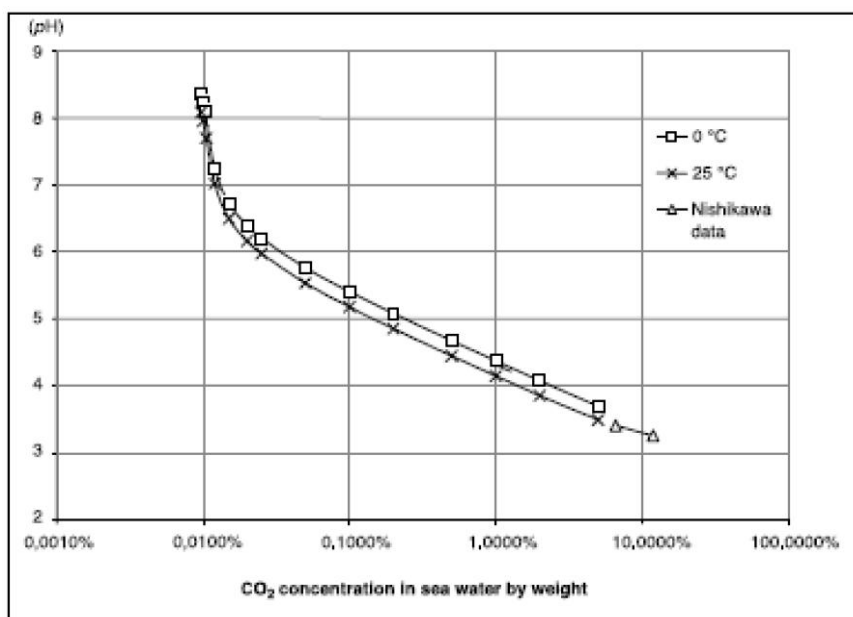
ci nieniem atmosferycznym w temperaturze  $-78,9^{\circ}\text{C}$ , pobierając ciepło przemiany  $573\text{ kJ/kg}$ . Wartość ta w porównaniu z lodem (wodnym), jest większa 1,9 razy w przypadku tej samej masy, a 3,3 razy większa w przypadku jednakowej objętości. Woda w połączeniu z suchym lodem przyspiesza proces sublimacji. Suchy lód otrzymuje się z gazowego  $\text{CO}_2$  (przez sprężanie otrzymuje się cykl ciekły, następnie stały  $\text{CO}_2$ ). W laboratoriach najczęściej wykorzystuje się duże ciepło parowania skroplonego  $\text{CO}_2$  o strumień wylewanej z butli cieczy, która tak silnie, że ulega chwilowemu zestaleniu. Jest to materiał bezzapachowy, bezsmakowy, nietrujący, niepalny, obojętny, bakteriostatyczny o twardości 2 w skali Mohra. Gazowy  $\text{CO}_2$  jest cięższy od powietrza a w dużych stężeniach tworzy chmurę tzw. szimn mgłową. Ze względu na niską temperaturę suchego lodu (poniżej  $-70^{\circ}\text{C}$ ) powinno się go przetrzymywać w specjalnych izolowanych pojemnikach. Nie powinno się dotykać go rękoma tylko specjalnymi szczytkami w rękawiczkach ochronnych.

### Ocena narażenia

Ocena narażenia przeprowadzana jest na podstawie charakterystyki środowiska, działania i liczby ludności nad kompleksem składowania. W celu kompleksowej oceny ryzyka niezbędne jest opracowanie szczególnej charakterystyki środowiska nad kompleksem składowania w przypadku przejścia projektu z fazy przedoperacyjnej do operacyjnej. W opracowaniu przedstawiony został szereg symulacji oraz opracowane na ich podstawie scenariusze rozwoju zagrożeń związanych z wydostawaniem się  $\text{CO}_2$  do atmosfery.

### Ocena skutków - wpływ $\text{CO}_2$ na jakość wody

$\text{CO}_2$  w wodzie chwilowo występuje w postaci kwasu węglowego. Jest w nim składnikiem odżywczym, bez którego rośliny nie mogą dobrze się rozwijać. Stężenie  $\text{CO}_2$  ma ponadto wpływ na wartość odczynu pH i twardość wapienności. Rośliny pobierają do fotosyntezy dwutlenek węgla z wody, początkowo w formie gazu  $\text{CO}_2$ , potem zaś uzyskują dwutlenek węgla z dwuwapnia, co w konsekwencji podnosi wartość pH. Oznacza to, że im większa jest twardość wapienności tym mniej znajduje się w wodzie dostępnego  $\text{CO}_2$ . Optymalna zawartość dwutlenku węgla w wodzie wydaje się wynosić pomiędzy  $5 - 15\text{ mg/l}$  a graniczna  $30\text{ mg/l}$  i należy uważać nad przekroczeniem granicznej wartości, gdyż może wystąpić przyduszenie ryb. Rys 1.1.17.4 przedstawia zależność pH od stężenia  $\text{CO}_2$  w wodzie morskiej i solankach dla temperatur  $0^{\circ}\text{C}$  i  $25^{\circ}\text{C}$ .



Rys 1.1.17.4 Zależność pH od stężenia  $\text{CO}_2$  w wodzie morskiej i solankach.



## Ocena skutków - wpływ CO<sub>2</sub> na zdrowie i życie

Dwutlenek węgla jest produktem spalania i oddychania. Jest wykorzystywany przez rośliny w procesie fotosyntezy. Tworzy się przy utlenianiu i fermentacji substancji organicznych. Występuje w kopalniach, cukrowniach, gorzelniach, wytwórniach win, silosach zbożowych, browarach i studzienkach kanalizacyjnych. W małych stężeniach nie jest szkodliwy, w większych stężeniach dwutlenek węgla jest szkodliwy dla zdrowia a nawet zabójczy, a jego działanie powoduje powstawanie hiperkapnii a co za tym idzie kwasicy oddechowej i w następstwie obrzęku mózgu.

Tabela 1.1.17.1 Higieniczne kryteria bezpieczeństwa.

Stężenie CO <sub>2</sub> % objętości	Wpływ na człowieka	Poziom ryzyka
0.04	powietrze w naturze	akceptowalny
0.07	powietrze w wolnej przestrzeni w mieście	
0.08	wzrastająca wraz z wiekiem zapachowa	
0.1	maksymalna akceptowalna zawartość CO <sub>2</sub>	
0.14	maksymalne akceptowalne stężenie w pomieszczeniach biurowych	tolerowalny
0.4	maksymalna wartość w izbie klasowej	
0.5	NDS - 5000ppm, 9000mg/m <sup>3</sup>	
2	fizjologiczna wartość krótkotrwale tolerowana	nietolerowalny
3	trudno oddychaniem	
4-5	zjawisko bezwładu	
5-10	dawka śmiertelna przy długotrwałym wdychaniu	
>10	głowa nie wiecy	
>30	natychmiastowa śmierć na skutek porażenia ośrodka oddechowego	

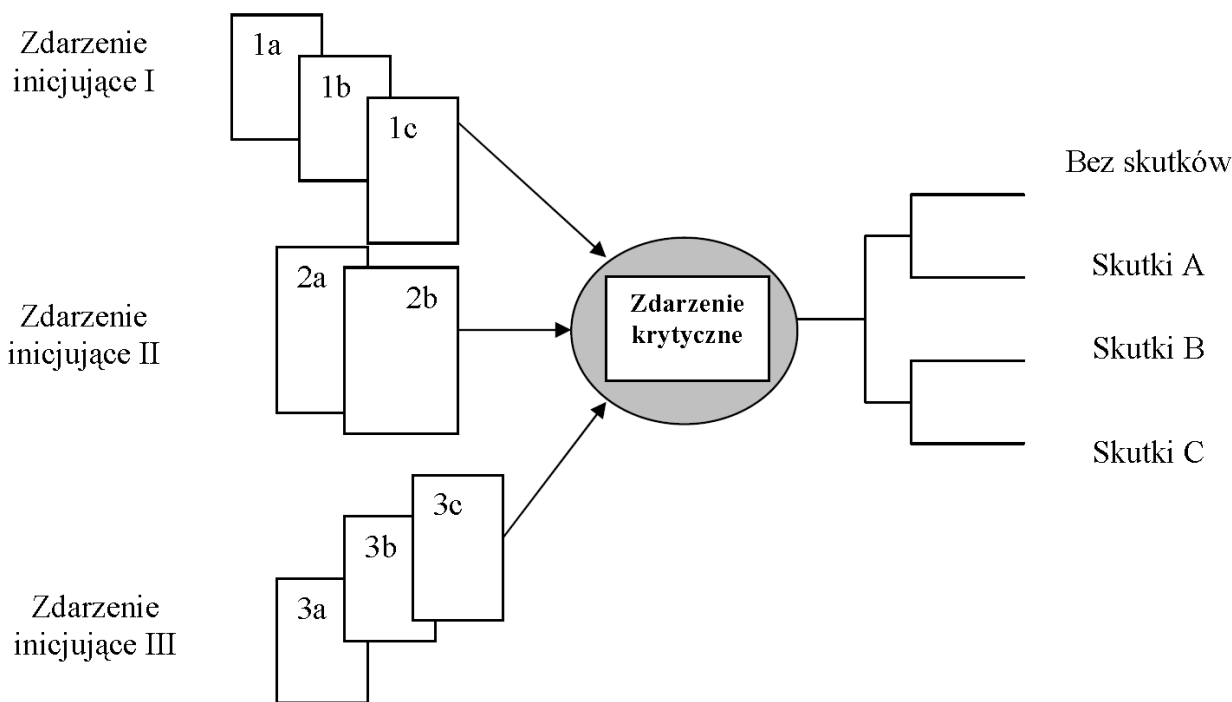
### Metodologia szacowania ryzyka niekontrolowanego wycieku CO<sub>2</sub>

Przyjmując metodologia oceny ryzyka oparta została na następujących założeniach:

- przyjęciu higienicznych kryteriów wpływu CO<sub>2</sub> na zdrowie ludzi i środowisko (zgodnie z tabelą 1.1.17.1)
- tworzeniu scenariuszy rozwoju niebezpiecznych zdarzeń,
- doborze odpowiednich metod profilaktyki i prewencji dla zapobiegania rozwojowi scenariusza zdarzenia lub ograniczania skutków tych zdarzeń tzw. warstw zabezpieczenia.

Określenie możliwych scenariuszy (ciągów) zdarzeń awaryjnych wiąże się z koniecznością ich odpowiedzi na szereg pytań, na przykład (patrz też Rys. 1.1.17.5):

- co się stanie gdy określone składowisko zawiedzie,
- co się stanie gdy zostanie popełniony błąd (np. obsługi),
- co się stanie gdy wystąpi np. wstrząsy sejsmiczne,
- co się stanie gdy nastąpi niekontrolowana erupcja CO<sub>2</sub> na przykład przez źle zabezpieczony otwór



Rys 1.1.17.5 Schemat scenariusza rozwoju zagrożenia.

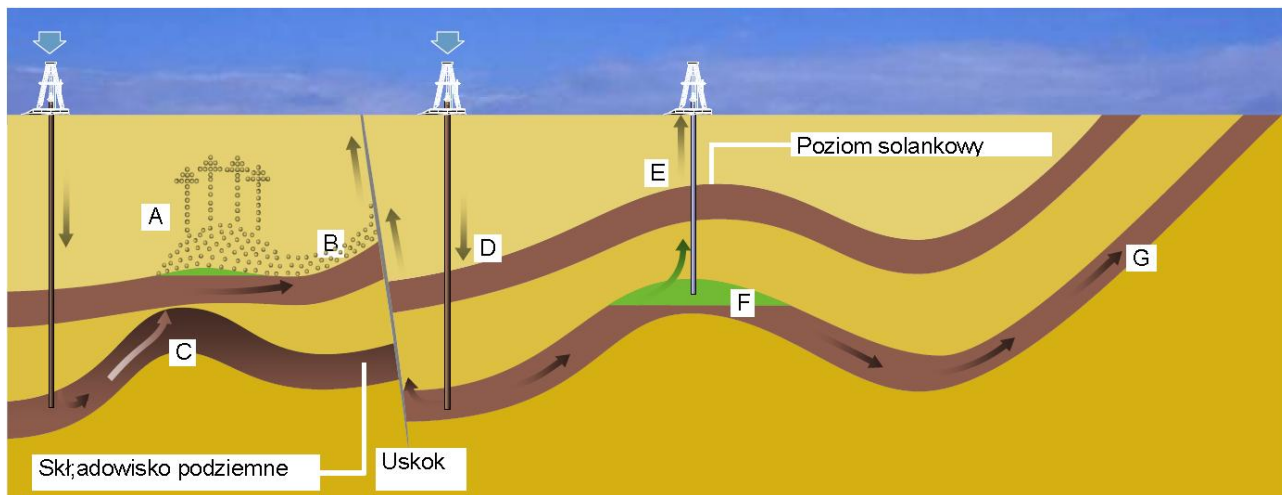
Metoda ta wymaga wyczerpującej wiedzy o składowisku i stosowania modeli logicznych, aby odpowiedzieć zadowalająco na to pytanie (zobacz też Risk assessment...TNO, 2006). Podstawowymi elementami postępowania w tym wypadku są:

1. Szczegółowe zapoznanie się z warunkami składowania CO<sub>2</sub>. Dla kompleksowej oceny bezpieczeństwa składowiska (Larsen et al., 2007) koniecznym jest uzyskanie i przeanalizowanie informacji obejmujących (wg Dyrektywy 2009/31/WE):

- a) geologii i geofizyk zbiornika;
- b) hydrogeologii (w szczególności występowanie pitnej wody gruntowej);
- c) inżynierii zbiornika (w tym wyliczenia wolumetryczne objętości porów dla celów zatłaczania CO<sub>2</sub> i ostatecznej pojemności składowania, warunków chemicznych i temperaturowych, zmian wartości ciśnienia w funkcji zatłaczania gazu do formacji, efektywnego współczynnika i czasu zatłaczania);
- d) geochemii (współczynniki rozpuszczalności, współczynniki mineralizacji);
- e) geomechaniki (przepuszczalność, ciśnienie szczelinowania);
- f) sytuacji sejsmicznej (oceny potencjału indukowanych wstrząsów);
- g) obecności i stanu naturalnych i antropogenicznych dróg, które mogłyby stanowić drogi wycieków.

2. Identyfikacja "zdarzeń inicjujących" tj. tych zdarzeń, które mogą zapoczątkować scenariusz wypadku. Ogólnie wszystkie zdarzenia początkujące mogą być podzielone na dwie główne klasy: zdarzenia "wewnętrzne" i zdarzenia "zewnętrzne". Zdarzenia wewnętrzne to te, które wynikają z niesprawnego funkcjonowania, ewentualnie uszkodzenia pojedynczego elementu składowiska lub całego systemu. Wskazują na to błędy obsługi operatorskiej, monitoringu zagrożenia itp. lub zdarzenia zewnętrzne spowodowane są przez inne przyczyny, komplementarne do ww. W związku z wagą właściwego wyboru zdarzeń początkujących dla ich wyznaczenia stosuje się różnorodne procedury formalne systematycznej selekcji. Jej pierwszym krokiem jest określenie niepożądanego skutku, jakim jest uwolnienie (ucieczka) CO<sub>2</sub> ze składowiska. Drugim krokiem jest identyfikacja wszystkich

możliwych rodzi się ucieczek CO<sub>2</sub> na obszarze analizowanego składowiska. Trzecim krokiem jest określenie stanów eksploatacyjnych obiektu, które wpłyną na wielkość uwalniania. Czwarty krok to ustalenie wszystkich "barier" zabezpieczających przed uwolnieniem substancji niebezpiecznych z ich potencjalnych rodzi się. Na końcu ustala się możliwe mechanizmy naruszenia tych barier. Przykłady zdarzeń inicjujących ucieczki CO<sub>2</sub> ze składowiska przedstawione zostały na Rys. 1.1.17.6.



Rys. 1.1.17.6 Mechanizm potencjalnych ucieczek zatłoczonego do górotworu CO<sub>2</sub>.

A. Ciśnienie CO <sub>2</sub> przewyższa ciśnienie kapilarne w górotworze i następuje wypływ poprzez mułowce i piaskowce drobnoziarniste	B. Uwolnione CO <sub>2</sub> przedostaje się z A do wyższych poziomów solankowych wzdłuż uskoku	C. CO <sub>2</sub> przedostaje się poprzez szczelinę w górotworze do wyższych poziomów solankowych	D. Zatłaczane CO <sub>2</sub> migruje w górę na skutek przekroczenia ciśnienia przepuszczalności uskoku	E. CO <sub>2</sub> wydostaje się poprzez źle uszczelniony nieczynny otwór	F. Naturalny przepływ wody rozpuszcza CO <sub>2</sub> i transportuje go na zewnątrz zamknięcia	G. Rozpuszczone CO <sub>2</sub> wydostaje się do atmosfery
--	--	---	--	--	---	---

#### Środki zaradcze

A. Wypompować i oczyszczać wodę gruntową	B. Wypompować i oczyszczać wodę gruntową	C. Usunąć CO <sub>2</sub> i zatłoczyć w gdzie indziej	D. Zmniejszyć ciśnienie lub szybkość zatłaczania	E. Uszczelnić otwór poprzez zacemowanie	F. Przechwycić i ponownie zatłoczyć CO <sub>2</sub>	G. Przechwycić i ponownie zatłoczyć CO <sub>2</sub>
---	---	--	---	--	--	--

3. Analiza możliwych konsekwencji dla środowiska na skutek niekontrolowanego uwolnienia si dwutlenku w głąb. Zadaniem jest przygotowanie konstrukcji odpowiednich modeli logicznych (zwykle drzew zdarzeń - Gerstenberger et al., 2008), które wyrażają odpowiedzi obiektu poprzez możliwe warianty progresji zdarzeń. Progresja zdarzeń jest zdefiniowana jako ciąg kolejno po sobie następujących zdarzeń po zdarzeniu początkowym. W przypadku ucieczki CO<sub>2</sub> decydujące znaczenie na zakres skutków mają warunki pogodowe i topografia terenu. W tym przypadku

funkcje bezpieczeństwa są wyrażone w kontekście działań, które muszą zostać podjęte i zrealizowane w ramach procesu zapobiegania skutkom nieprzewidzianych ucieczek CO<sub>2</sub>. Zdefiniowane są trzy główne rodzaje podejmowanych działań, które tworzą tzw. warstwy ochronne:

- zapobieganie,
- kontrolowanie,
- ograniczanie.

Tabela 1.1.17.2 Zdefiniowane obszary działań.

Warstwa	Rodzaj działania	Uwagi
I. Zapobiegania	- Staranny dobór składowiska - Określenie prawdopodobnych dróg ucieczek CO <sub>2</sub> ze składowiska, konstrukcyjnymi i eksploatacyjnymi	- Ocena oddziaływania na środowisko.
II. Ochrony	- System monitoringu - Działanie operatora	- Wysoka niezawodność systemu
III. Minimalizacji skutków	- System jeden telefon - Skuteczny system ratownictwa	- Dobra komunikacja ze społeczeństwem - Umowy z PSP i własne brygady ruchome z helikopterem

### Charakterystyka ryzyka geologicznego dla formacji ostrowieckiej

Najważniejsze z punktu widzenia bezpieczeństwa geologicznego składowania dwutlenku węgla w formacji ostrowieckiej zidentyfikowane i przeanalizowane zagrożenia przedstawione zostały w tabeli poniżej (Tab. 1.1.17.3; wg. Quintessa FEP database, „Best practice”, Chadwick et al., 2008).

Tabela 1.1.17.3 Ocena skutków najważniejszych zagrożeń dla formacji ostrowieckiej ("Mapa" ryzyka)

Właściwości zbiornika	Charakterystyka	Zagrożenie	Uwagi
Miśczo	W strefach bocznych miśczo waha się w granicach 55-63 m jednak w szczycie struktury maleje do jedynie 15 m (Zaosię 1)	Zgodnie z zaleceniami miśczo kolektora powinna wynosić powyżej 30m; wskanikiem negatywnym jest miśczo poniżej 20m	Bezpośrednim uszczelnieniem dla tego poziomu zbiornikowego są ilaste utwory formacji gielniowskiej o znacznej miśczości w szczytowych i pionowych partiach antykliny Budziszewic (do 98 m).
Hydrogeologia	Magazynowanie na głębokościach nieco poniżej 800m	Możliwość migracji do wód o wyższych horyzontach ze względu na zbliżenie do wody głębszej	Zagrożenie minimalizowane poprzez obecność podwójnej izolacji (drugi kolektor z nadkładem)
Właściwości warstw izolujących	Charakterystyka	Zagrożenie	Uwagi
Nadkład	Ilaste utwory formacji	ścienienie na powierzchni zachowanie	Przy przejściu do fazy

	gielniowskiej	struktury; mi szo poni ej zak adanej dla poziomów uszczelniaj cych (ok. 35m, zamiast 50 m)	operacyjnej niezbd ny dodatkowy monitoring w obr bie cienia nadk adu kolektora
Nadk ad	Ilaste utwory formacji gielniowskiej, formacja drzewicka, formacja ciechoci ska	Ewentualne zagro enie spowodowane przerwaniem ci g e ci nadk adu formacji kolektora, minimalizowane jest poprzez obecno w wy szych warstwach kolektora w formacji drzewickiej	Przy ocenie ryzyka dla kolektora formacji drzewickiej nale y uwzgl dni ewentualne jego zasilanie przez CO2 z kolektora formacji ostrowieckiej
Uskoki	Uskok w triasie na wschód od otworów Buków-1 i Buków-2	brak	Wg sejsmiki nie obejmuje jury
<b>Uwarunkowania antropogeniczne</b>	<b>Charakterystyka</b>	<b>Zagro enie</b>	<b>Uwagi</b>
Lokalizacja otworów wiertniczych	Wyst powanie w obr bie formacji wiertniczych	Niew e ciwe uszczelnienie - potencjalne drogi migracji CO2	Przy przej ciu do fazy operacyjnej niezbd na jest kontrola stanu likwidacji (uszczelnienia) otworów
Dzia lno eksploatacyjna	Brak	Brak	
<b>Warunki zat aczania</b>	<b>Charakterystyka</b>	<b>Zagro enie</b>	<b>Uwagi</b>
Nadci nienie	Wyniki symulacji i modelowa dynamicznych zat aczania	Ci nienie CO2 przewy sza ci nienie kapilarne w górotworze	Z przeprowadzonych symulacji wynika i mimo wyst puj cych ogranicze spowodowanych wysoko ci ci nienia hydrostatycznego brak jest przes eunek do rozszczenia struktury. Szczególn uwag (wg wyników modelowania) nale y zwróci na zmiany ci nienia przy otworach zat aczaj cych po kilkudziesi ciu latach zat aczania

### Scenariusze rozwoju zagro e zwi zanych z wydostawaniem si CO2 do atmosfery

Zgodnie z opisan powy ej metodologi opracowano szereg scenariuszy rozwoju niebezpiecznych zdarze zwi zanych z mo liwo ci uwolnienia si ze sk adowiska CO2.

W ka dym scenariuszu uwzgl dniono nast puj ce czynniki zewn trzne maj ce wp yw na wielko skutków:

- ilo uwolnionej substancji
- rodzaj terenu (g sto zabudowy, blisko akwenów wodnych)
- pora roku i dnia ó temperatura powietrza
- pr dko wiatru,
- wilgotno powietrza.

Za e one zosta e nast puj ce poziomy st ze CO2:

- 1000 ppm st zenie akceptowalne,
- 5000 ppm st enie dopuszczalne,
- 2000 ppm st enie niedopuszczalne



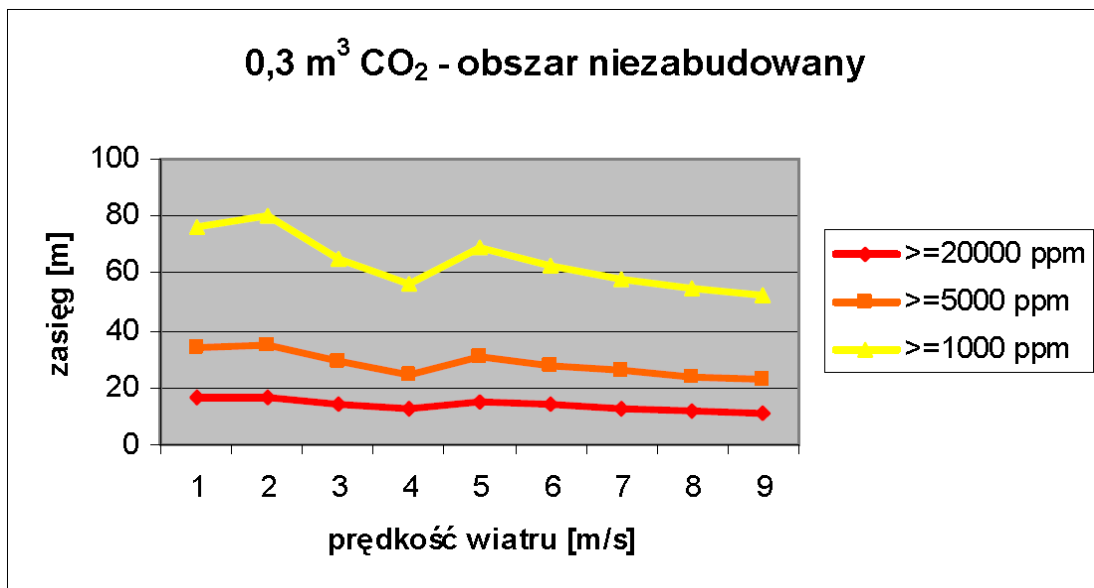
Korzystając z ogólnie dostępnego programu ALOHA przeprowadzona została szczegółowa analiza rozwoju zdarzenia po punktowej ucieczce CO<sub>2</sub> z górotworu.

Przyjmujemy następujące założenia:

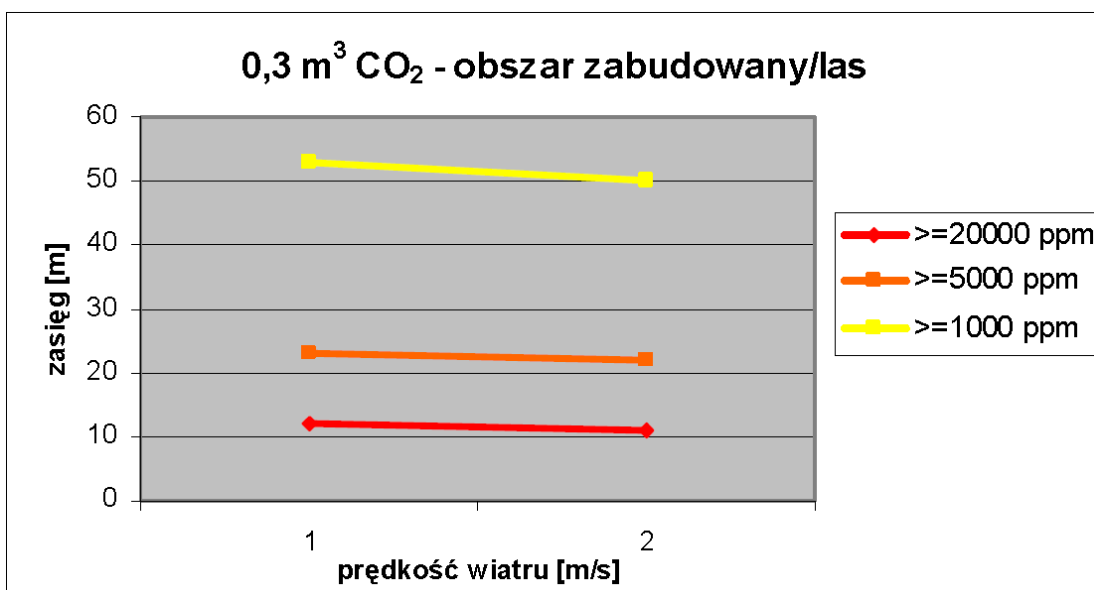
- rodzaj wypływu CO<sub>2</sub> – miejscowy,
- rodzaj terenu – otwarta przestrzeń,
- prędkość wiatru – zmienna w granicach od 1 m/s do 9 m/s,
- wielkość emisji – 0,1 m<sup>3</sup>/s do 0,3 m<sup>3</sup>/s.

Dla maksymalnej emisji CO<sub>2</sub> równej 0,3 m<sup>3</sup>/s (tzn. ponad 2 tony/godzin) dokonano podobnych analiz dla obszaru zabudowanego oraz wodnego. Zbiornicze wykresy przedstawione zostały na rysunkach 5,6 i 7.

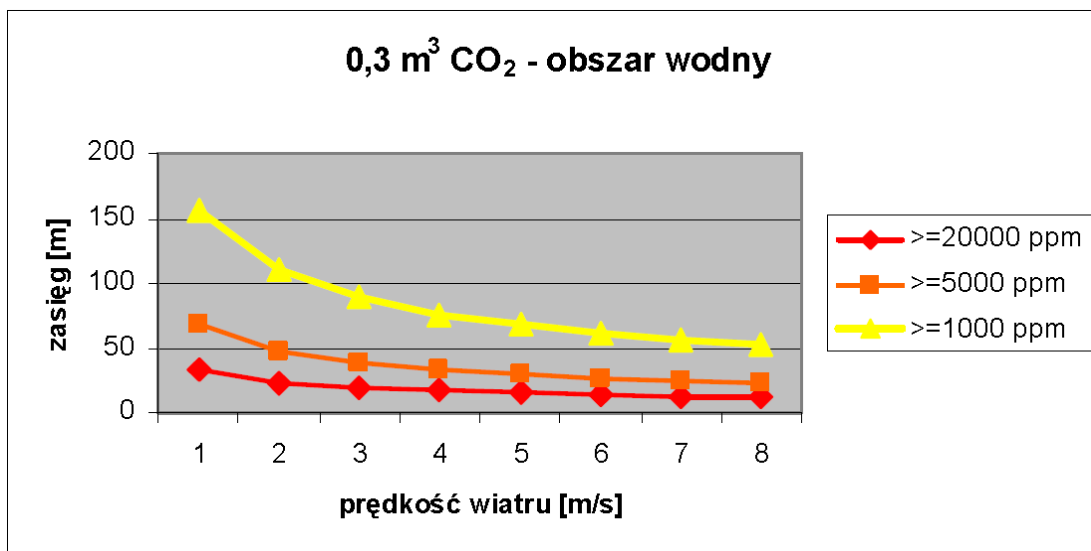
Nie analizowano zjawisk katastroficznych, jak np. erupcja CO<sub>2</sub> oraz sytuacji kumulowania się CO<sub>2</sub> w zagłębieniach terenu.



Rys. 1.1.17.7 Zasięgi stężenia CO<sub>2</sub> w terenie niezabudowanym w przypadku emisji 0,3 m<sup>3</sup>/s CO<sub>2</sub>.



Rys. 1.1.17.8 Zasięgi stężenia CO<sub>2</sub> w terenie zabudowanym w przypadku emisji 0,3 m<sup>3</sup>/s CO<sub>2</sub>.



Rys. 1.1.17.9 Zasięgi stężenia CO<sub>2</sub> na obszarze wodnym w przypadku emisji 0,3 m<sup>3</sup>/s CO<sub>2</sub>.

1. Składowanie dwutlenku w głą w formacjach geologicznych niesie za sobą ryzyko niekontrolowanego wydostania się gazu poza zbiornik, co może być wynikiem przenikania przez warstwowe struktury geologiczne wskutek różnic ciśnienia pomiędzy gazem a otaczającymi formacjami geologicznymi, przenikaniem przez szroty nieoświadczonymi strukturami białymi przez wykonane w trakcie realizacji otwory wiertnicze. Analiza i ocena ryzyka geologicznego składowania dwutlenku w głą uwzględnia musi wszystkie możliwe drogi migracji dwutlenku w głą w zależności od warunków petrofizycznych i termodynamicznych oraz zastosowane w fazie projektowania i wykonania rozwiązania techniczne zapobiegające i kontrolujące to zagrożenie, a ponadto winna uwzględniać wyniki przeprowadzonych badań i analiz geofizycznych i geologicznych, charakterystyk hydrogeologicznych formacji wodonośnych i geochemicznych pędów złowych z uwzględnieniem reakcji CO<sub>2</sub> ze skałami i solankami.

2. Analiza i ocena ryzyka przedmiotowej formacji przeznaczonej do geologicznego składowania dwutlenku w głą nie wykazała znacznych zagrożeń mogących spowodować ucieczki gazu poza zbiornik. Wynika to z faktu iż formacja ostrowiecka posiada dobrane warunki uszczelniające a dodatkowo bezpośrednio nad warstwą nadkładu zalega drugi z analizowanych kolektorów. Można więc założyć, że ewentualne przerwanie szczelności zbiornika spowoduje migrację CO<sub>2</sub> do kolektora formacji drzewickiej.

3. Dużym utrudnieniem w przedmiotowej analizie jest niewystarczająca ilość danych niezbędnych do jej wykonania. Wynika to z faktu równoległej realizacji poszczególnych zadań w zakresie charakterystyki formacji przeznaczonej do składowania. W związku z tym w przypadku przejścia projektu do fazy realizacji koniecznym jest ponowne przeprowadzenie oceny uwzględniającej ostateczne wyniki przeprowadzonych badań i analiz.

4. W oparciu o wpływ stężenia CO<sub>2</sub> w powietrzu na organizm człowieka, faunę i florę oraz dane literaturowe określono kryteria szacowania ryzyka oraz wielkości graniczne dla stężeń akceptowalnych, dopuszczalnych i niedopuszczalnych.;

- <1000 ppm stężenie akceptowalne,
- 5000 ppm stężenie dopuszczalne,
- >5000 ppm do 20000 ppm stężenie tolerowalne ale w krótkim okresie czasu,
- >20000 ppm stężenie niedopuszczalne.

5. Korzystając z programu ALOHA przeprowadzona została szczegółowa analiza szeregu scenariuszy rozwoju zdarzenia po miejscowej ucieczce CO<sub>2</sub> z górotworu. Z analizy tej wynika, że duże stężenia, wyższe od dopuszczalnych, występują tylko w bezpośrednio bliskim odległości od źródła emisji

CO<sub>2</sub>. Zasięg strefy podwyższonych stężeń, w granicach dopuszczalnych, rozciąga się do 100m w przy czym najwyższe stężenia występują przy wiatrach o prędkości do 4 m/s. Większe zagrożenie dla fauny i flory stanowi możliwość utrzymywania się CO<sub>2</sub> w zagłębieniach terenu.

6. Akwenty wodne sprzyjają rozprzestrzenianiu się chmury CO<sub>2</sub> a ponadto rozpuszczony w wodzie dwutlenek węgla powoduje zakwaszenie wody co prowadzi do zamierania życia.

## **Ocena ryzyka składowania CO<sub>2</sub> w tym opis potencjalnych zagrożeń i wyciekami CO<sub>2</sub> i migracji solanki (INiG)**

Podziemne struktury geologiczne wykorzystywane są na wiecie do magazynowania gazu ziemnego od 1915 roku. Należy podkreślić, że struktury solankowe przeznaczone do składowania dwutlenku węgla różni się od złóż gazu ziemnego tym, że ich szczelność nigdy wcześniej nie była sprawdzana. W związku z tym, najważniejszy etap możliwości składowania CO<sub>2</sub> w podziemnej strukturze polega na sprawdzeniu szczelności całej pułapki, w której projektuje się magazynować gaz. Etap ten polega na kompilacji wszystkich dostępnych danych (wiertniczych, sejsmicznych, geofizycznych, eksploatacyjnych i laboratoryjnych) w celu potwierdzenia przydatności struktury do składowania CO<sub>2</sub>. W oparciu o wymienione dane wykonano mapę stropu oraz mierszości warstwy uszczelniającej potencjalne poziomy magazynowe. Wykonane mapy były konieczne do oceny szczelności skał uszczelniających. W następnej kolejności dokonano analizy czynników ryzyka geologicznego składowania CO<sub>2</sub> w warstwach jury i triasu. W pracy przedstawiono również opis ryzyka związanego z ewentualnymi ucieczkami dwutlenku węgla, w tym ocenę wpływu ucieczek dwutlenku węgla na ludzi, zwierzęta i rośliny.

### **Identyfikacja czynników ryzyka składowania CO<sub>2</sub> w solankowych poziomach struktury zawodnionej Budziszewice-Zaosie**

Głównym celem podziemnego składowania CO<sub>2</sub> jest ograniczenie wpływu działalności ludzkiej na zmiany klimatyczne poprzez redukcję emisji dwutlenku węgla do atmosfery. Magazynowanie CO<sub>2</sub> w głębokich strukturach solankowych jest stosunkowo nową technologią. Podziemne magazynowanie gazów wymaga wytypowania odpowiedniej struktury geologicznej. Podstawowym problemem związanym z wyborem takiej struktury jest niewielka ilość danych. Bazując na skąpych danych bardzo trudno jest jednoznacznie ocenić przydatność struktury do magazynowania CO<sub>2</sub>. Jednakże bez względu na posiadane dane każda analizowana struktura powinna spełniać minimum podstawowych kryteriów koniecznych do jej konwersji na podziemne składowisko dwutlenku węgla. Podstawowym kryterium, które musi spełnić wytypowana struktura jest jej szczelność, odpowiednie zamknięcie pułapki oraz szczelność skał nadkładu (skał uszczelniających warstwy magazynowe od góry). Należy pamiętać, że szczelność struktury zawodnionej, w porównaniu do złóż ropy naftowej i gazu ziemnego nigdy nie była sprawdzona. O ile struktury, w których powstały złóża w głowodorów są szczelne, o tyle nie mamy bezpośredniego dowodu na to, że struktura zawodniona będzie szczelna po zatłoczeniu do niej CO<sub>2</sub>. Należy pamiętać, że zatłoczenie CO<sub>2</sub> do wytypowanych warstw wymaga przekroczenia ciśnienia hydrostatycznego, co samo w sobie niesie ryzyko rozszczelnienia pułapki. Niestety mała ilość danych związana jest również z analizą ryzyka składowania CO<sub>2</sub> w strukturze Budziszewice-Zaosie. Dane z analizowanej struktury pozwalają jedynie na wstępne określenie jej szczelności. Należy pamiętać o tym, że parametr ten wymaga dalszych szczegółowych badań (co byłoby możliwe w ramach monitoringu zerowego).

Zarządzanie ryzykiem geologicznego składowania CO<sub>2</sub> w poziomach solankowych struktury Budziszewice-Zaosie jest trudne ze względu na małą ilość danych. Oszacowanie ryzyka podziemnego składowania CO<sub>2</sub> jest bardzo ważne, gdy w przypadku rozszczelnienia struktury lub braku szczelności może dojść do skażenia środowiska powierzchniowego jak i podziemnego (zasobów wody pitnej).

W celu prawidłowego zdefiniowania ryzyka składowania CO<sub>2</sub> w poziomach solankowych struktury Budziszewice autorzy opracowania wykorzystali bazę wiedzy Quintessa FEP (Features - cech, Events - o zdarzeń i Processes - o procesów). Baza zawiera informacji na temat około 200 czynników związanych z ryzykiem podziemnego składowania CO<sub>2</sub>. Bezpośredni dostęp do bazy można uzyskać na portalu [www.quintessa.org](http://www.quintessa.org). Czynniki FEP zostały wybrane pod

k tem bezpiecze stwa d egotrwa ego sk adowania dwutlenku w gla w strukturach podziemnych. Baza posiada struktur hierarchiczn , w ktorej wszystkie czynniki zosta y zgrupowane w osiem kategorii, ponumerowanych od 0 do 7. Kolejne grupy czynników ryzyka zawieraj :

- 0 - parametry dotycz ce podstaw, za e i zakresu analizy ryzyka,
- 1 - czynniki zewn trzne, geologiczne, klimatyczne oraz aktywno ludzk ,
- 2 - dane zwi zane bezpo rednio z magazynowaniem CO<sub>2</sub> w strukturze podziemnej,
- 3 - parametry zwi zane z chemicznymi w asno ciami dwutlenku w gla oraz z jego transportem,
- 4 - opis geosfery ca ego systemu magazynowania, w czaj c w to geologi , hydrogeologi i geochemi ,
- 5 - dane zwi zane z odwiertami, wyst puj cymi i planowanymi do odwiercenia na strukturze,
- 6 - parametry dotycz ce rodowiska szprzypowierzchniowego,
- 7 - opis wp ywu sk adowania CO<sub>2</sub> na ludzi, faun i flor .

W tabeli **1.1.17.4** przedstawiono opis poszczególnych czynników ryzyka zgodny ze schematem zaproponowanym w bazie Quintessa FEP.

Przedstawiony opis czynników ryzyka sk adowania CO<sub>2</sub> w strukturze Budziszewice-Zaosie pozwala na wyselekcjonowanie parametrów, które na tle obecnie posiadanej wiedzy mog mie negatywny wp yw na podj cie decyzji zwi zanej z uruchomieniem inwestycji sk adowania. Do czynników, które mog stworzy najwi ksze ryzyko nale y zaliczy szczelno struktury oraz wp yw ewentualnej ucieczki (migracji CO<sub>2</sub>) na ludzi, zwierz ta i ro liny.

W wypadku, gdy struktura jest stosunkowo wysok antyklin to szczelno struktury zale y g lwnie od szczelno ci ska enadk adu le cych bezpo rednio nad warstwami magazynowymi. Struktura Budziszewice posiada dwa potencjalne horyzonty magazynowe, jur doln i trias dolny. W zwi zku z tym, e poziom triasu posiada znacznie gorsze parametry od poziomu jurajskiego oraz prognozowane ci nienie sk adowania przekracza o 37% ci nienie hydrostatyczne, to zdecydowano si przeprowadzi analiz szczelno ci ska enadk adu dla warstw jurajskich. Nale y podkre li , e przeprowadzenie analizy nadk adu dla warstw jurajskich nie wyklucza mo liwo ci sk adowania CO<sub>2</sub> w warstwach triasu, jednak e analiza szczelno ci nadk adu dla triasu powinna obejmowa badania laboratoryjne wykonane na rdzeniach. Powinno okre li si ci nienie graniczne, powy ej ktorego nadk ad zaczyna przepuszcza sk adowane CO<sub>2</sub>.

Tab.1.1.17.4 Opis czynników ryzyka (baza Quintessa FEP).

FEP kategoria	FEP klasa	FEP	Przeegl d czynników
0. Podstawy analizy ryzyka	0.1 Cel analizy		Ocena ryzyka podziemnego sk adowania CO <sub>2</sub> w warstwach zawodnionych struktury Budziszewice-Zaosie. Sk adowany CO <sub>2</sub> b dzie emitowany przez elektrowni Be chatów.
	0.2 Docelowe punkty zainteresowania		Zidentyfikowanie ryzyka nieszczelno ci struktury, wp ywu sk adowania na zanieczyszczenie warstw podziemnych i napowierzchniowych.
	0.3 Przestrzenny zakres analizy		Warstwy nadk adu (uszczelnienia) oraz obszary napowierzchniowe po one w pobli u struktury Budziszewice-Zaosie. Analiza ryzyka dotyczy terenów rolniczych oraz ma ych skupisk ludzkich. Struktura usytuowana jest w odleg ci oko o 7 km na p oloc od Tomaszowa Mazowieckiego.
	0.4 Zakres czasowy		200 lat



FEP kategoria	FEP klasa	FEP	Przebieg czynników
	badania		
	0.5 Założenia sekwencyjne		Analiza ryzyka jest przeprowadzona dla zadanego scenariusza magazynowania CO <sub>2</sub> wychwyconego z emisji elektrowni Bełchatów. Składowana ilość CO <sub>2</sub> podczas 25 lat zatłaczania będzie wynosiła 45 milionów ton (1,8 mln ton rocznie). CO <sub>2</sub> będzie zatłaczane do warstwy solankowej jury i triasu.
	0.6 Założenia dot. przyszłej działalności ludzkiej		Zakłada się, że odwierty zatłaczające zostaną zlikwidowane (zgodnie z wymogami obowiązującego prawa) po zakończeniu zatłaczania CO <sub>2</sub> . W związku z tym działalność ludzka zostanie ograniczona do monitorowania struktury.
	0.7 Aspekty prawne		Składowanie CO <sub>2</sub> w strukturze Budziszewice będzie spełniać wymogi: Prawa geologicznego i górniczego, Ustawy o ochronie środowiska i Prawa budowlanego. Inwestor musi posiadać prawo do własności terenu, na którym, zostaną zbudowane instalacje do zatłaczania CO <sub>2</sub> . Wymagana jest akceptacja społeczna dla całego przedsięwzięcia.
	0.8 Modele symulacyjne i dostępne dane		Struktura została odkryta odwiertami Buków-1, Buków-2, Zaosie-1, Zaosie-2, Zaosie-3 oraz Budziszewice IG-1. Słabe rozpoznanie sejsmiczne, w większości z lat 1970-tych oraz niewielka ilość danych w znaczącym stopniu utrudniają pełną analizę przydatności struktury zawodnionej Budziszewice do składowania CO <sub>2</sub> .
1. Czynniki zewnętrzne	1.1 Parametry geologiczne	1.1.1 Tektonika	W skrzydle SW struktury wyznaczono 3 naskoki o niewielkich zrzutach. Uskoki zaczynają się w cechszynie, kończą w triasie.
		1.1.2 Aktywność wulkaniczna	Nie występuje aktywność wulkaniczna.
		1.1.3 Trzęsienia ziemi	Nie występuje.
		1.1.4 Hydrotermiczna aktywność	Nie występuje aktywność hydrotermiczna.
		1.1.5 Wpływ hydrogeologii na zmiany geologiczne	Nie przewiduje się wpływu.
		1.1.6 Wpływ erozji na składowanie CO <sub>2</sub>	Nie przewiduje się wpływu erozji na składowanie.
		1.1.8 Uderzenie meteorytem	Zakłada się, że uderzenie meteorytem o takiej wielkości, która spowodowałaby rozszczelnienie struktury jest mało prawdopodobne.
	1.2 Czynniki klimatyczne	1.2.1 Globalna zmiana klimatu	Globalna zmiana klimatu nie wpływa na ryzyko składowania CO <sub>2</sub> w podziemnej strukturze.
		1.2.2	Nie będzie miało wpływu z powodów

FEP kategoria	FEP klasa	FEP	Przebieg czynników
		Regionalna i lokalna zmiana klimatu	opisanych w punkcie 1.2.1.
		1.2.3 Zmiana poziomu morza	Nie b dzie miać wpłwu.
	1.3 Przyszć aktywno ludzka	1.3.1 Wpłw człowieka na klimat	Działno ludzka prowadzi do emisji CO <sub>2</sub> , a co za tym idzie wpłwa na globalne ocieplenie
		1.3.2 Działno wiertnicza	Wykonywanie gębokich wierce w obszarze struktury jest mać prawdopodobne z powodu braku zasobów naturalnych. Pćtkie wiercenia hydrogeologiczne s mo liwe, jednak e nie osi gn one gęboko ci skądowania CO <sub>2</sub> , nie przewierc skaćuszczelniaj cych poziom magazynowy.
		1.3.3 Rozwój społecze stwa	Zmiany społeczne nie wpłyn na bezpiecze stwo skądowania CO <sub>2</sub> .
		1.3.4 Rozwój technologiczny	Rozwój technologiczny przyczyni si do lepszego monitoringu oraz do lepszego radzenia sobie z ewentualnymi ucieczkami CO <sub>2</sub> .
		1.3.5 Aktywno ludzka na powierzchni	Wyst puje mo liwo prac budowlanych, które narusz powierzhni terenu zlokalizowan nad struktur . Prace te nie b d miać wpłwu na warstwy zawodnione, w których przewiduje si skądowanie CO <sub>2</sub> .
		1.3.6 Wykorzystanie wody pitnej	Rozszczelnienie struktury mo e spowodowa ska enie wody pitnej. Jednak jest to mać prawdopodobne, gdy gęboko studni w wi kszo ci nie przekracza 100 m.
		1.3.7 Wpłw CO <sub>2</sub> na przyszć operacje geologiczne	Skądowanie CO <sub>2</sub> nie wpłnie na operacje geologiczne, poniewa w badanym obszarze nie wyst puj zasoby w glowodorów.
		1.3.8 Eksplzje i katastrofy	Ewentualne eksplozje i katastrofy nie b d miać wpłwu na gęboko poć one struktury solankowe.
2. Magazynowanie CO <sub>2</sub>	2.1 Przebieg zatćczania do zamkni cia projektu	2.1.1 Zać enie projektowe	Zatćczanie zostanie prowadzone 4 otworami do formacji jurajskich i triasowych. Zać enia zakądaj , e: 1. CO <sub>2</sub> b dzie skądowane w fazie ciekćj; 2. zatćczone CO <sub>2</sub> nie ųwyjdzieć poza pućpk .
		2.1.2 Pojemno skądowania, tempo zatćczania	Prognozuje si zatćczenie 1,8 mln ton CO <sub>2</sub> rocznie przez 25 lat czterema odwiertami co stanowi ućmek caćcowitej pojemno ci.
		2.1.3 Skąd zatćczanego CO <sub>2</sub>	Skąd zatćczanego gazu b dzie zgodny z normami.
		2.1.4 Harmonogram inwestycji	Na obecnym etapie harmonogram inwestycji nie jest znany.
		2.1.5 Monitoring skądowiska	Przewiduje si monitorowanie ci nie , szczelno ci odwiertów, skąd zatćczanego gazu. Mo liwe jest wykorzystanie geofizyki otworowej i powierzchniowej, w tym sejsmiki.

FEP kategoria	FEP klasa	FEP	Przebieg czynników
		2.1.6 Kontrola jakości zatłoczonego gazu	Wykorzystanie chromatografu do monitorowania jakości zatłoczonego CO <sub>2</sub> .
		2.1.7 Nieprzewidywane zdarzenia	Zatłoczenie będzie odbywać się zgodnie z procedurami przewidzianymi w Prawie geologicznym i górniczym, jednak należy powinno się przygotować plan działania na wypadek wystąpienia erupcji i nieuszczelnienia ciekawodowodów.
		2.1.8 Ciśnienie składowania	Ciśnienie składowania CO <sub>2</sub> przekraczające ciśnienie hydrostatyczne jest głównym czynnikiem ryzyka. Symulacje wykazały, że ciśnienie składowania w warstwach jurajskich przewyższy ciśnienie hydrostatyczne o około 20%, natomiast analogiczne przewyższenie dla triasu wyniesie około 37%.
	2.2 Operacje pozakonieczności zatłoczenia	2.2.1 Monitorowanie struktury	Monitorowanie geochemiczne.
		2.2.1 Awaryjne szczypanie zatłoczonego CO <sub>2</sub>	Istnieje możliwość awaryjnego szczypania zatłoczonego CO <sub>2</sub> poprzez odwiercenie dodatkowego odwiertu w szczycie struktury.
3. Wpływ i oddziaływanie CO <sub>2</sub>	3.1 Wpływ CO <sub>2</sub>	3.1.1 Fizyczne właściwości CO <sub>2</sub>	Zakłada się składowanie CO <sub>2</sub> w fazie ciekłej. Przeprowadzone symulacje wykazują, że po 200 latach CO <sub>2</sub> będzie w większości rozpuszczone w wodzie.
		3.1.2 Zachowanie się faz CO <sub>2</sub>	W przypadku jury istnieje prawdopodobieństwo wystąpienia fazy gazowej (lub ciekłej), ze względu na najwyższy punkt struktury wynoszący 775 m.
		3.1.3 Rozpuszczalność CO <sub>2</sub>	Określono wg. danych laboratoryjnych oraz symulacji.
	3.2 Wpływ CO <sub>2</sub> na strukturę	3.2.1 Wpływ ciśnienia składowania na skałki uszczelniające nadkład	Symulacje wykazały, że podczas składowania CO <sub>2</sub> ciśnienie maksymalne w jurajskim horyzoncie magazynowym przekroczy ciśnienie hydrostatyczne o 20%. Dużo większe ryzyko rozszczelnienia istnieje ze składowaniem CO <sub>2</sub> w triasie, gdzie przewyższenie wyniesie 37%. Biorąc pod uwagę do wiadomości uzyskane z magazynowania gazu ziemnego w strukturach zawodnionych, to ciśnienie w jurze nie powinno wpłynąć na szczelnoskałki uszczelniających. Natomiast szczelnoskałki uszczelniających warstw triasu powinna zostać przeanalizowana szczegółowo. Szczelnoskałki nadkładu powinna zostać potwierdzona poprzez badania przeprowadzone na rdzeniach, zarówno dla jury jak i triasu.
		3.2.2. Wpływ ciśnienia składowania na pęny złowe	Przekroczenie ciśnienia hydrostatycznego spowoduje wyparcie solanki z części struktury w wyniku ciśnienia oraz rozpuszczenie się CO <sub>2</sub> w solance.
		3.2.3 Reakcje z wglowodorami	Bazując na aktualnym rozpoznaniu geologicznym należy stwierdzić, że w rejonie składowania CO <sub>2</sub> nie występują wglowodory.
		3.2.4	Bazując na rezultatach symulacji można

FEP kategoria	FEP klasa	FEP	Przeegl d czynników
		Wypieranie solanki ze struktury	stwierdzi , e wypierana solanka nie osi gnie powierzchni ziemi.
		3.2.5 Wywołanie ruchów sejsmicznych	Nie stanowi realnego zagro enia.
		3.2.6 Podniesienie lub opadnie terenu	Ze wzgl du na ma ilo ci zat aczanego CO <sub>2</sub> nie stanowi realnego zagro enia.
		3.2.7 Wpew temperatury na stref z ow	Podwy szona temperatura zat aczanego CO <sub>2</sub> mo e wpyn na rozpuszczanie si ska w strefie przyodwiertowej prowadz c do zwi kszenia porowato ci w strefie przyodwiertowej.
		3.2.8 Reakcje CO <sub>2</sub> z barierami chemicznymi	Nie analizowano.
		3.2.9 Zanieczyszczenie metalami ci kimi	Istnieje ryzyko zanieczyszczenia metalami ci kimi warstwy przeznaczonej do sk adowania CO <sub>2</sub> .
		3.2.10 Rozpuszczanie minera ow	Istnieje mo liwo rozpuszczenia minera ow, jednak e wg literatury jest to problem marginalny (i w perspektywie setek lat).
		3.2.11 Wymiana jonów	Dyfuzja przez ska uszczelniaj ce nadkad jest mo liwa jej efekt nie by badany w bie cym opracowaniu.
		3.2.12 Sk ad chemiczny zat aczanego gazu	Dok adny sk ad chemiczny zat aczanego gazu obecnie nie jest znany.
		3.2.13 Tworzenie si hydratów gazowych	Problem nie by analizowany.
		3.2.14 Procesy mikrobiologiczne	Nie analizowano
4. Geosfera	4.1 Geologia	4.1.1 Lokalizacja	Struktura Budziszewice -Zaosie po ona jest 7 km na p onocny-zachód od Tomaszowa Mazowieckiego w województwie dskim.
		4.1.2 Zasoby naturalne	Nie wyst puj w najbli szym otoczeniu struktury.
		4.1.3 Typ ska y zbiornikowej	Piaskowce formacji drzewickiej (górnj pliensbach-jura dolna) o mi szosci od 43m do 146m, ostrowieckiej (synemur) podobnie.
		4.1.4 Geometria zbiornika	Antyklina
		4.1.5 Aktualna eksploatacja ska y zbiornikowych	Wytypowane warstwy jurajskie i triasu nie s eksploatowane.
		4.1.6 Formacje uszczelniaj ce od góry	I owce, mu owce i py owce formacji ciechoci skiej o mi szo ci od kilkadziesi ciu do stukiludziesi ciu metrów.
		4.1.7 Dodatkowe uszczelnienie	Na skrzyd ach antykliny bezpo rednio nad kolektorem wyst puj ska y ilasto-mu owcowe o mi szo ci 10-15m.
		4.1.8 Litologia	Poziom magazynowy sk ada si z piaskowców rednioziarnistych o wielko ci ziarn kwarcu

FEP kategoria	FEP klasa	FEP	Przebieg czynników
			0,27-0,30 mm.
		4.1.8.1 Diagenеза	Piaskowce zawieraj ładowe ilo ci spoiwa ilastego typu matriks oraz niewielkie ilo ci cementu kwarcowego i w glanowego.
		4.1.8.2 Struktura porowato ci	Piaskowce jury rednioziarniste o dobrej porowato ci od 13% do 27%. Piaskowce triasu s łba porowato od kilku do kilkunastu procent.
		4.1.9 Niejednorodno	Zbiornik magazynowy jest w miar jednorodnie wykszta cony pod wzgl dem w asno ci kolektorskich na ca cm obszarze struktury.
		4.1.10 Uskoki, szczeliny	W skrzydle SW struktury wyznaczono 3 uskoki o niewielkich zrzutach. Uskoki zaczynaj si w cechszynie, ko cz w triasie. Uskoki nie stanowi zagro enia dla magazynowania CO <sub>2</sub> w warstwach jurajskich.
		4.1.11 Nieudokumentowane zagro enia	Na obecnym etapie rozpoznania struktury brak jest danych pozwalaj cych na przewidywanie nieudokumentowanych zagro e .
		4.1.12 Pionowy gradient geotermiczny	Temperatura warstw jurajskich jest obni ona w stosunku do g łboko ci zalegania (lokalnie niski gradient geotermiczny).
		4.1.13 Ci nienie wyst puj ce w ska łach zbiornikowych	Przewiduje si , e ci nienie w warstwach zbiornikowych jest zgodne z ci nieniem hydrostatycznym.
		4.1.14 Mechaniczne w asno ci ska ł zbiornikowych	W obecnej analizie nie by ł badane mechaniczne w asno ci ska ł zbiornikowych, poza ci nieniem progowym dla nadk łdu.
		4.1.14 W asno ci petrofizyczne	Wyrwykowe dane rdzeniowe (u yte do kalibracji krzywych geofizyki wiertniczej) nie pozwalaj na precyzyjne okre lenie przestrzennego rozk łdu parametrów petrofizycznych.
	4.2 P enny z ł owe	4.2.1 W asno ci p enn ł owych	W warstwach jurajskich wyst puje solanka o niewielkiej mineralizacji, rz du 10 mg/l.
		4.2.2 Hydrogeologia	Niewielka ilo bada hydrogeologicznych nie pozwala na precyzyjne okre lenie parametrów.
		4.2.3 W glowodory	Nie wyst puj , bior c po uwag negatywne wyniki poszukiwa .
5. Odwierty	5.1 Wiercenie i konstrukcja	5.1.1 Likwidacja odwiert ł w zat łczaj cych	Odwierty zat łczaj ce zostan zlikwidowane zgodnie z obowi zuj cymi procedurami.
		5.1.2 Konstrukcja i wyposa enie odwiert ł w	Konstrukcja i wyposa enie odwiert ł w zat łczaj cych b dzie zgodna z wymogami prawa. Odwierty zostan wyposa one w zawory wg łbne.
		5.1.3 Rekonstrukcje odwiert ł w	Nie planuje si na obecnym etapie.
		5.1.4 Odwierty	Planuje si wykonanie odwiert ł w obserwacyjnych w przepuszczalnych



FEP kategoria	FEP klasa	FEP	Przeegl d czynników
		obserwacyjne	warstwach znajduj cych si powy ej warstw uszczelniaj cych poziom zbiornikowy.
	5.2 Szczelno i likwidacja odwiertów	5.2.1 Likwidacja odwiertów	Odwierty zostan zlikwidowane poprzez zapi cie korka mechanicznego i wykonanie korka cementowego.
		5.2.2 Rozszczelnienie odwiertu	Wyst puje ryzyko rozszczelnienia odwiertu w wyniku s abego stanu zacementowania rur ok adzinowych. W takiej sytuacji mo e doj do powolnej ucieczki CO <sub>2</sub> .
		5.2.2 Erupcje	Wyst pienie erupcji jest ma e prawdopodobne.
		5.2.3 Ruchy górotworu	Prawdopodobie stwo wyst pienia ruchów górotworu, które spowodowa by zniszczenie szczelno ci odwiertów jest marginalne.
6. rodowisko poziemne i naziemne	6.1 rodowisko naziemne	6.1.1 Topografia i morfologia	Ewentualne zmiany topograficzne i morfologiczne nie b d mia e wp ywu na g e boko zmagazynowane CO <sub>2</sub> .
		6.1.2 Ziemia i osady	Ziemia mo e zosta zanieczyszczona w wyniku ewentualnego rozszczelnienia si magazynu.
		6.1.3 Erozja ziemi	Erozja nie b dzie mia e wp ywu na podziemne sk adowanie CO <sub>2</sub> .
		6.1.4 Atmosfera i meteorologia	Zmiany meteorologiczne nie b d mia e wp ywu na poziomy magazynowe.
		6.1.5 Hydrogeologia	Zmiany hydrogeologiczne nie b d mia e wp ywu na poziomy zbiornikowe.
		6.1.6 Przypowierzchniowe warstwy wodono ne	Nie przewiduje si ucieczek CO <sub>2</sub> , jednak e je li wyst pi e by to istnieje ryzyko zanieczyszczenia tych wód.
		6.1.7 Przypowierzchniowa flora i fauna	rodowisko flory i fauny mo e zosta zagro one tylko w wyniku erupcji (awarii). Ma e ucieczki CO <sub>2</sub> nie stanowi realnego zagro enia.
	6.2 Zachowanie si ludzi	6.2.1 Charaktery ludzi	Sk adowanie nie wp e nie na zachowanie si ludzi.
		6.2.1 Dieta, od ywanie	Nie ma wp ywu.
		6.2.2 Styl ycia	Istnieje ryzyko zwi zane z protestami ludzi przeciwko budowie podziemnego sk adowiska CO <sub>2</sub> w poblizu miejsca zamieszkania.
		6.2.3 Korzystanie z gruntów i wody	Nie ma wi ksze go znaczenia, gdy teren ochronny wok ódwiertów jest niewielki.
		6.2.4 Budynki	Budynki zwi zane z infrastruktur potrzebne do sk adowania CO <sub>2</sub> b d wykonane zgodnie z prawem budowlanym.
7. Wp yw inwestycji	7.1 W e sno ci systemu sk adowania	7.1.1 Utrata szczelno ci	Magazyn zostanie zaprojektowany z za e eniem pe nej szczelno ci ca e go systemu sk adowania. Za e enie to jest poprawne gdy obecnie funkcjonuje oko e 100 podziemnych magazynów gazu ziemnego wykonanych w warstwach wodono nych zlokalizowanych na g e boko ci od 500 do

FEP kategoria	FEP klasa	FEP	Przebieg czynników
			1500 m.
	7.2 Wpływ na środowisko fizyczne	7.2.1 Zanieczyszczenie wód gruntowych	Mając prawdopodobne, jednak nie istnieje potencjalne ryzyko w przypadku nieuszczelnienia systemu składowania CO <sub>2</sub> (odwierty+poziom magazynowy).
		7.2.2 Wpływ na grunty	Nie analizowano.
		7.2.3 Uwolnienie do atmosfery	Możliwe w przypadku rozszczelnienia struktury. W takim przypadku konieczny będzie zakup certyfikatów emisyjnych.
		7.2.4 Wpływ na hydrogeologię	Zatęszczanie CO <sub>2</sub> może wpłynąć na parametry hydrogeologiczne.
		7.2.5 Wpływ na chemizm	Zatęszczanie CO <sub>2</sub> w ograniczonym stopniu wpłynie na chemizm solanki i skały zbiornikowej.
		7.2.6 Wpływ na topografię	Ze względu na niewielkie ilości zatęszczanego CO <sub>2</sub> wpływ na topografię terenu będzie marginalny.
	7.3 Wpływ na florę i faunę	7.3.1 Efekt śruduszenia	Uduszenie zwierząt i ludzi z powodu nadmiernej koncentracji CO <sub>2</sub> w powietrzu jest mało prawdopodobne.
		7.3.2 Wpływ CO <sub>2</sub> na rośliny	Długotrwała ucieczka CO <sub>2</sub> ze składowiska może spowodować koncentrację dwutlenku węgla w warstwach powierzchniowych co może lokalnie wpłynąć na roślinność.
	7.4 Wpływ na ludzi	7.4.1 Wpływ CO <sub>2</sub> na zdrowie ludzi	Ewentualna ucieczka nie będzie miała wpływu na zdrowie ludzi, gdy koncentracja CO <sub>2</sub> w powietrzu szybko spadnie. Jedynie erupcja może mieć ograniczony wpływ na zdrowie ludzi, którzy będą znajdować się w strefie zagrożenia. Zakłada się, że wpływ będzie krótkotrwały, ponieważ erupcja zostanie szybko zlikwidowana lub ludzie ewakuowani.
		7.4.2 Toksyczne związki zatęszczanych	Zakłada się, że zatęszczany gaz będzie czysty. Istnieje ryzyko występowania metali ciężkich.
		7.4.3 Wpływ na środowisko ekologiczne	Długotrwała ucieczka CO <sub>2</sub> z horyzontu magazynowego może mieć wpływ na zmiany środowiska naturalnego.

**Analiza obszaru zatęczenia CO<sub>2</sub> pod kątem określenia ryzyka nieszczelności pułpki złowej**  
Obszar zatęczenia czyli rejon Budziszewice-Zaosie położony jest w południowej części mezozoicznego wału rodowopolskiego, określonego mianem wału kutnowskiego. Południowo-wschodnią część tego wału wydzielana jest jako antyklina Gielniowa, która w kierunku południowo-wschodnim przechodzi w NE obrzeżenie Gór Wierzbickich. Rozpatrywana tu antyklina Budziszewice-Zaosie obejmuje południową część antykliny Gielniowa i jest położona na N od Tomaszowa Mazowieckiego. Struktura w rozpoznanej wiertniczo części zbudowana jest z utworów: permu, triasu i jury.

### **Ocena szczelności struktury pod kątem strukturalnym**

W „Raporcie merytorycznym nr 10 z I segmentu dla rejonu Bełchatowa (Wójcicki (red.), 2009) pkt.1.1.3 została przedstawiona: regionalna mapa strukturalna stropu jury, rodowej, dolnej i triasu, mapa strukturalna stropu triasu górnego i mapa strukturalna stropu rodowego piaskowca. Opracowane mapy dają podstawę do oceny strukturalnej antykliny Budziszewice-Zaosie.

□ Strop rodowego piaskowca - w tej części profilu antyklina ma kształt antykliny liniowej w formie wrzeczona o osi biegnącej na kierunku NW-SE. Kulminacja struktury wznosi się tu na izohipsie ok. -2200 m ppm. Zamknięcia strukturalne znajdują się na izohipsie nieco poniżej -2400 m ppm, na której to antyklina urywa się z niedużą, drugą kulminacją na tej strukturze, położoną na NW od antykliny Budziszewice-Zaosie. Na nieco większej głębokości, bo poniżej -2500 m, leżą zamknięcia strukturalne w części SE struktury. Dalej w kierunku SE strop podnosi się przechodząc w NW obrzeżenie gór Wierzbickich. W związku z tym można stwierdzić, że wysokość wzgl. dna struktury wynosi ok. 200 m do pierwszego zamknięcia strukturalnego oraz 300 m do drugiego zamknięcia strukturalnego. Wysokość struktury rzędu 200-300 m należy uznać za bardzo pozytywny wynik.

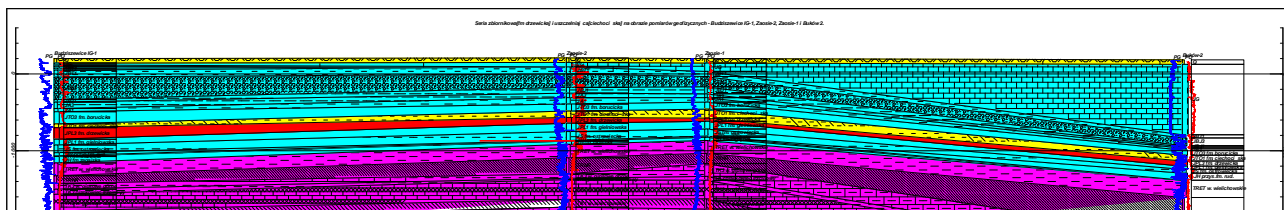
□ Strop triasu górnego również wznosi się do izohipsy -900 do -1000 m ppm. Budowa strukturalna antykliny w tej części profilu stratygraficznego ulega wyraźnej przebudowie w stosunku do niższych wydzielań stratygraficznych. Partia szczytowa składa się z 2 kulminacji: wyższej na izohipsie -900 m ppm, położonej w SE części struktury i niższej na izohipsie około -1000 m ppm położonej w części NW struktury. Obie kulminacje uzyskują również na izohipsie ok. -1100 m ppm. Zamknięcia całej struktury znajdują się na izohipsie ok. -1300 m ppm poniżej której struktura Budziszewice-Zaosie urywa się w kierunku SE z obrzeżeniem Gór Wierzbickich. Wysokość wzgl. dna struktury względem zamknięcia strukturalnego wynosi więc 300-400 m, czyli w stosunku do stropu rodowego piaskowca zwiększa się o ok. 100 m.

□ Strop jury rodowej, dolnej i triasu również przebieg osi struktury nawiguje do kierunku NW-SE czyli takiego jak w starszych strukturach. Jednak w stosunku do nich następuje pewna przebudowa struktury. Mianowicie strefa pułpki zostaje ograniczona do rejonu SE struktury, która w tej części osi gwałtowniejsza kulminacja na izohipsie ok. -300 m, natomiast zamknięcia struktury znajdują się na izohipsie ok. -400 m ppm w części SE. Tam poniżej tej izohipsy następuje pochylenie ku SE z obrzeżeniem Gór Wierzbickich. Wysokość struktury w stropie jury dolnej i rodowej jest więc rzędu 100 m czyli ok. 200-300 m mniej aniżeli w stropie triasu. Taka wysokość znaczco obniża pojemność pułpki złowej w skałach zbiornikowych jury.

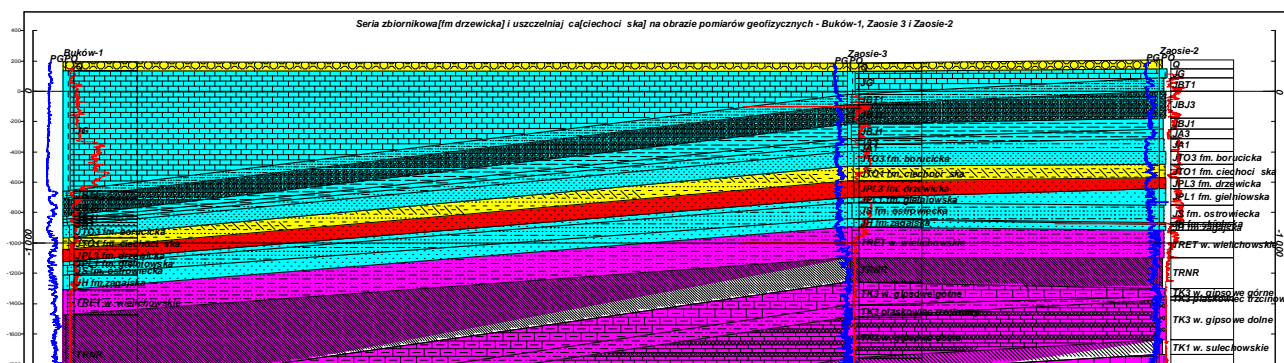
### **Ocena szczelności struktury pod kątem tektoniki uskokowej**

Na wspomnianych wcześniej mapach strukturalnych Rys. 1.1.3-32, 33 i 34 oraz przekrojach sejsmicznych przez strukturę Budziszewic przedstawionych na rysunkach 1.1.3-21 i 1.1.2-22 (Wójcicki (red.), 2009) została zinterpretowana strefa dyslokacyjna o przebiegu NW-SE, częściowo przebiegająca przez SW skrzydło antykliny i w związku z tym mogąca mieć wpływ na szczelność struktury. W odniesieniu do poszczególnych poziomów przedstawianych na mapach strukturalnych, ocena wpływu uskoku na szczelność jest następująca:

- Strop rodkowego pstrygo piaskowca ó strefa uskokowa rozcina strop na gŁboko ci ok.-2600 m ppm, podczas gdy zamkni cie struktury znajduje si na gŁboko ci -2500 m, z tego wynika, e uskok nie b dzie miaŁnegatywnego znaczenia na szczelno struktury i jej obj to .
- Strop triasu gÓrnego ó uskok przecina SW skrzydŁ struktury Budziszewic w jej cz ci zachodniej na izohipsie -1200 m ppm podczas, gdy zamkni cie struktury nast puje gŁbiej, bo na gŁboko ci -1300 m ppm. Wobec tego w przypadku nieszczelno ci uskok u szczelno struktury nale aŁby ograniczy do izohipsy ok. 1100-1150 m czyli 100-150 m wy ej. Bior c pod uwag jednak fakt, e na przekrojach sejsmicznych strefa uskokowa wygasa w dolnej cz ci utworów kajpru uskok nie powinien zaznacza si ju w stropie triasu gÓrnego. W zwi zku z tym jeszcze raz nale y przeanalizowa zasi g strefy uskokowej w tej cz ci triasu.
- Strop jury rodkowej triasu ó wobec tego, e na profilach sejsmicznych strefa uskokowa wygasa w utworach kajpru, to nie powinna by ju uwidoczniata w stropie jury jak to przedstawiono na rys. 1.1.3-32 i w zwi zku z tym nie b dzie miaŁ znaczenia dla szczelno ci utworów jury.



Rys. 1.1.17.10 Serie zbiornikowe (zaznaczona drzewicka, poza tym rozpatrywane jest jako najbezpieczniejsza formacja ostrowiecka, ewentualnie razem z zagajsk ) oraz uszczelniaj ce (gŁwna to ciechoci ska, druga ó gielniowska) w obrazie pomiarów geofizyki wiertniczej.



Rys. 1.1.17.11 Serie zbiornikowe (zaznaczona drzewicka, poza tym rozpatrywane jest jako najbezpieczniejsza formacja ostrowiecka, ewentualnie razem z zagajsk ) oraz uszczelniaj ce (gŁwna to ciechoci ska, druga ó gielniowska) w obrazie pomiarów geofizyki wiertniczej dla rejonu Buków-Zaosie.

### Ocena szczelno ci struktury ze wzgl dów hydrogeologicznych

WedŁg pierwotnych oprÓbowa i bada wÓd zŁowych pobranych z jury dolnej w otworze Budziszewice IG-1, Zaosie 2 i 3 wody te nale aŁy do solanek o mineralizacji rz du 3,62 do 9,1 g/dm<sup>3</sup>, czyli s to wody o redniej mineralizacji. WedŁg danych zawartych w tabeli 1.1.5.9 w „Raporcie nr 10 gŁwnym skŁdnikiem wÓd dolnej i rodkowej jury w rejonie Budziszewic-Zaosia s : Na, Ca i K. W wodzie z otworu Budziszewice IG-1 stwierdzono rÓwnie : Mg, Br i J. Wska nik Na/Cl wiadczy o stopniu wymiany jonowej solanek w rejonie struktury przedstawiony jest w tabeli 1.1.6.6 wspomnianego raportu. WedŁg tych danych dla wÓd jury dolnej wynosi on w zbadanych otworach:

- Budziszewice IG-1  $\delta$  Na/Cl = 0,96, Cl/Br = 194
- Zaosie 2  $\delta$  Na/Cl = 0,54
- Zaosie 3  $\delta$  Na/Cl = 0,69

Według tych oznaczeń zaliczono zbadane wody do różnych typów klas genetycznych. Budziszewice IG-1 to klasa 3, Zaosie 2 to klasa 2, Zaosie 3 to klasa 4. Klasyfikacja genetyczna wód przedstawiona w tab. 1.1.6.5 wskazuje, że zbadane wody dolnej i rodkowej jury wykazują różny stopień metamorfizmu wód. Generalnie można stwierdzić, że niski stopień mineralizacji oraz klasyfikacja genetyczna zbadanych wód wskazuje, że wody tego obszaru podlegają infiltracji wód powierzchniowych, przy czym różne poziomy mogą podlegać temu procesowi w różnym zakresie, związanym zapewne ze zmianami facyjnymi poziomów zbiornikowych. Infiltracja wód powierzchniowych ma miejsce przede wszystkim od strony południowo-wschodniej czyli od wschodniej i rodkowej jury na obrzeżach Gór w tokrzyskich. Należy tu zaznaczyć, że dane z wykonanych badań nie dotyczy bezpośrednio wód z formacji drzewickiej, albowiem z interwał tej formacji nie pobrano próbek wody w żadnym otworze (dotyczy starszych ogniw jury dolnej). Stopień mineralizacji wód pokazują również pomiary oporności geofizycznej przedstawione na Rys. 1.1.17.10 i 11. Przedstawione na rysunkach wykresy oporności wskazują, że cała profil jury i przystropowa część triasu charakteryzuje się podniesioną opornością skał zbiornikowych, co należy wiązać z wydzielaniem wód złoży. To z kolei związane jest z częściowym pochodzeniem osadów, a częściowo z możliwą infiltracją wód powierzchniowych.

#### Serie uszczelniające

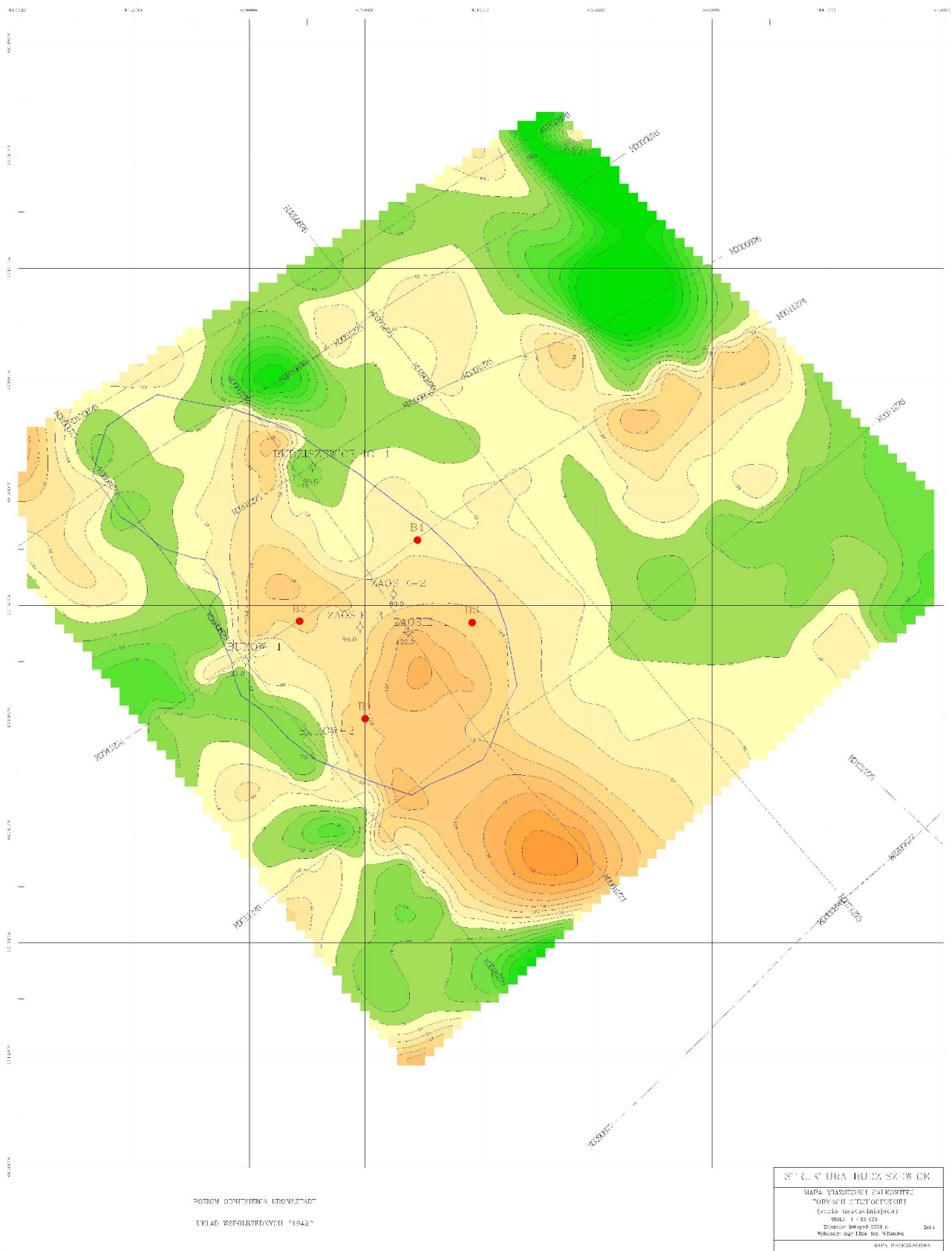
Główną serią uszczelniającą stanowi ilce i mułce należące do formacji ciechocińskiej. Trzon utworów tej formacji stanowi wspomniane ilce i mułce, dodatkowo w postaci wkładki występują te piaskowce, szczególnie liczne w rodkowej części interwału serii uszczelniającej. Według analizy danych karota i geofizycznych seria uszczelniająca charakteryzuje się dwudzielnością. Wskazują na występowanie otworów występuje dolna i górna seria ilcowa, która ma głębokość 30-40 m (górna część bardziej miąższa), które są rozdzielone piaskowcami miąższości ok. 10-20 m np.: Zaosie 1, 2 i 3. Rozrost tych piaskowców ma miejsce w kierunku wschodnim, natomiast w kierunku południowym (Buków 1 i 2) obserwuje się spadek miąższości tej wkładki piaskowcowej i jej zanik. Wobec tego zasadniczym staje się pytanie czy dalej w kierunku SE piaskowce rozwija się, a do zaniku serii ilastej czy te przeciwnie, zanika. W pierwszym przypadku miałyby miejsce utrata szczelności, co całkowicie eliminowałoby strukturę w poziomie plicbachu (i prawdopodobnie też synemuru) do celów sekwestracji CO<sub>2</sub>. Zmiany facyjne serii uszczelniającej zobrazowane przez pomiary geofizyczne przedstawiono na Rys. 1.1.17.10 i 11. Całkowita miąższość serii uszczelniającej, czyli formacji ciechocińskiej na odwierconych otworach zmienia się w przedziale od 53 do 120 m, co szczegółowo przedstawia tabela 1.1.17.5.

Tabela 1.1.17.5 Charakterystyka głównej serii uszczelniającej formacji ciechocińskiej.

Nazwa odwiertu	Głębokość serii uszczelniającej (fm. ciechocińskiej)		Miąższość całkowita [m]	Charakter serii uszczelniającej
	od	do		
Buków 1	1158	1235	77,0	dwudzielna
Buków 2	1240	1316,5	76,5	dwudzielna
Budziszewice IG-1	850	903	53,0	jednodzielna
Zaosie 1	653	773	120	dwudzielna z hor. piaskowcowym
Zaosie 2	686	775	89	dwudzielna z hor. piaskowcowym
Zaosie 3	680	775	95,0	dwudzielna







Rys. 1.1.17.13 Mapa mi szych formacji ciechoci skiej.

Powyższe dane zawarte w tabeli 1.1.17.5, a opracowane w pkt. 1.1.3 „Raportu nr 10 by 6 podstaw do kalibracji profili sejsmicznych i razem z nimi posłużyły do opracowania mapy stropu serii uszczelniającej, czyli formacji ciechocińskiej oraz jej mapy miąższości całkowitej, które przedstawione są na Rys. 1.1.17.12 i 13. Opracowana mapa strukturalna stropu formacji ciechocińskiej wskazuje, że w obrębie przyjętego konturu struktury Budziszewice występują 2 kulminacje. Przy generalnym kierunku struktury NW-SE, jedna z kulminacji znajduje się w części SE druga w części NW. Szczyt kulminacji południowo-wschodniej występuje na głębokości 500-450 m ppm w rejonie otworów Zaosie 1 (-456 m), Zaosie 2 (-481,0 m) i Zaosie 3 (-495,0 m). Kulminacja północno-zachodnia występuje w obrębie konturu struktury jedynie fragmentarycznie, albowiem ta część struktury rozwija się dalej w kierunku NW. W części konturowej wysoko kulminacji osiąga izohipsy ok. -550 m. Obie kulminacje rozdziela poprzeczne obniżenie schodzące do izohipsy -700 m. We wschodniej części tego obniżenia położony jest odwiert Budziszewice IG-1 na wys. -650 m ppm. W przekroju poprzecznym antyklina Budziszewic w stropie formacji ciechocińskiej charakteryzuje się stromym zapadaniem skrzydła SW i bardziej łagodnym skrzydłem NW. W kierunku SE strop uszczelnienia obniża się do izohipsy -750 m, poniżej której w kierunku południowo-wschodnim łączy się z obrzeżeniem Gór w Tokrzyskich. Wysokość dna struktury w stropie formacji ciechocińskiej wynosi więc co najmniej 250 m w części wschodniej i 200 m w części zachodniej. Druga z opracowanych map to mapa miąższości całkowitej formacji ciechocińskiej. Została otrzymana przez odjęcie od mapy stropu formacji ciechocińskiej, mapy stropu formacji drzewickiej. Otrzymana mapa charakteryzuje się dosyć dużym zróżnicowaniem miąższościowym. W obrębie konturu struktury miąższość zmienia się od 60 m, na NW i W struktury, do 130 m w części SE.

Najwyższe miąższości występują wzdłuż centralnej części struktury i sięgają 90-130 m. W kierunku skrzydła północnego spada do 60-100 m. Najniższą wartość miąższości 53 m, została stwierdzona na odwiercie Budziszewice IG-1. Bezpośrednio na N od tego otworu i jednocześnie nie przyjętego konturu struktury, została stwierdzona w oparciu o profile sejsmiczne strefa obniżonej miąższości, która spada tu do poniżej 10 m. Tak niska wartość miąższości, gdyby została potwierdzona eliminuje strukturę z dalszych badań. Przedstawiony rozkład miąższości, pokazuje miąższość całkowitą serii uszczelniającej znacznie z wędkami piaskowców, które jak wspomniano występują w jej obrębie. Na podstawie analizy krzywych geofizycznych w poszczególnych otworach należy przypuszczać, że miąższość serii uszczelniającej trzeba będzie zmniejszyć o około 10-20 m. Biorąc pod uwagę rozrost piaskowców w kierunku NE i E należy przypuszczać, że w części południowej i zachodniej ubytek miąższości serii uszczelniającej będzie mniejszy niż w kierunku NE i E będzie większy.

### **Wpływ ewentualnej ucieczki CO<sub>2</sub> na ludzi**

Analizę wpływu CO<sub>2</sub> na ludzi należy przeprowadzić dwukierunkowo. Pierwszym kierunkiem będzie analiza bezpośredniego wpływu dwutlenku węgla na ludzi w przypadku wystąpienia ucieczki CO<sub>2</sub> ze składowiska. Drugim kierunkiem analizy jest określenie pośredniego wpływu na ludzi w wyniku zanieczyszczenia środowiska, jakim może być wystąpienie w przypadku rozszczelnienia się struktury magazynowej. Należy podkreślić, że pomimo tego, że dwutlenek węgla jest gazem nietoksycznym, to może być groźny dla życia ludzkiego, w przypadku wysokiej koncentracji gazu w powietrzu wdychanym przez ludzi.

Koncentracja CO<sub>2</sub> w powietrzu wynosząca powyżej 10% powoduje utratę przytomności, zmienia pH krwi oraz powoduje wiotczenie mięśni odpowiedzialnych za oddychanie, co w konsekwencji może prowadzić do nadciśnienia (Benson i zespół 2002). Tak duża koncentracja może wystąpić tylko w przypadku erupcji odwiertu. Biorąc pod uwagę obecną technologię stosowaną w eksploatacji złóż gazu ziemnego i ropy naftowej należy stwierdzić, że wystąpienie erupcji odwiertu jest mało prawdopodobne. Aktualnie w procesach podziemnego magazynowania gazu ziemnego powszechnie stosuje się zawory wgłębne, które automatycznie zamykają się w

przypadku wystąpienia nagłej różnicy ciśnień, spowodowanej niekontrolowanym wypływem gazu z odwiertu.

Znacznie trudniej jest opanować powolny wypływ CO<sub>2</sub>, który może wystąpić w przypadku rozszczelnienia się pęknięcia cementowego uszczelniającego rury okładzinowe oraz rozszczelnienia się skał nadkładu. Pomimo tego, że wypływ gazu ze składowiska będzie powolny, to jednak przebiegowo może wystąpić zagrożenie dla ludzi.

Jak już wcześniej stwierdzono, ryzyko poważnego zagrożenia ludzi spowodowanego erupcją lub rozszczelnieniem się magazynu jest niewielkie, pomimo tego, że składowanie CO<sub>2</sub> wymaga przewyższenia ciśnienia hydrostatycznego od 20% (jura) do 37% (trias). W związku z tym odwierty magazynowe powinny być sytuowane w odpowiedniej odległości od skupisk ludzkich.

Na Rys. 1.1.17.1 przedstawiono lokalizację struktury Budziszewice wraz z odwiertami symulacyjnymi (potencjalnymi odwiertami do zatłaczania) na tle występujących skupisk ludzkich. Analizując położenie poszczególnych odwiertów zatłaczających CO<sub>2</sub> należy stwierdzić, że odwierty wschodnio i zachodnio są zlokalizowane w generalnie niezamieszkałych terenach rolniczych, w związku z tym ewentualna erupcja lub ich nieszczelność nie stwarza bezpośredniego zagrożenia dla zdrowia ludzi. W świetle przedstawionej informacji położenie pozostałych dwóch odwiertów śródniowego i śródocznego powinno zostać przeprojektowane ze względu na niedostateczną ich odległość od skupisk mieszkalnych (w miarę możliwości przesunięte o przynajmniej parę set metrów).

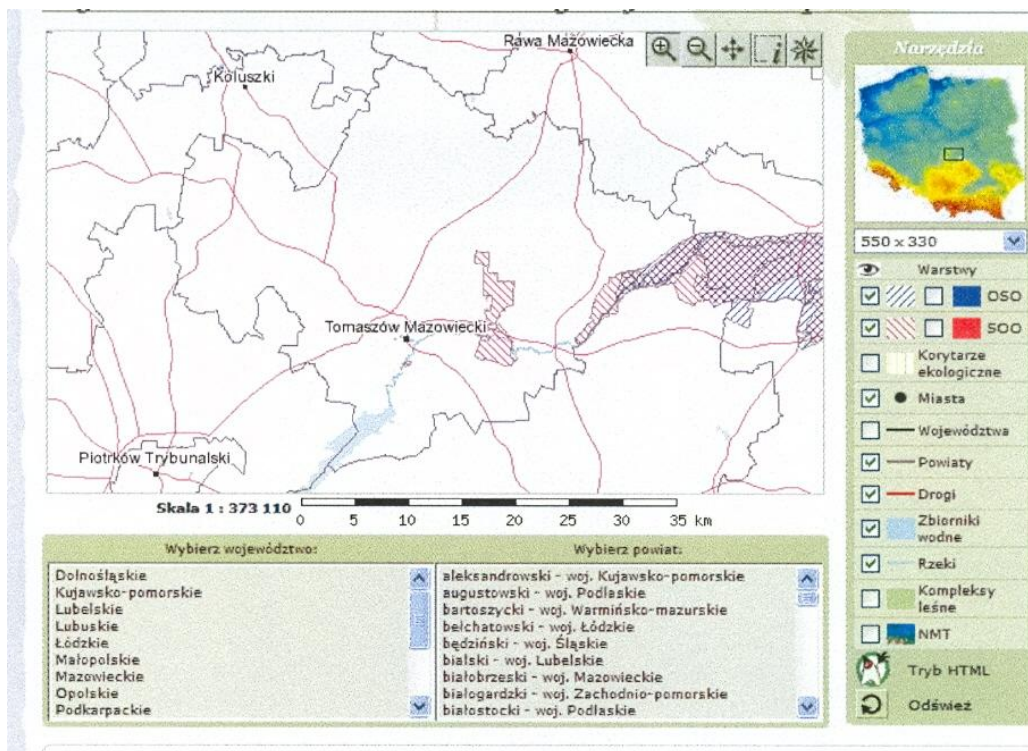
Należy pamiętać również o tym, że każda inwestycja, aby mogła zostać przeprowadzona musi uzyskać akceptację społeczną. Struktura Budziszewice swoim zasięgiem obejmuje gminę Ujazd (głównie), na terenie której mieszka około 8000 osób oraz w mniejszym stopniu gminę Budziszewice (około 2200 osób). Dodatkowo struktura (jej kontur na SE) położona jest w odległości zaledwie 7 km od Tomaszowa Mazowieckiego (około 66 000 osób). Biorąc pod uwagę doświadczenia związane z analogicznymi problemami występującymi w przemyśle naftowym (eksploatacja złóż gazu ziemnego i PMG) należy stwierdzić, że uzyskanie akceptacji społecznej dla całej inwestycji będzie trudne. Jeśli nawet uzyska się zgodę na realizację inwestycji to wydaje się mało prawdopodobne, aby inwestor uzyskał zgodę na odwiercenie otworów śródniowego i śródocznego w prezentowanej obecnie lokalizacji. Należy pamiętać o tym, że uzyskanie koncesji na podziemne składowanie CO<sub>2</sub>, zgodnie z Prawem geologicznym i górniczym wymaga posiadania przez inwestora tytułu prawnego (własność lub akt dzierżawy) do terenu na którym będzie prowadzona inwestycja. Dodatkowo ewentualna ucieczka CO<sub>2</sub> spowodowana rozszczelnieniem się magazynu lub przetłoczenie pułapki, w której projektuje się składowanie dwutlenku w głąb spowodować skażenie wód pitnych. Związane jest to z tym, że jest mało prawdopodobne, aby zatłaczane CO<sub>2</sub> pozyskane z elektrowni Bełchatów, byłoby w 100% wolne od zanieczyszczeń toksycznych. Należy podkreślić, że wody górnourajskie (GZWP nr 404, nieudokumentowany) stanowi w tym rejonie zbiornik wody pitnej dla potencjalnie dużej ilości osób, w związku z tym ich ewentualne skażenie (chodzi o migrację pomiędzy dolnojurajską formacją ciekoci skał a poziomami wody pitnej jury górnej, pomiędzy którymi mamy szereg poziomów uszczelniających jury rodkowej, ale nie są one odpowiedniej jakości, gwarantującej zatrzymanie migrującego dwutlenku w głąb w fazie gazowej) miałyby potencjalnie negatywne konsekwencje.

### **Wpływ ewentualnej ucieczki CO<sub>2</sub> na zwierzęta i rośliny**

Lokalizacja struktury Budziszewice została przedstawiona na Rys. 1.1.17.1. W celu określenia wpływu ewentualnej ucieczki CO<sub>2</sub> na zwierzęta przeanalizowano występowanie na terenie struktury obszarów chronionych, stref Natura 2000. Rys. 1.1.17.14 prezentuje aktualną mapę obszarów Natura 2000 uzyskaną z portalu <http://natura2000.mos.gov.pl/>. Analizując mapę można stwierdzić, że aktualnie na terenie struktury nie występują strefy Natura 2000 (patrz też Rys. 1.1.14.1). Najbliższy obszar chroniony, specjalny obszar ochrony siedlisk (SOO) występuje w odległości



około 10 km na południowy wschód od struktury. W odległości około 20 km na ESE od projektowanego zasięgu rozprzestrzeniania się zatępnianego CO<sub>2</sub> występuje obszar specjalnej ochrony ptaków (OSO). W związku z przedstawionymi mapami można stwierdzić, że projektowana inwestycja nie naruszy obszarów aktualnie chronionych.



Rys. 1.1.17.14 Mapa obszarów NATURA 2000 dla rozpatrywanego rejonu.

Należy podkreślić, że ewentualna erupcja lub ucieczka dwutlenku węgla może mieć negatywny wpływ na zwierzęta w jej bezpośrednim siedlisku, gdy duża koncentracja CO<sub>2</sub> w powietrzu może doprowadzić do uduszenia się zwierzęt.

Wpływ małej ilości CO<sub>2</sub> na rośliny jest pozytywny, ponieważ dwutlenek węgla bierze udział w fotosyntezie. Do wiadczenia prowadzone w ramach projektu 'Free-Air CO<sub>2</sub> Enrichment Project (FACE) finansowanego przez USDA ([www.uswcl.ars.ag.gov](http://www.uswcl.ars.ag.gov)) wykazało, że niewielkie stężenia CO<sub>2</sub> w atmosferze pozytywnie wpływają na plony zbóż. Niestety rośliny potrzebują tlenu do wzrostu systemu korzeniowego. Duże koncentracje CO<sub>2</sub> w glebie powodują obumieranie korzeni, a co za tym idzie całkowite rośliny. W rejonach, w których CO<sub>2</sub> w naturalny sposób wydostaje się z warstw podziemnych w efekcie aktywności wulkanicznej można zauważyć obumieranie roślin.

## Podsumowanie

Magazynowanie CO<sub>2</sub> w głębokich strukturach solankowych jest stosunkowo nową technologią. Podstawowym problemem związanym z wyborem struktury jest niewielka ilość danych. Zarządzanie ryzykiem geologicznego składowania dwutlenku węgla w poziomach solankowych struktur Budziszewice-Zaosie wymaga zidentyfikowania poszczególnych czynników ryzyka. Analiza ryzyka została opracowana w oparciu o bazę wiedzy Quintessa FEP (Features - cechy, Events - wydarzenia i Processes - procesy). Przeprowadzona analiza wykazała, że największe ryzyko składowania CO<sub>2</sub> w strukturze Budziszewice-Zaosie związane jest ze szczelnością pułapki. Stąd wykonano mapę stropu oraz miąższości warstwy uszczelniającej poziomy składowania jury dolnej, gdy poziomy ten posiadają znacznie lepsze parametry magazynowe niż poziom triasu. Poziom triasu został potraktowany jako poziom rezerwowi z powodu znacznego przekroczenia ciśnienia hydrostatycznego (o około 37%) podczas składowania znacznych ilości gazu. Parametry



magazynowe poziomu triasu dolnego nie gwarantują możliwości zatępczenia zakładanej ilości dwutlenku w głąb. W dalszej części opracowania INiG przedstawiono analizę wpływu składowania CO<sub>2</sub> na ludzi, zwierzęta i rośliny. Wykonane prace pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków:

o składowanie CO<sub>2</sub> w warstwach jurajskich niesie mniejsze ryzyko rozszczelnienia struktury, ze względu na ciśnień składowania, które przewyższają ciśnienia hydrostatyczne o około 20%,

o warstwy ciekocienne uszczelniające poziom jurajski zbudowane są z dwóch serii łupkowych o miąższości 30-40 m każda oraz rozdzielających je warstwy piaskowców o miąższości 10-20 m. W związku z tym szczelną nadtępczenia wymaga dodatkowych badań, gdy istnieje ryzyko jej nieszczelności,

o analiza wpływu składowania CO<sub>2</sub> na ludzi, zwierzęta i rośliny wykazała, że znaczne zagrożenie dla zdrowia ludzi i zwierząt może wystąpić tylko w wypadku wystąpienia erupcji odwiertowej. Wystąpienie erupcji CO<sub>2</sub> jest mało prawdopodobne ze względu na stosowane obecnie zawory wgłębne.

## **Ocena ryzyka geologicznego składowania, w tym zagadnienia bezpieczeństwa składowania i integralności składowiska (AGH)**

W tym warunkiem decydującym o możliwości zatępczenia dwutlenku węgla jest szczelność struktury do tego celu przeznaczonej, zarówno przed jak i po zakończeniu zatępczenia. Jest to związane z tym, że CO<sub>2</sub> w pewnych warunkach temperatury i ciśnienia, występuje w postaci gęstej fazy gazowej (nadkrytycznej). Gęstość ta jest większa niż w warunkach naturalnych, ale mimo to mniejsza niż gęstość solanki, przez co ma tendencję do migracji w pionie (Tarkowski, Stopa 2007). W tym czynnikiem w aspekcie podziemnego zatępczenia jest również wystarczająca duży plastyczność oraz wytrzymałość warstw izolujących. Ma to na celu uniknięcie zjawiska szczelinowania i ostatecznie przebicia warstw pod wpływem nadmiernego ciśnienia podczas zatępczenia (Tarkowski 2005). Pod względem szczelności najlepszymi miejscami, rozpatrywanymi pod względem podziemnego składowania CO<sub>2</sub>, a przy tym odizolowanymi od warstw otaczających są naturalne pułapki dla płynów złożonych, takie jak: carbonacie albo czarna cięciwa szczerpane złoża ropnej i gazu ziemnego, a także głębokie poziomy wodonośne.

Składowanie CO<sub>2</sub> powinno się odbywać poniżej strefy aktywnej wymiany wód i tam gdzie cyrkulacja wód podziemnych nie jest intensywna (Tarkowski 2005). Obecnie wyszczególnionych wód może wskazywać na otwarcie struktury - spowodowane występowaniem drobnych uskoki kontaktujących z powierzchnią terenu lub bezpośrednio bezpośrednio analizowanej struktury z obszarem infiltracji wód śródziemnych w rejonie wschodnich warstw zbiornikowych.

Na potrzeby oceny niektórych aspektów analizy ryzyka geologicznego zmodyfikowano (uszczegółowiono) model statyczny struktury Budziszewic-Zaosia (patrz rozdział 1.1.16). W tym celu Zespół Pracowników Katedry Surowców Energetycznych, WGGiO, AGH wykonał pierwsze modelowanie z wykorzystaniem programu Petrel 2009.1. Wykorzystując procedurę *Uncertainty Analysis* obliczono modele wskazujące ryzyko związane w modelowaniu strukturalnym osnowy geometrycznej potencjalnych warstw zbiornikowych i uszczelniających wchodzących w skład modelu statycznego struktury Budziszewic-Zaosia. W wyniku zastosowania procedury modelowania geometrycznego, na podstawie modelu litologicznego zrekonstruowano przestrzenną rozciągłość potencjalnych kompleksów uszczelniających i zbiornikowych. Ponadto bazując na zasadach analizy ryzyka oraz procedurach *Uncertainty Analysis* dostępnymi w programie Petrel dla parametrów zaleńienia i porowatości efektywnej wykonano zmodyfikowane modele pesymistycznej, realistycznej i optymistycznej wartości wymienionych parametrów.

### **Ocena ryzyka geologicznego osnowy strukturalnej**

Uszczegółowiony w ramach niniejszego zadania model geometryczny struktury Budziszewic-Zaosia obejmuje pięć sekwencji stratygraficznych (*zones*) podzielonych na zmienną liczbę proporcjonalnych warstw:

- A. Toark górny (5 warstw)
- B. Toark dolny (fm. ciechocińska, 6 warstw)
- C. Pliensbach (15 warstw)
- D. Synemur - hetang (20 warstw)
- E. Retyk (10 warstw)

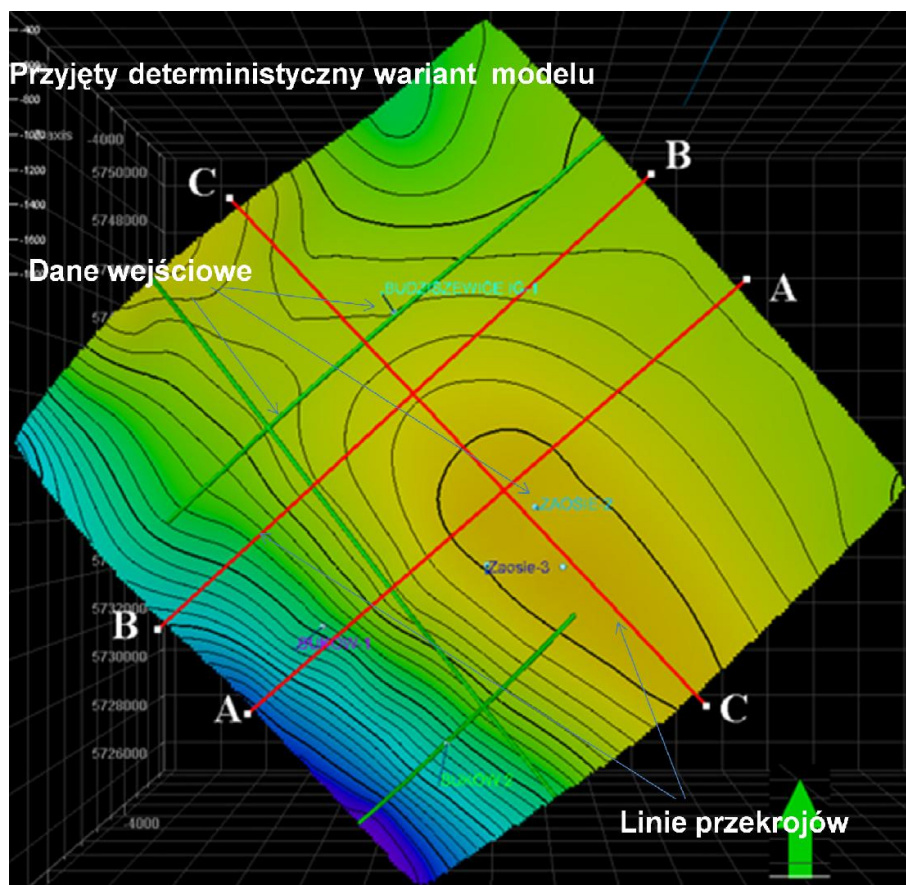
Jako mapy (gridów 2D) tworzących osnowę strukturalną modelu 3D oraz przestrzenną dystrybucję danych wejściowych wykorzystanych do ich opracowania przedstawia Rys. 1.1.17.15. Pokazuje on, że wykorzystywane mapy są stosunkowo słabo kontrolowane danymi wejściowymi. Utrudnia to realistyczne oceny geometrii struktury, a zwłaszcza ukształtowania jej zamknięcia strukturalnego.

Ocenę ryzyka jako części modelu 3D umożliwia procedura *Uncertainty Analysis*, która może na wykorzystaniu w programie Petrel do obliczenia alternatywnych, stochastycznych wariantów powierzchni strukturalnych wchodzących w skład modelu 3D (*horizons*). Stochastycznie oceniane ryzyko jest obliczane z wykorzystaniem poniższego równania:

$$S_r = S_{bc} + U_{1s} * U_{sgs}$$

gdzie:

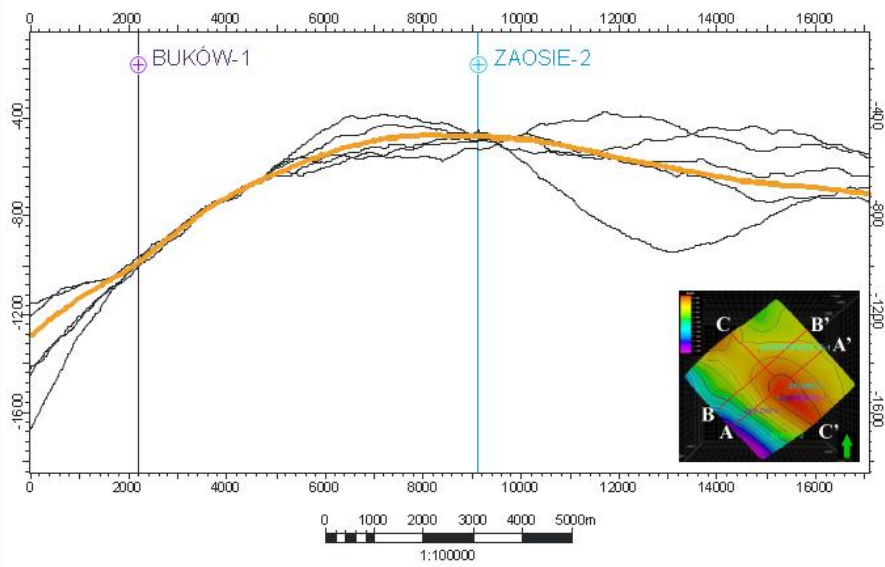
- $S_r$  = obliczony wariant powierzchni (*Surface realization*)
- $S_{bc}$  = wejściowa powierzchnia obliczana w sposób deterministyczny
- $U_{1s}$  = błąd głębokości wynoszący 1 odchylenie standardowe ( $s$ ) - może być powierzchnia lub wartość stała
- $U_{sgs}$  = Powierzchnia obliczona algorytmem SGS (średnia = 0,  $s=1$ , jej odchylenie od powierzchni wejściowej w miejscu wystąpienia danych wejściowych wynosi 0)



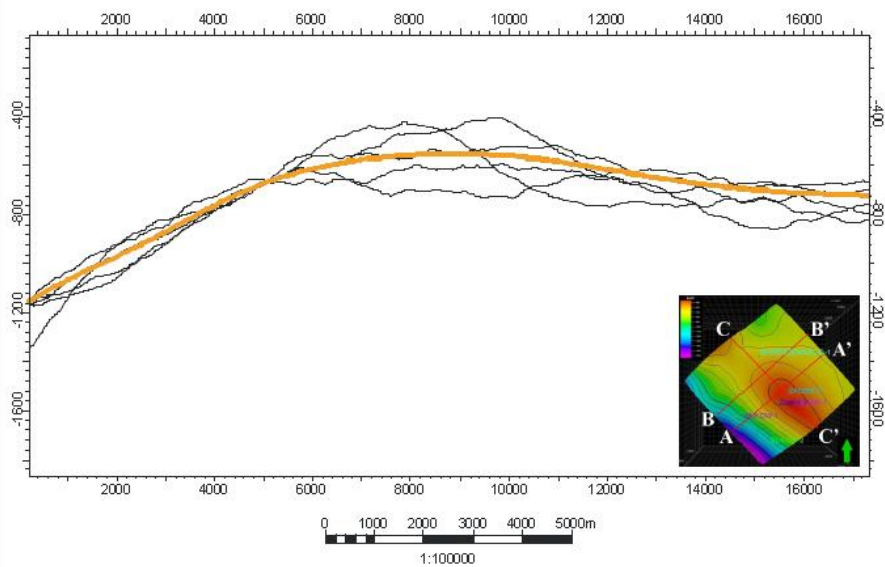
Rys. 1.1.17.15 Mapa stropu formacji ciechocińskiej wraz z danymi wejściowymi wykorzystanymi do jej opracowania oraz przykład wygenerowanego, deterministycznego grida 2D wykorzystanego do opracowania osnowy strukturalnej modelu 3D

Ponieważ do opracowania modelu 3D wykorzystywano gotowe modele 2D do oceny ryzyka w modelu strukturalnym wykorzystano odchylenie standardowe obliczone jako stała dla danej powierzchni strukturalnej. W wyniku wielokrotnego zastosowania procedury obliczany jest szereg równie prawdopodobnych stochastycznych powierzchni strukturalnych, które są w pełni zgodne z powierzchnią obliczoną w sposób deterministyczny i danymi wejściowymi. Wstępna analiza modelu parametrycznego wykazała, że stosunkowo największe znaczenie dla celów magazynowania będą miały trzy sekwencje: warstwy ciechocińskiej, (J<sub>101</sub>), utworu pliensbachu oraz sekwencja synemuru i hetangu. Dla nich wykonano bardziej szczegółowe analizy ryzyka związane z ukształtowaniem powierzchni stropowej. Modelowania ryzyka modelu strukturalnego wykonano na przekrojach A, B, C zaznaczonych na Rys. 1.1.17.15. a wyniki przedstawiono na Rys. 1.1.17.16.

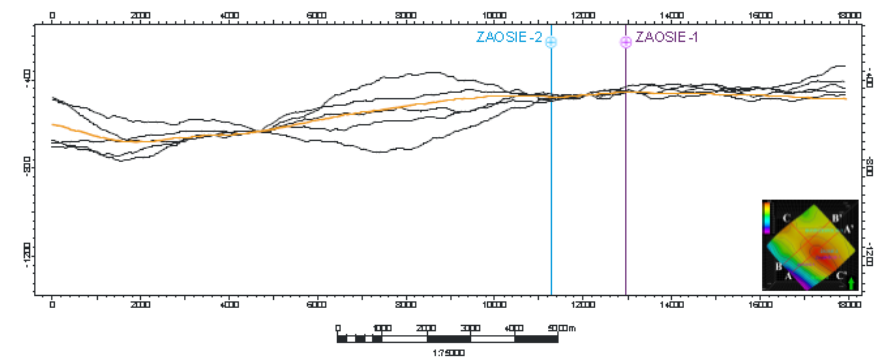
## STROP CIECHOCIŃSKA PRZEKRÓJ A - A'



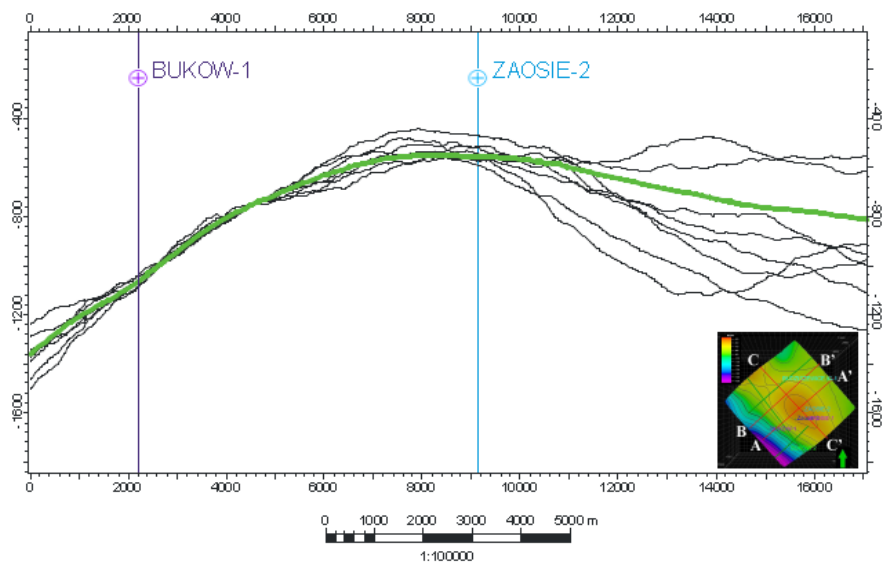
## PRZEKRÓJ B - B'



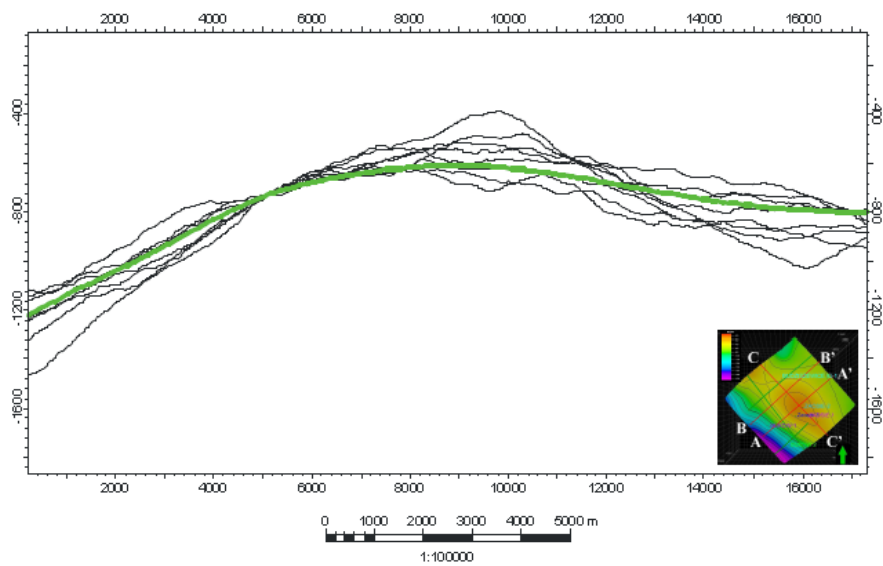
## STROP CIECHOCIŃSKA PRZEKRÓJ C - C'



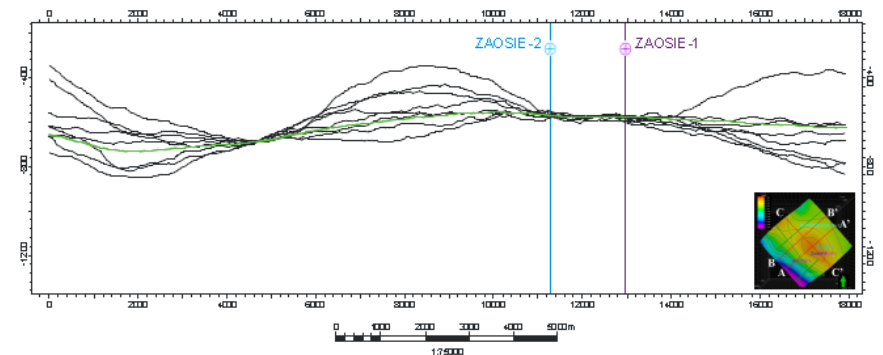
# STROP PLIENSBACH PRZEKRÓJ A - A'



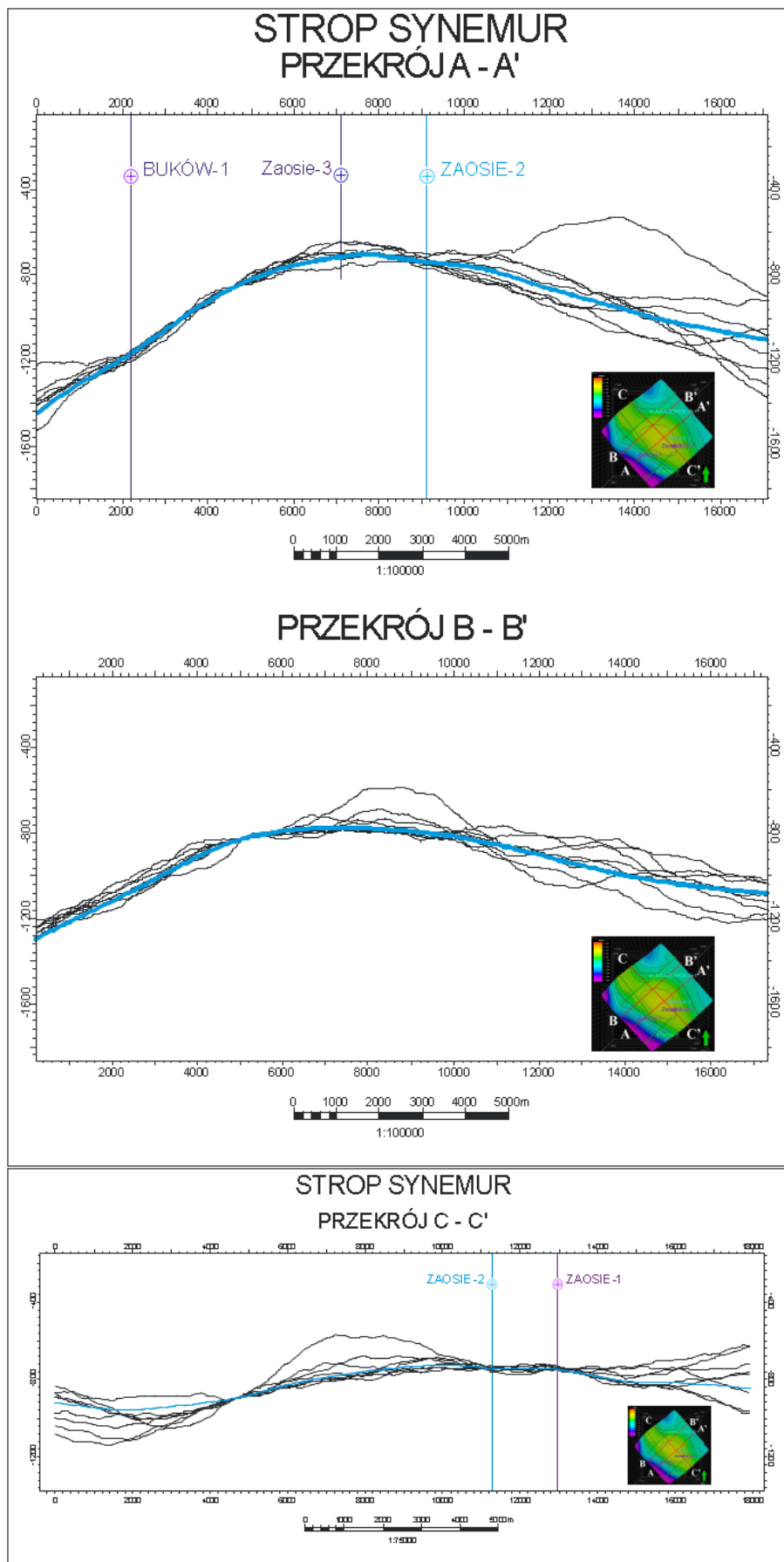
# PRZEKRÓJ B - B'



# STROP PLIENSBACH PRZEKRÓJ C - C'



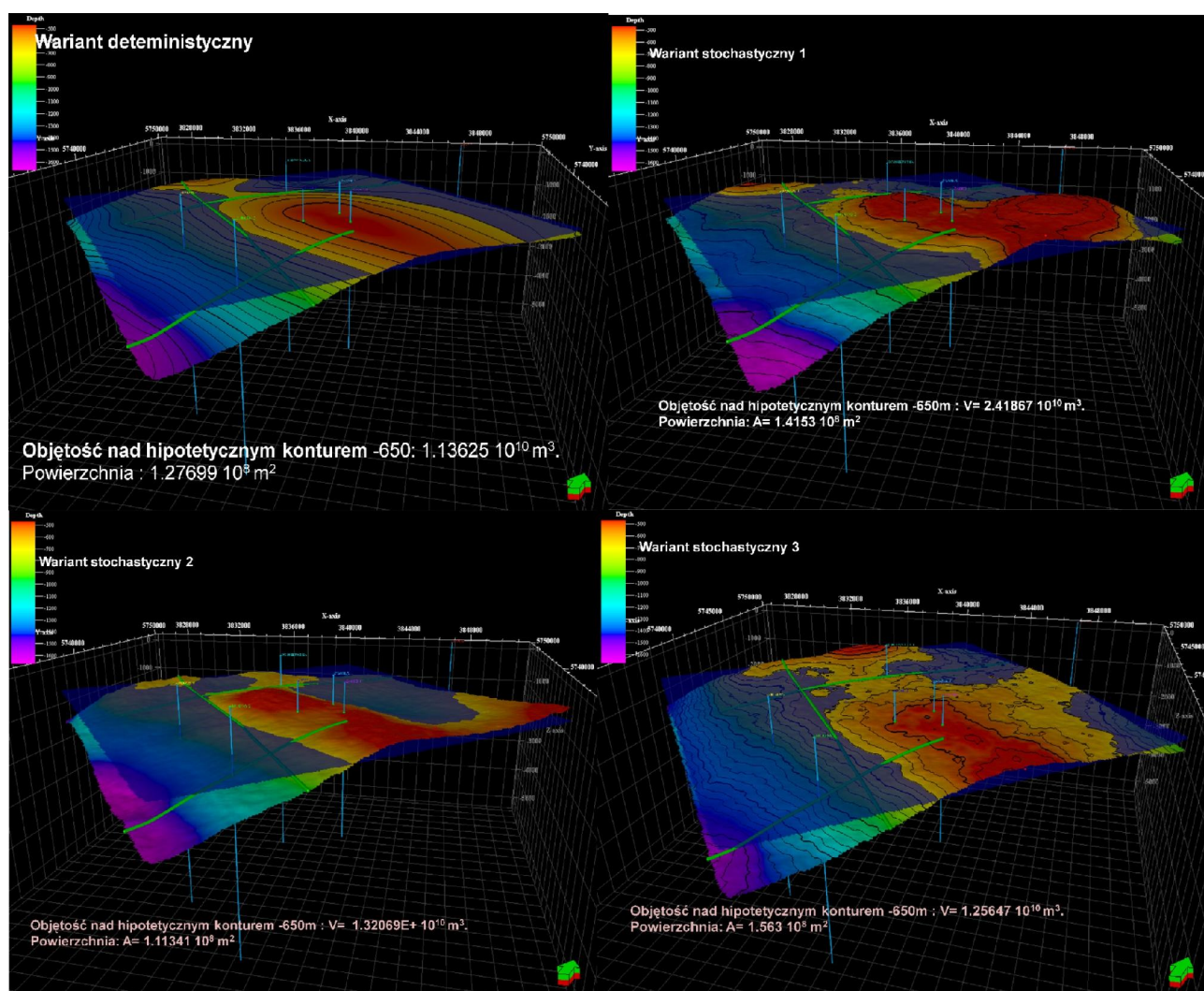




Rys. 1.1.17.16 Ukształtowanie powierzchni stropu poszczególnych horyzontów dla modelu dolnej jury w wariantach stochastycznych (czarne) i deterministycznym (niebieski i zielony).

Zamieszczone wy ej rysunki wyra nie pokazuj jak powa ne mo e by ryzyko zwi zane z b€dami interpretacji strukturalnej. Jest on szczególnie du e w strefach s€bko kontrolowanych danymi, takich jak rejon struktury Zaosia. By lepiej zilustrowa skal ryzyka wykonano zestaw diagramów pseudo 3D i teoretyczne obliczenia powierzchni i obj to ci potencjalnej pu€pki strukturalnej ograniczonej powierzchni stropu warstw ciechoci skich oraz hipotetycznym konturem z€ a po€ onym na g€boko ci 650 m ppm (Rys. 1.1.17.17). Przedstawione na rysunku obj to ci nie odzwierciedlaj rzeczywistej obj to ci pu€pki z€ owej, lecz ca€owita obj to przestrzeni zamkni tej wymienionymi powierzchniami. Rysunki oraz przedstawione obliczenia pokazuj , e w zale no ci od przyj tego wariantu powierzchnia i obj to struktury magazynowej mo e si ró ni o oko€ 30%.

Uzyskane wyniki pokazuj równie e obecny przestrzenny zasi g w miar dok€dneho modelu 3D jest obecnie zbyt ma€ i uniemo liwia ocen geometrii zamkni cia pu€pki od SE. Wiarygodna ocena amplitudy pu€pki b dzie mo liwa po wprowadzeniu dodatkowych danych sejsmicznych kontroluj cych strefy brzegowe pu€pki ale w miar mo liwo ci tak e jej stref osiow .

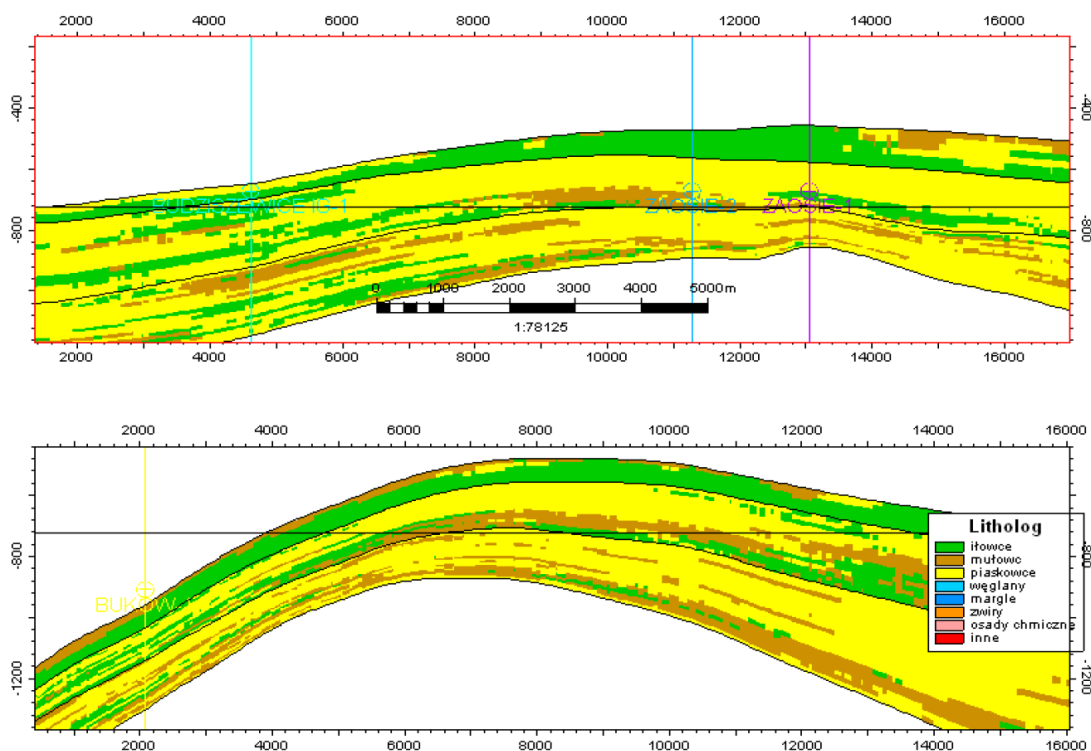


Rys. 1.1.17.17 Struktura Zaosia obserwowana w stopie warstw ciechoci skich (model deterministyczny i modele stochastyczne ó šmapa ryzykaö).

## Geologiczne ryzyko związane z przestrzennym rozkładem horyzontów uszczelniających i zbiornikowych oraz ich jakości

Modyfikacja modelu statycznego obejmowała również ponowne obliczenie modeli parametrycznych o litologii, zailenia oraz porowatości efektywnej.

Wykorzystano do tego celu algorytmy stochastyczne SIS oraz SGS. Dla każdego z wymienionych parametrów obliczono 5 lub 6 równie prawdopodobnych wariantów (*realisation*). Ostateczne modele parametrów zbiornikowych powstały w wyniku średniowania modeli cząstkowych, zaś model litologiczny reprezentuje litologie najczęściej występujące w poszczególnych realizacjach. Ten sposób przetwarzania jest stosowany w przypadku wykorzystania modeli stochastycznych w celu zwiększenia wiarygodności uzyskanych rozwiń. Podstawowym wynikiem zastosowanej w/w procedury jest zwiększenie jakości przestrzennej warstw (Rys. 1.1.17.18). Równocześnie nie model jest zdecydowanie mniej arbitralny niż obliczony technikami deterministycznymi (np. Kriging).

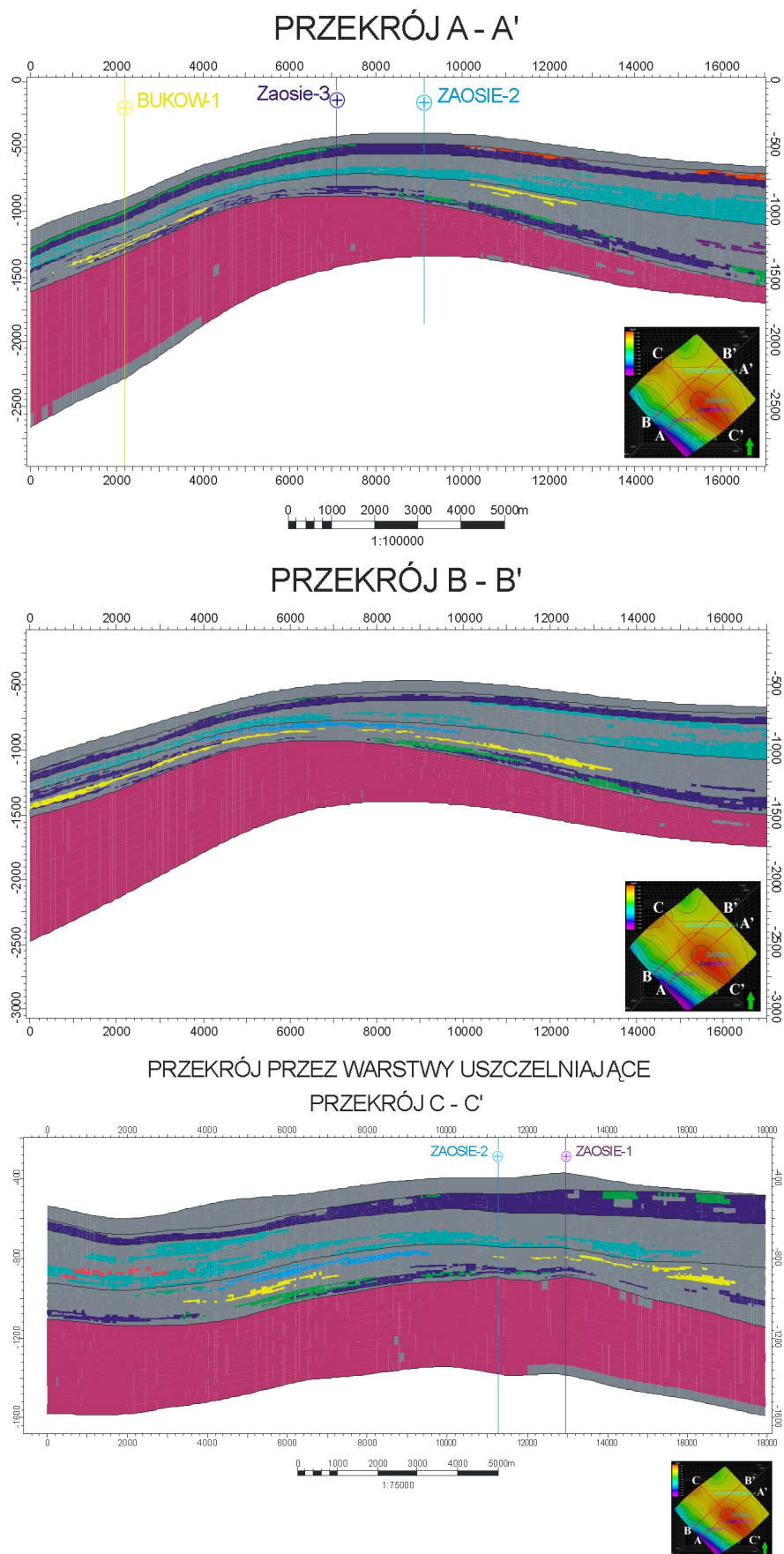


Rys. 1.1.17.18 Wynikowy model litologiczny powstały w wyniku przetworzenia pięciu wariantów stochastycznych modelu litologicznego.

## Model rozprzestrzenienia porożonych kompleksów uszczelniających i zbiornikowych

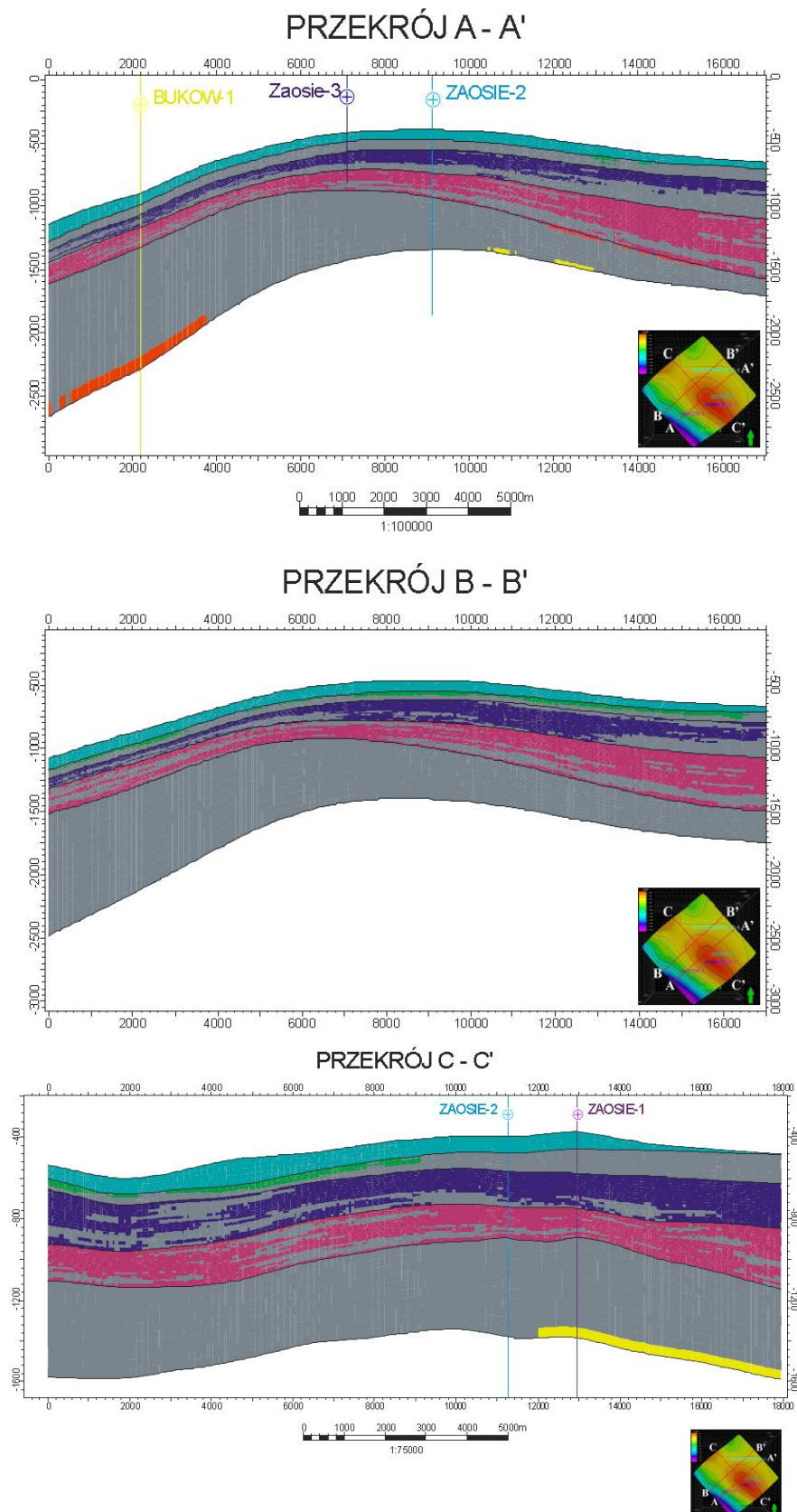
Na podstawie modelu wynikowego modelu litologicznego w programie Petrel wykonano modelowanie geometryczne umożliwiający wymodelowanie w obrębie wyróżnionych sekwencji stratygraficznych porożonych kompleksów stanowiących potencjalne uszczelnienie i zbiorniki. Modele uszczelnienia obejmują porożone ze sobą komórki modelu 3D zbudowane w przewadze z ilowców i mułowców. Pokrywy te zrekonstruowano oddzielnie dla wymienionych litologii i porożono w jeden model uszczelnienia mułowcowo-ilitych.

Wszystkie przedstawiane modele parametryczne obliczono na podstawie danych geofizycznych pochodzących z 3 odwiertów. Ogranicza to znacząco ich wiarygodność, mo na jednak na tej podstawie wyciągnąć wnioski na temat jakości pokryw uszczelniających i zbiornikowych a także na temat ich jakości.



Rys. 1.1.17.19 Przestrzenna dystrybucja potencjalnych kompleksów uszczelniających.





Rys. 1.1.17.20 Przestrzenna dystrybucja potencjalnych kompleksów zbiornikowych.

Przedstawiane na przekrojach (Rys. 1.1.17.19) poszczególne ci g $\in$  warstwy uszczelniaj ce s wyró nione kolorami. Rysunki te pozwalaj dostrzec, e ci g $\in$  pokrywy uszczelniaj ce o

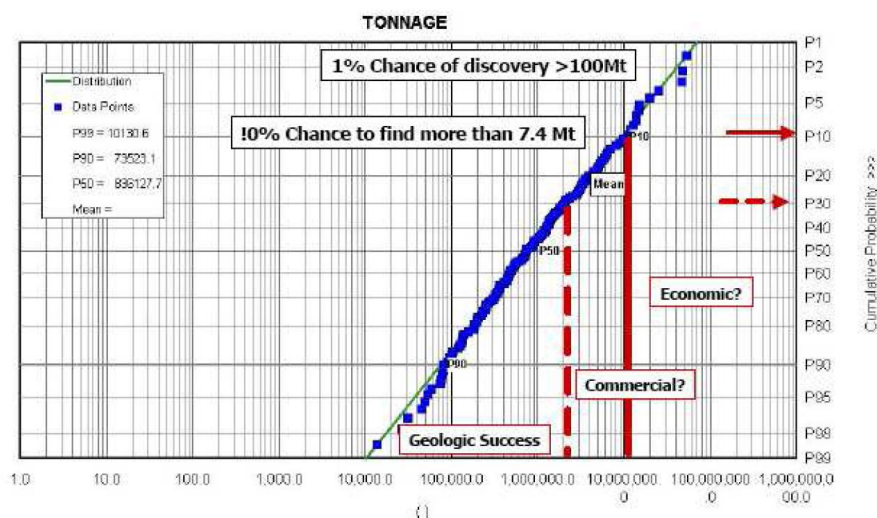


największe występują w przypiętych partiach warstw ciekociśkich. Stosunkowo duża rozciągłość cechuje również kompleks uszczelniający rozwinięty głównie w przypiętych partiach piłsbnachu. Jednakże względu na znaczącą redukcję jego występowania, obserwowana na przekroju B-B0 w przyosiowej części struktury Zaosia, należy go uznać za potencjalne uszczelnienie nieścisłe. Podobnie wygląda sytuacja w kompleksie synemur - hetang. Można tu zaobserwować liczne potencjalne uszczelnienia jednak mają one raczej lokalny zasięg i nie tworzą ciągłych pokryw w osiowej części antykliny Zaosia. Rozprzestrzenienie potencjalnych kompleksów piaskowcowych, stanowiących potencjalne kolektory przedstawiono na Rys. 1.1.17.20.

Przedstawiony obraz (Rys. 1.1.17.20) pozwala zaobserwować występowanie potencjalnych kompleksów skał zbiornikowych w obrębie sekwencji górnego toarku (model nie obejmuje jego górnoaaleńskiego uszczelnienia ze względu na małą głębokość pogrzebienia tego kompleksu). Kompleksy zbiornikowe o dużej występowaniu i rozciągłości występują również w profilu piłsbnachu oraz synemuru ó hetangu. Ze względu na obecność uszczelnienia w nadkładzie najbardziej perspektywnym poziomem wydają się być utworzy piłsbnachu.

### Analiza ryzyka w ocenie wartości zbiornikowych

Do podstawowych technik obiektywizacji uzyskiwanych wyników np. w aspekcie szacowania zasobów należy wspomnieć nie tylko metodę probabilistyczną (MP) czy inaczej techniki szacowania ryzyka (*risk assessment*) (Ross 2001, Heiberg, Swinkles 2001 Swinkles 2001) Metody te wykorzystują analizę rozkładów prawdopodobieństwa, określając, jako kluczowe dla estymacji wartości prawdopodobieństwa P10, P50 (median) i P90.



Rys. 1.1.17.21 Schemat szacowania zasobów w wykorzystaniu metody probabilistycznej.

Pod pojęciem P90 rozumiemy odczytany z kumulatywnej krzywej rozkładu prawdopodobieństwa wartość odpowiadającą percentylowi 90%. W terminologii MP, wartość ta odpowiada 90% pewności, że odkryte zasoby będą wynosić co najmniej tyle, ile liczba odczytana dla P90 (Rys. 1.1.17.21). Szacowane w ten sposób zasoby są bardzo niskie (*Low Estimate*) i są określane jako udowodnione (*Proved = 1P*). Wartości odczytywane dla mediany (percentyla 50%) są określane w terminologii MP jako P50. Odpowiadają one najbardziej prawdopodobnemu scenariuszowi poszukiwań. Liczbowe wartości odpowiadające P50 są w literaturze angielskiej określane jako zasoby udowodnione i prawdopodobne (*Proved and Probable = 2P*) lub inaczej jako najbardziej prawdopodobne (*Most Likely*). Zasoby policzone dla P50 wynoszą nie mniej niż wartość odczytana z krzywej rozkładu. Zasoby obliczane dla percentyla 10% (P10) to wariant najbardziej

optymistyczny. Oszacowana w ten sposób wielkość zasobów jest najwyższa, jednak nieprawdopodobnie stwierdzenie ich odkrycia jest najmniej. Zasoby takie określone są jako udowodnione, prawdopodobne plus możliwe do odkrycia (*Provede plus, Probable plus Possibile=3P*). Przedstawiona poniżej ocena ryzyka bazuje na tych założeniach, wprowadzając pewne modyfikacje w wyniku, których warianty pesymistyczny i optymistyczny są liczone z zastosowaniem procedury zbliżonej do modeli strukturalnych. W zaproponowanym rozwinięciu model realistyczny jest to uśredniona wartość parametru, obliczona w wyniku uśrednienia kilku realizacji (wariantów) modelu parametru, warianty optymistyczny i pesymistyczny powstają poprzez dodanie modelu wartości jednego odchylenia standardowego parametru:

$$M_o = M_r + M_{sd}$$

$$M_p = M_r - M_{sd}$$

Gdzie:

$M_p$  ó wariant pesymistyczny modelu

$M_o$  ó wariant optymistyczny modelu

$M_r$  - wariant realistyczny modelu

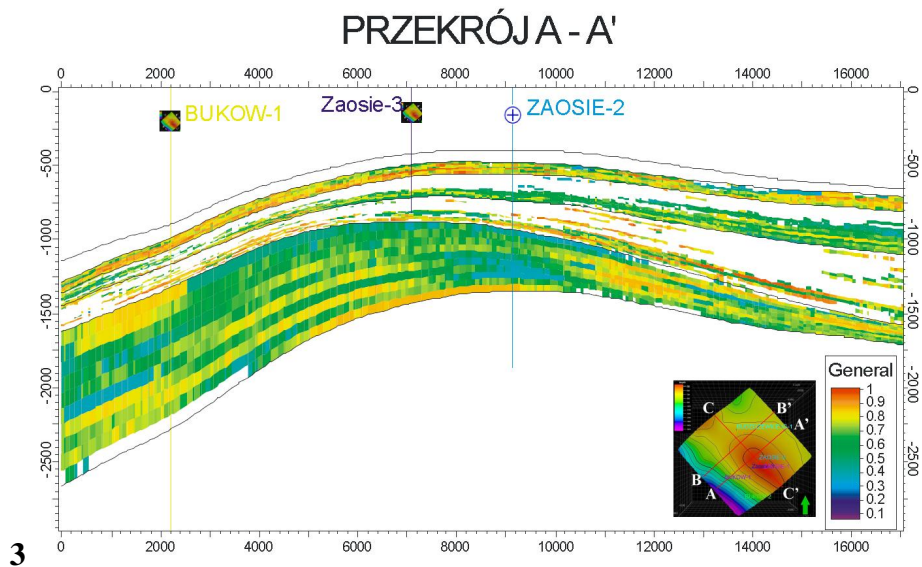
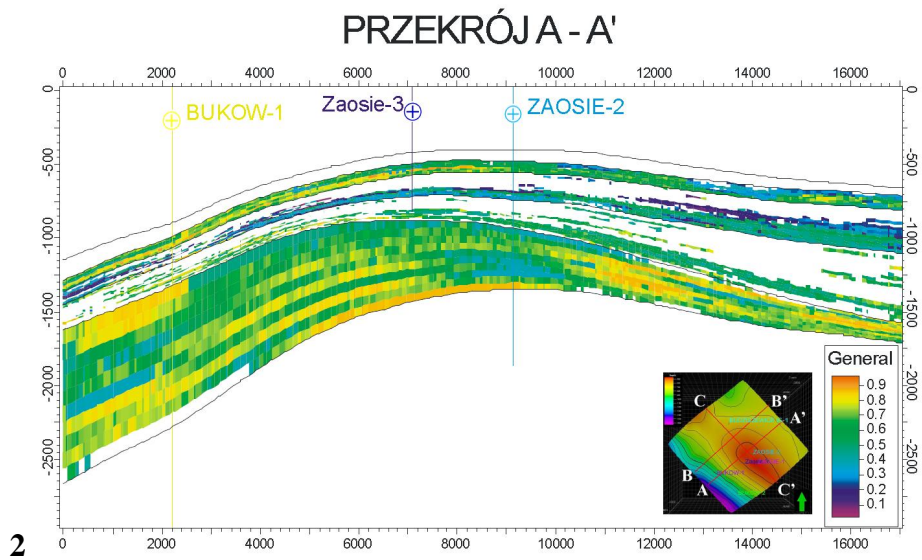
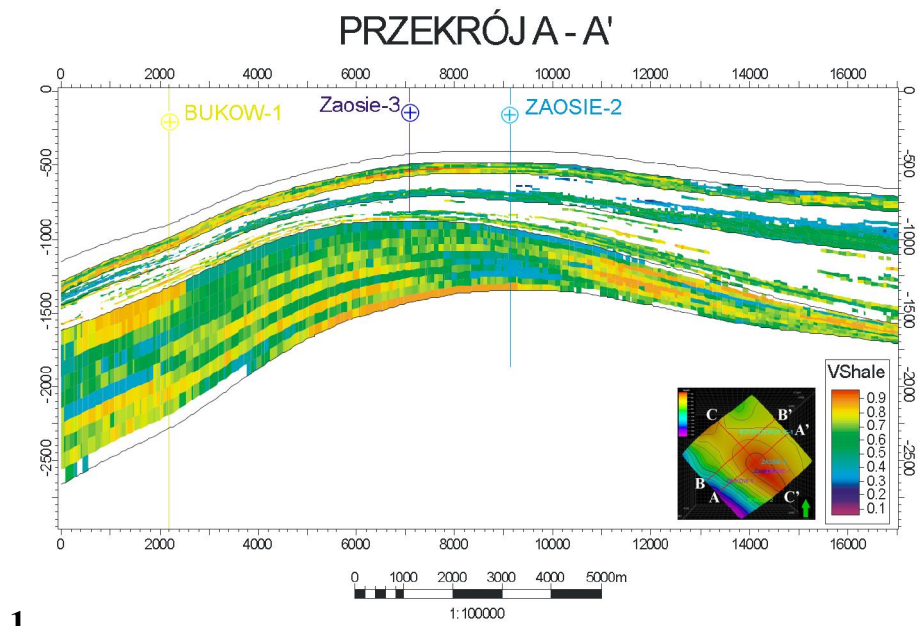
$M_{sd}$  ó model odchylenia standardowego parametru

$M_{sd}$  jest obliczany na podstawie tych samych wariantowych modeli stochastycznych (realizacji), które wykorzystano do obliczenia wyników modeli parametrów (tu porównano i zaliczenia). Otrzymane w ten sposób modele w wariantach optymistycznym i pesymistycznym konturują w populacji o rozkładzie normalnym granice tzw. tarcz obejmujące 68% przypadków (Krawczyk, Słomka 1991). Normalność rozkładów nie testowano statystycznie lecz w wyniku modelowania w klasie petrofizycznych w programie Petrel następuje normalizacja rozkładów statystycznych.

### **Parametry zbiornikowe horyzontów uszczelniających**

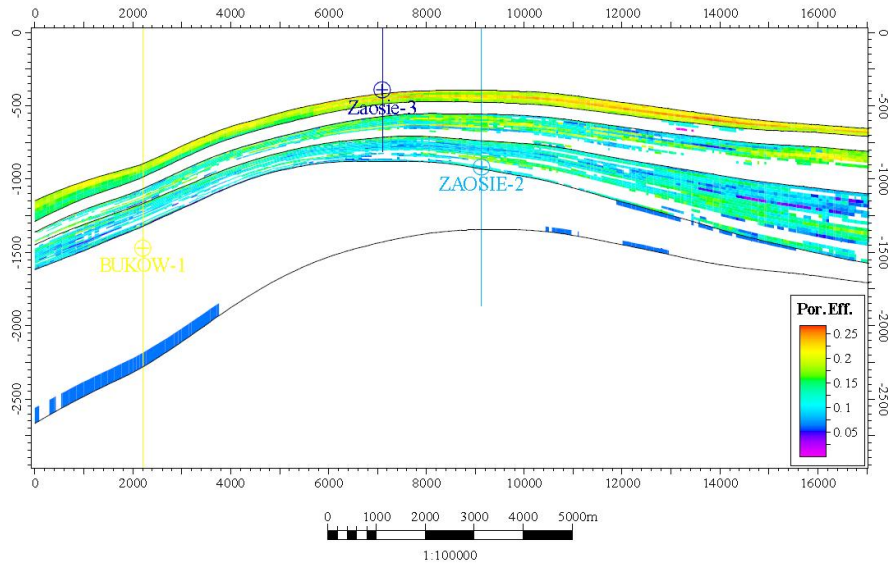
Wariant realistyczny modelu zaliczenia obliczono w wyniku uśrednienia arytmetycznego modeli 5 realizacji stochastycznych modelu zaliczenia. Estymowano je stosując algorytm stochastyczny Sequential Gaussian Simulation (SGS) z wykorzystaniem sterowania procesu estymacji modelem litologicznym (*facies conditioning*). Pesymistyczny wariant modelu zaliczenia obliczono w wyniku odjęcia od modelu uśrednionego (realistycznego) modelu odchylenia standardowego. Wariant optymistyczny modelu zaliczenia kompleksów obliczono poprzez dodanie do uśrednionych wartości zaliczenia obliczonych w modelu realistycznym modelu odchylenia standardowego (Rys. 1.1.17.22).

Podobnie postąpiono w przypadku pozostałych parametrów zbiornikowych (np. porównano i efektywnej poziomów piaskowcowych ó Rys. 1.1.17.23).



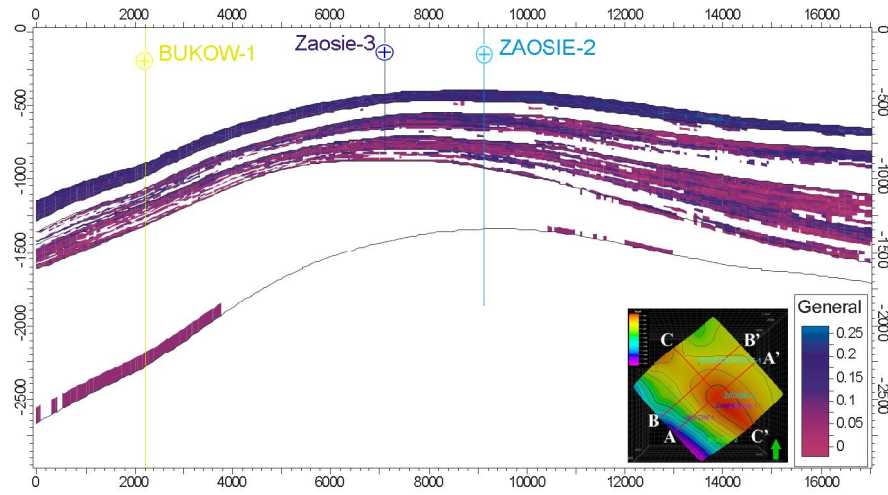
Rys. 1.1.17.22 Model u rednionego zailenia potencjalnych kompleksów uszczelniających ó model realistyczny (1), pesymistyczny (2) i optymistyczny (3).

### PRZEKRÓJ A - A'



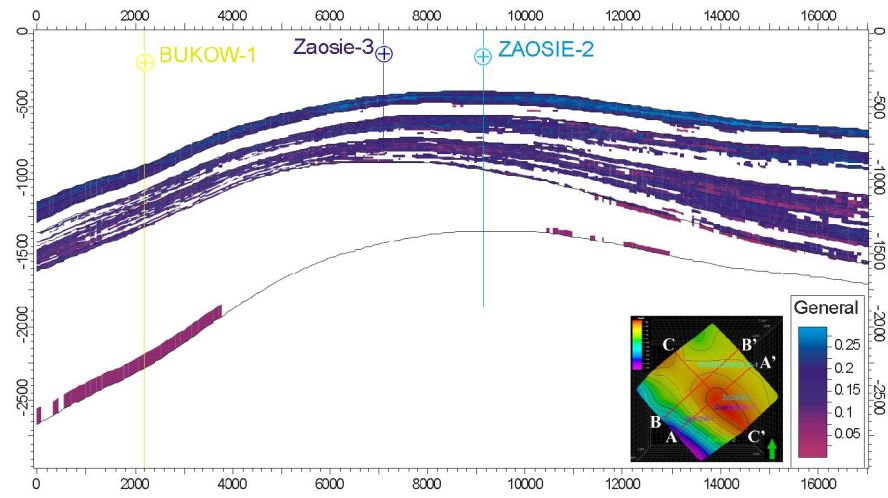
1

### PRZEKRÓJ A - A'



2

### PRZEKRÓJ A - A'



3

Rys. 1.1.17.23 Model porowatości efektywnej kompleksów piaskowcowych ó model realistyczny (1), pesymistyczny (2) i optymistyczny (3).



## 1.1.18 OPRACOWANIE PROGRAMU MONITORINGU DLA WYTYPOWANYCH SKŁADOWISK

Zgodnie z wnioskami z prac przeprowadzonych w ramach zadania 1.1.17 definitywne określenie możliwości bezpiecznego geologicznego składowania w strukturze Budziszewice-Zaosie wymaga dokładnego rozpoznania struktury. Choć jej stopień rozpoznania geofizyk (w tym sejsmik 2D) i otworami jest obecnie nieporównywalnie lepszy niż struktur rezerwowych Wojszyce i Lutomiernik(-Tuszyn) a nawet bardziej w pewnym zakresie lepszy niż po wykonaniu dla tych struktur prac badawczych (przewidywanych w dokumentacjach geologicznych ó Nowak i in., 2009a,b), nie jest on wystarczający na potrzeby zagospodarowania struktury jako składowiska dwutlenku węgla. Do tego celu niezbędne jest zgodnie z zasadami sztuki wykonanie przed zatęszczaniem (najpierw testowym, ale lokalizację otworu do testowego zatęszczania w projekcie demonstracyjnym wybiera się z myślą o jego przyszłym wykorzystaniu do zatęszczania w pełnej skali) monitoringu zerowego (Chadwick et al., 2008). Z kolei prace wykonane w ramach monitoringu zerowego powtarzają się z różną częstotliwością, w zależności od metody i etapu projektu demonstracyjnego, w trakcie zatęszczania i po jego zakończeniu (przed i po przekazaniu operatora odpowiedzialności za składowisko właściwemu organowi, zgodnie z *Dyrektywą 2009/31/WE PARLAMENTU EUROPEJSKIEGO i RADY z dnia 23 kwietnia 2009 w sprawie geologicznego składowania dwutlenku węgla*).

Spośród aktualnie realizowanych lub rozpoczynanych projektów w Europie i na świecie dotyczących geologicznego składowania dwutlenku węgla najważniejsze z punktu widzenia wykorzystania do wiadczeń dla struktur w rejonie Bełchatowa są przedsięwzięcia realizowane na przykładzie Niemczech i Danii.

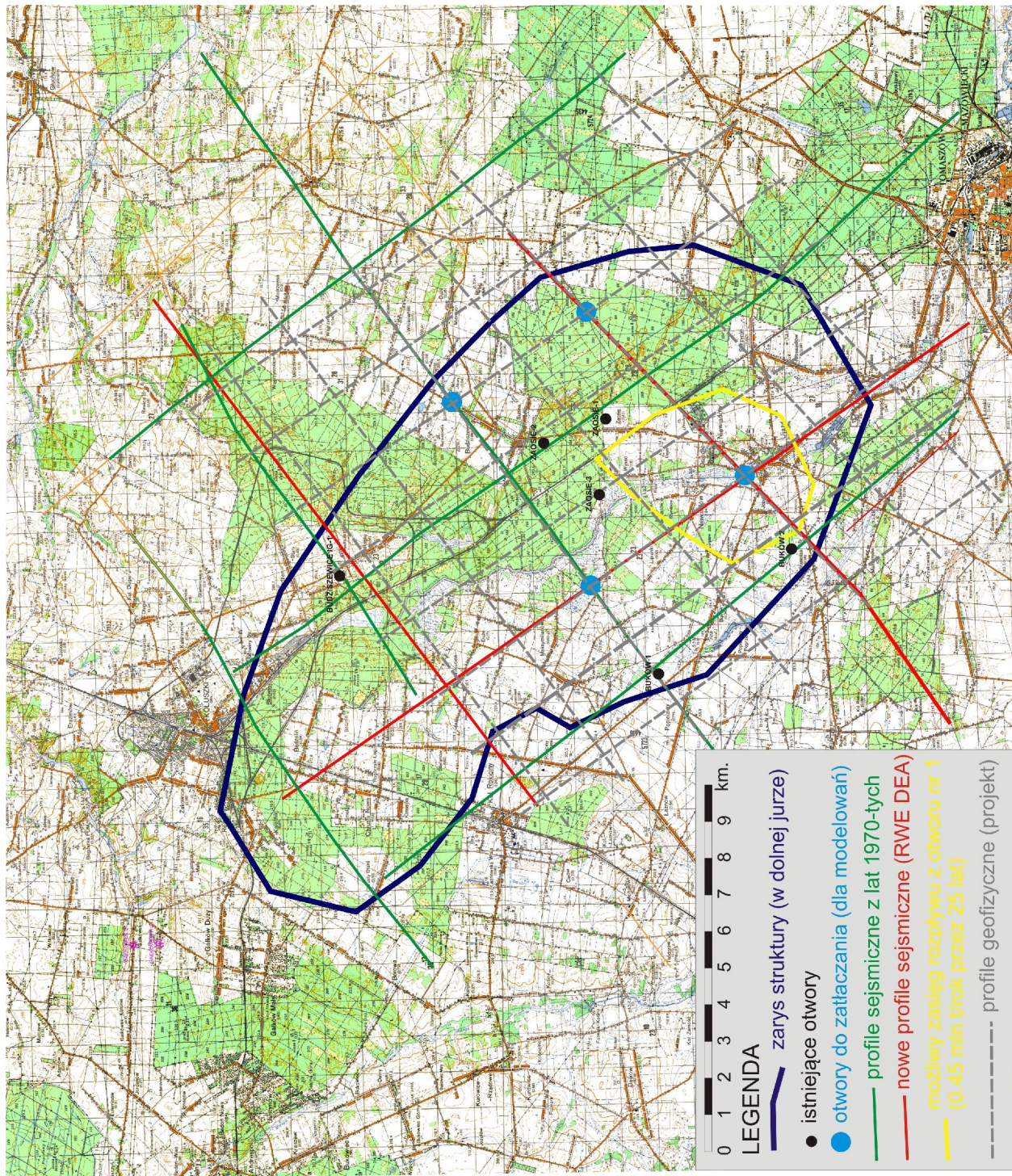
W pierwszym przypadku chodzi głównie o międzynarodowy projekt badawczy CO2SINK, koordynowany przez GFZ Potsdam, gdzie prowadzi się zatęszczanie dwutlenku węgla do stosunkowo płytko (~700 m) występujących formacji triasu górnego w miejscowości Ketzin koło Poczdamu (Prewedel i in., 2008; Wurdemann, 2008). Jest to projekt badawczy pilotowy, gdzie zatęszcza się około 30 tysięcy ton CO<sub>2</sub> rocznie. Wykonano tam monitoring zerowy przy pomocy profili sejsmicznych 2D oraz bardzo bogaty zestaw badań geofizyki otworowej (odwiercono jeden otwór iniekcyjny i dwa otwory monitorujące w odległości poniżej 100 metrów), a także (przy)powierzchniowe badania geochemiczne i biomonitring. W Niemczech planowany jest projekt demonstracyjny dla elektrowni Vattenfalla w Jänschwalde w Brandenburgii (Bernstone, 2009). Rozpatrywane są dwie lokalizacje: Birkholz-Beskow i Neutrebbin, niedaleko granicy z Polską, w rejonie Frankfurtu nad Odrą. Poziomym kolektorskim jest pstry piaskowiec (trias dolny) na głębokości około 1600 metrów. Projekt pilotowy Schwarze Pumpe obejmuje z kolei składowanie w szczypanym złożu gazu Altmärk, czyli dla innej opcji mamy w rejonie Bełchatowa.

W Danii realizowany jest również projekt demonstracyjny CCS, ze składowaniem dwutlenku węgla w poziomach solankowych jury dolnej/triasu górnego w Vedsted w północnej części kraju. Do tej pory wykonano badawcze prace sejsmiczne 2-D i rozpoczęto kampanię szczegółowego rozpoznania struktury sejsmicznej 3-D i wierceniami (Troelsgaard-Sorensen et al., 2009).

W Europie i na świecie jest szereg aktualnie realizowanych lub rozpoczynanych projektów w zakresie geologicznego składowania dwutlenku węgla, spośród których raczej bardziej interesujące w naszym przypadku jest składowanie na przykładzie pod dnem morza (Sleipner ó Chadwick et al., 2009) i w poziomach solankowych a nie w szczypanych złożach w gwałodórów (przynajmniej dla niniejszego opracowania z rejonu Bełchatowa). Biorąc to pod uwagę, okazuje się, że takich projektów nie ma zbyt wiele ó ostatnio w USA ruszył projekt pilotowy Mountaineer (Zachodnia Wirginia: <http://www.aep.com/environmental/climatechange/carboncapture/>), o którym jednak nie jest zbyt wiele wiadomo poza faktem że składowanie przewidziano w poziomach wodonośnych solankowych na głębokości ponad 2 kilometrów.



W ramach niniejszego zadania opracowano plan monitoringu geofizycznego powierzchniowego (PIG-PIB & PBG; sejsmika, grawimetria, metody elektromagnetyczne); geochemicznego i biogeochemicznego w rejonie otworów zatłaczających (IGSMiE PAN), sejsmologicznego (GIG) i przegląd najbardziej zaawansowanych metod monitoringu sejsmicznego, w tym sejsmiki 4D (INiG). Ponadto opracowano plany monitoringu pilotowego zatłaczania i projekty wiercenia otworów iniekcyjnych przy otworach badawczych na strukturach rezerwowych (AGH & PIG-PIB) a nie na strukturze Budziszewice-Zaosie jak dla poprzednich zagadnień.



Rys. 1.1.18.1 Lokalizacja prac geofizycznych dla monitoringu zerowego na tle mapy topograficznej.



## **Plan monitoringu powierzchniowego sejsmicznego, grawimetrycznego i elektromagnetycznego (PIG-PIB & PBG)**

Z uwagi na koszty monitoringu sejsmicznego 4D ograniczono się do zaplanowania monitoringu zerowego i dalszych etapów powierzchniowego monitoringu geofizycznego dla obszaru struktury, w obrębie którego proponuje się zatęszczanie CO<sub>2</sub> (patrz rozdział 1.1.16), obejmującego wysokorozdzielczą sejsmikę 2D, grawimetrię i metody elektromagnetyczne (oraz elektryczne przy otworach). Zagadnienia te zostały ujęte w projekcie prac geologicznych przygotowanym na wypadek wyboru przez PGE EBSA struktury Budziszewice-Zaosie jako składowiska dla projektu demonstracyjnego, natomiast poniżej scharakteryzowano założenia dla tych prac.

Na Rys. 1.1.18.1 przedstawiono lokalizację proponowanych profili geofizycznych w rejonie Budziszewice-Zaosie. Przewidziano wykonanie 15 profili o sumarycznej długości około 250 km. Ponadto bardzo użyteczne byłoby wykorzystanie istniejących profili sejsmicznych, starych i nowych, tzn. wykonanie dla nich reprocessingu dla parametrów analogicznych do tych jakie przewidziano dla akwizycji nowej sejsmiki wysokorozdzielczej, a także wykorzystanie archiwalnego pomiarowego zdjęcia grawimetrycznego (Rys. 1.1.18.2).

Omawiane badania wykonane w ramach monitoringu zerowego należałyby powtórzyć po 2 latach od rozpoczęcia zatęszczania (efekt musi być mierzalny) a następnie co 3 lata a do końca zatęszczania. Po zakończeniu zatęszczania okres ten należałby wydłużyć do 5 lat a po kolejnych 20 latach (przejście odpowiedzialności za składowisko przez właściwy organ) do 10 lat.

### **Metody badań sejsmicznych**

Planowane badania mają umożliwić właściwe wykartowanie antykliny, tektoniki deformujących horyzonty będące przedmiotem badań oraz w szczególności uszczelnienia i wyeliminowanie nadkładu. Dokładne odwzorowanie struktury uskoku jest kluczowe, ponieważ będzie ono pomocne przy oszacowaniu pojemności zaproponowanego zbiornika. Analizowany interwał to kompleks od dolnego toarku do synemuru i hettangu, którego strop występuje dla lokalizacji zatęszczania na głębokości 900 - 1000 m poniżej sejsmicznego poziomu odniesienia (sugerowany to 100 m n.p.m., kilkadziesiąt metrów pod powierzchnią terenu), który odpowiada czasowi podwójnemu 700-900 ms. Parametry akwizycji i opracowania wyników sejsmiki wysokorozdzielczej wzdłuż wspomnianych 15 profili scharakteryzowano poniżej. Wymagane są testy różnej tj. testy sygnału generowanego przez wibratory (sweepu), ilości sweepów, ilości wibratorów, długości sygnału, szerokości pasma i długości taperów.

#### rodzaje wzbudzenia:

- Ilość wibratorów 2 + 1 zapas
- Interwał wzbudzenia 25 m
- Baza sweepowania stacjonarnie
- Sweep 5 - 130 Hz
- Rodzaj sweepu ó liniowy
- Długość sweepu 12 s, 14 s lub 16 s
- Ilość sweepów 1, 2, 3 lub 4
- Długość tapera 300 ms

#### Odbiorniki:

- Ilość kanałów sejsmicznych 480
- Maksymalny offset 1500 m
- Rozstaw rodkowy
- Odległość między kanałami 6,25 m
- Częstotliwość rezonansowa odbiorników 10 Hz
- Grupowanie geofonów 6 geofonów punktowo (umożliwiająca tworzenie DGF)

### Parametry rejestracji:

- Długo zapisu 4 s
- Interwał próbkowania 2 ms
- Krotność pokrycia 60-cio krotne pokrycie

Dla spełnienia w/w wymagań, nowe pomiary sejsmiczne powinny mieć duży szeroki pasma (zarówno na niskim jak i na wysokim końcu spektrum częstotliwości). Metodyka akwizycji wymaga wystarczającej elastyczności aby zapewnić dostateczne wyłączenie szumów otoczenia. Jest to szczególnie ważne tam, gdzie dolna jura zalega głębiej przez co efektywne krotne pokrycia byłyby dla niej wartościowo nominalne.

### Rozpoznanie strefy męch pr dko ci (SMP)

- badanie rozkładu pr dko ci w strefie przypowierzchniowej metodą mikroprofilowania pr dko ci w otworach o głębokościach 40-60m (głębokość musi być wystarczająca do identyfikacji warstwy o pr dko ci co najmniej 1500 m/s)
- krok pomiaru 1m do głębokości 20 m, głębiej co 2 m
- ilość mikroprofilowa pr dko ci: do 50
- ilość LVL: około 160
- miejsce lokalizacji i głębokość mikroprofilowa SMP: na krzyżówkach profili, oraz równomiernie na profilach. W miejscach pogorszenia jakości rejestracji pomiary należy zagłębić.
- na podstawie interpretacji mikrokarota u zostanie wyliczona statyka połowa

### Proponowany schemat przetwarzania danych sejsmicznych:

- Krok próbkowania 2 ms
- Nadanie geometrii i jej kontrola
- Kompensacja zaniku amplitudy trasy sejsmicznej
- Redakcja rejestracji tras (eliminacja tras zakłóconych oraz korekta tras odwróconych)
- Wyłączenie fali powierzchniowej
- Znakowanie pierwszych impulsów dla obliczenia statystyki refrakcyjnej
- Konwersja minimalno - fazowa sygnału
- Powierzchniowe-zgodne skalowanie amplitud zapisu
- Wielokanałowa dekonwolucja powierzchniowo-zgodna
- Aplikacja statyki
- Analizy pr dko ci co ok. 1 km
- Sprawdzanie i korekta wiązania na krzyżówkach
- Automatyczna korekta poprawek statycznych
- Sprawdzanie i korekta wiązania na krzyżówkach
- DMO
- Kolejowe analizy pr dko ci co 0,5 km
- Analiza mutingu zmiennego wzdłuż profilu
- Wprowadzenie poprawek kinematycznych i mutingu
- Skalowanie amplitud (1 okno lub dynamiczne AGC)
- Suma kolejowa
- Sprawdzenie i ewentualna korekta wiązania na krzyżówkach
- Migracja czasowa po skądaniu
- Korekta widma sygnału
- Filtracja częstotliwościowa
- Poprawa stosunku sygnału do zakłócenia
- Skalowanie amplitud tras
- Migracja czasowa przed skądaniem

- Migracja głębokościowa po skądaniu

Ostateczna sekwencja oraz parametry przetwarzania będą wynikiem przeprowadzonych testów oraz QC processingu.

### **Metodyka badań grawimetrycznych**

Celem prac jest dokładne rozpoznanie kompleksów jury, jako wsparcie i weryfikacja wyników sejsmiki. Ponadto wyniki szczegółowych badań grawimetrycznych są użyteczne w processingu danych sejsmicznych (przy analizach dotyczących strefy magmy i głębokości oraz generalnie do weryfikacji modelu głębokości).

Projektowane zdjęcia grawimetryczne obejmie ww. profile sejsmiczne w ilości 15 sztuk. / Liczba długości profili wyniesie około 250 km, a krok pomiarowy na profilu około 100 m. W ramach zdjęć będą również wykonane pomiary pomiędzy profilami i w ich otoczeniu. Wzajemne odległości między tymi stanowiskami (rozproszonymi) wyniosą około 300 m. Planuje się wykonać prace pomiarowe z zagęszczeniem ok. 10 pkt/km<sup>2</sup>.

W przypadku wykonywania cyklicznych pomiarów w ramach monitoringu grawimetrycznego, lokalizacja stanowisk powinna być taka sama jak w pierwszej serii pomiarowej.

### Polowe prace geodezyjne

- założenie 2500 grawimetrycznych punktów profilowych przy odległościach między punktami 100 m, wzdłuż 15 profili sejsmicznych o długości łącznej około 250 km,
- założenie 2500 grawimetrycznych punktów rozproszonych przy średnich odległościach między punktami pomiarowymi ok. 300 m (10-12 pkt/km<sup>2</sup>),
- określenie wysokości  $h$  dla 5000 punktów pomiarowych (niwelacja) z powtórzeniem pomiarów na ok. 5 % stanowisk. średni błąd kwadratowy niwelacji nie powinien przekroczyć  $\pm 0,05$  m; niwelacja należy do sieci państwowej,
- pomiary deniwelacji terenu w promieniu do 100 m wokół stanowisk grawimetrycznych, o ile nachylenie terenu przynajmniej w jednym kierunku okaże się większe niż  $5^\circ$  (dla określenia poprawki topograficznej),
- lokalizacja punktów pomiarowych wg mapy topograficznej w skali 1:25 000 lub 1:10 000 układu 1965.

### Pomiary grawimetryczne

- uzupełnienie istniejącej sieci grawimetrycznej o 1-2 punkty podstawowe przez wykonanie pomiarów 2-5 przez sekcję tych punktów z punktami osnowy grawimetrycznej.
- wykonanie 5500 pomiarów sił ciężkości na 5000 stanowisk pomiarowych,
- wykonanie 250 nawijawczych pomiarów sił ciężkości na stanowiskach bazowych (podstawowych), w tym także pomiary przez sieć podstawową,
- czas trwania ciągów pomiarowych powinien wynosić do 6 godz., a dryft grawimetru nie może przekroczyć 0,1 mGal/godz.,
- wykonanie pomiarów wysokości statywu na wszystkich stanowiskach grawimetrycznych, co umożliwi redukcję pomiaru do powierzchni fizycznej Ziemi,
- średni błąd kwadratowy pojedynczego pomiaru nie powinien przekroczyć  $\pm 0,025$  mGal.

### Prace obliczeniowe i techniczne

- określenie dla każdego stanowiska pomiarowego współrzędnych  $x$  i  $y$  w układzie 1942 na podstawie pomiarów GPS,
- obliczenie dla wszystkich punktów pomiarowych wysokości  $h$  i wartości przyspieszenia sił ciężkości  $g$ ,
- opracowanie modelu rzeźby terenu i obliczenie poprawki topograficznej w strefach do 20 km dla każdego punktu grawimetrycznego,
- obliczenie dla 5000 punktów pomiarowych wartości anomalii sił ciężkości w redukcji Bouguera dla stałej i zmiennej gęstości utworów warstwy zredukowanej,
- zestawienie katalogu punktów pomiarowych zawierającego:

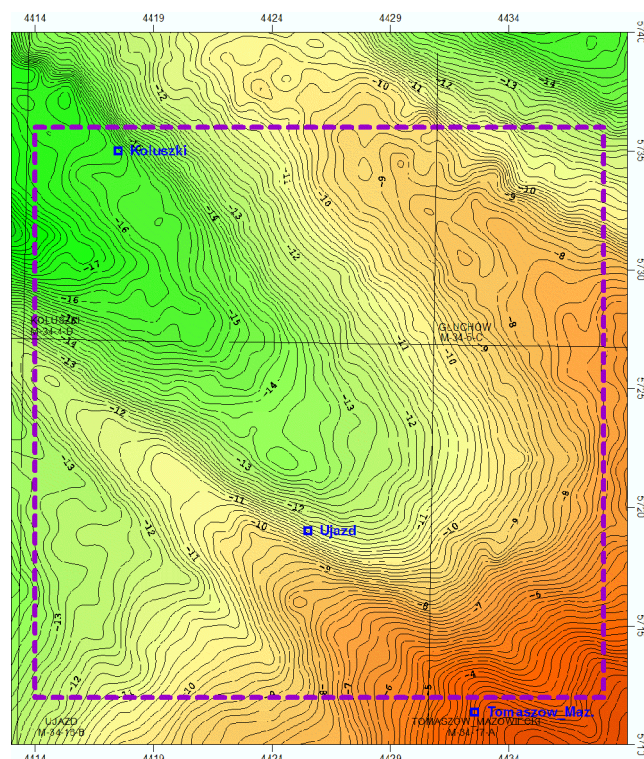
współrzędne  $x$  i  $y$  w układzie 1942 [km],  
wartości przyspieszenia siły ciężkości  $g$  [mGal] w systemie IGSN71,  
wysokości  $h$  punktów [m] dla poziomu odniesienia Kronsztadt,  
wartości anomalii w redukcji Bouguera [mGal] dla stałej i zmiennej gstości  
warstwy zredukowanej oraz dla elipsoidy GRS80,  
wartości sumaryczne poprawki topograficznej siły ciężkości [mGal],

- sporządzenie operatu pomiarowego.

Materiały uzyskiwane z pomiarów polowych będą przetwarzane na bieżąco w systemie komputerowym.

#### Prace interpretacyjne

- opracowanie map anomalii w redukcji Bouguera dla stałej i zmiennej gstości w odniesieniu do poziomu morza,
- opracowanie rozkładu poprawki topograficznej siły ciężkości,
- opracowanie map po transformacjach pomierzonego pola siły ciężkości,
- analiza otrzymanego obrazu pola siły ciężkości.



Rys. 1. Anomalie siły ciężkości w redukcji Bouguera na podstawie danych archiwalnych

#### Objaśnienia:

Anomalie Bouguera dla gęstości stałej  $2,25 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Izolinie kreślono co 0,20 mGal

--- - granica obszaru prac z otoczeniem

Rys.1.1.18.2 Mapa anomalii Bouguera w rejonie badania na podstawie danych archiwalnych.

### Metodyka monitoringu elektromagnetycznego

Prace geoelektryczne wykonano metodami magnetotellurycznymi MT/AMT (w paśmie magnetotellurycznym o MT i audiomagnetotellurycznym o AMT), w wariancie ze sztucznym źródłem pola elektromagnetycznego CSAMT (Controlled Source Audiofrequency Magnetotelluric), IP (Induced Polarization) oraz metodami procesów przejściowych TDEM (Time - Domain Electromagnetic). Projekt prac obejmuje wykonanie prac pomiarowych wraz z przetwarzaniem i



interpretacji danych wzdłuż profili o łącznej długości około 120 km (realizacja wszystkich tych badań umożliwiona aparaturą Phoenix Geophysics Ltd., Kanada).

Etapy analizy zarejestrowanych danych we wszystkich metodach są analogiczne. Przedmiotem interpretacji geofizycznej jest zmienność oporności w ośrodku geologicznym (a w przypadku metody IP także m. im. polaryzowalność, z czym związane są procesy elektrochemiczne zachodzące na granicy ciążystość roztwór) i powiązanie tej zmienności ze zmianami litologicznymi. Ponadto należy zauważyć, że najważniejszy parametr metod elektromagnetycznych – oporność osiowa – ma bardzo wysokie wartości dla "poduszki" nadkrytycznego CO<sub>2</sub> (Chadwick et al., 2008) co powoduje, że metody te są potencjalnie bardzo użyteczne dla monitoringu zatępnionego CO<sub>2</sub> (w skali demonstracyjnej), jako uzupełnienie sejsmiki.

Bezpośrednio przed pomiarami wykonane zostaną prace geodezyjne oraz kalibracja aparatury pomiarowej i czujników pola magnetycznego. W ramach prac geodezyjnych wytyczone zostaną położenia elektrod pomiarowych (dipoli) i czujników pola magnetycznego.

#### Sondowania punktowe o profilowe i parametryczne (MT/AMT)

Jedną z metod wykorzystanych w badaniach będzie metoda sondowa magnetotellurycznych w paśmie magnetotellurycznym o MT i audiomagnetotellurycznym o AMT. Krok pomiarowy punktów podstawowych (5-cio składowych: Ex, Ey, Hx, Hy i Hz) wynosi będzie, w zależności od warunków topograficznych 500 metrów. Dodatkowo do każdego punktu podstawowego wykonany zostanie punkt dodatkowy, 2-składowy (EX, EY) w odległości 250 metrów.

W pracach terenowych wykorzystane zostaną :

- odbiorniki typu V8-6R,
- odbiorniki typu RXU-3ER,
- odbiornik typu MTU-A,
- cewki magnetyczne typu AMTC-30,
- cewki magnetyczne typu MTC-50,

Prace terenowe będą polegać na rejestracji przebiegów czasowych składowych naturalnego pola elektromagnetycznego w paśmie MT/AMT na kolejnych stanowiskach pomiarowych wzdłuż zaprojektowanych linii profili. Rejestracje odbywać się będą synchronicznie na dwóch punktach: polowym i referencyjnym. Rejestracje składowych pola elektromagnetycznego realizowane będą w zakresie częstotliwości 0.001 do 10000 Hz. Czas rejestracji dla omawianych badań, na jednym punkcie pomiarowym wynosi będzie wynosić ok. 24 do 36 godzin, w zależności od warunków pomiarowych (poziomu zakłócenia).

Podstawowy układ pomiarowy sondowa MT/AMT składa się będzie z odbiornika V8-R6 i odbiornika RXU-3ER co pozwoli na równoczesną rejestrację naturalnego pola EM przy pomocy dwóch par wzajemnie prostopadłych dipoli elektrycznych Ex, Ey, oraz trzech czujników magnetycznych typu AMTC-30 (pasmo AMT) i MTC-50 (pasmo MT) do pomiaru składowych odpowiednio Hx, Hy, Hz, lokalizowanych w pobliżu układu dipoli elektrycznych. Odbiorniki V8-R6 i RXU-3ER zlokalizowane będą w odległości 250 m od siebie. Dipole elektryczne zbudowane będą z kabla ekranowanego typu CX-75 i pary uziemie w postaci elektrod niepolaryzujących. Dipole elektryczne i czujniki magnetyczne podłączone będą bezpośrednio do odbiornika V8-6R natomiast dodatkowe dipole elektryczne do odbiornika RXU-3ER. W celu zmniejszenia wpływu zakłóceń elektromagnetycznych pomiary wykonywane będą dwupunktowo z tzw. *zdalnym punktem odniesienia* (punkt referencyjny), na którym zapisywane będą składowe elektryczne i magnetyczne. Punkty pomiarowe lokalizowane będą wg mapy topograficznej. Dla każdego punktu wykonany zostanie szkic sytuacyjny układu pomiarowego z domiarami do charakterystycznych punktów terenowych.

#### Pomiary terenowe metod kontrolowanego źródła (CSAMT/IP)

Podstawowy układ pomiarowy zastosowany przy pomiarze metod CSAMT/IP dla odbiornika sygnał składa się będzie z 3 dipoli elektrycznych Ex ułożonych w linii profilu, oraz czujnika magnetycznego zlokalizowanego w pobliżu układu dipoli elektrycznych (tylko w przypadku

CSAMT). Długość dipoli wynosi od 25 do 100 m. Rodzajem fali elektromagnetycznej będzie układowy nadawczy zbudowany z dwóch grup elektrod stalowych. Długość dipola przede wszystkim zależy od przyjętej metodyki prac i wynosi od kilkudziesięciu metrów (pomiarów IP układem dipol-dipol) do kilku kilometrów (pomiarów CSAMT). Grupy elektrod podłączone będą do transmitera (nadajnika). Transmitter zasilany będzie prądami zmiennymi. Przebiegi czasowe zapisywane będą na karcie pamięci zainstalowanej w sterowniku nadajnika podłączonym do transmitera.

Czas rejestracji oraz czułość próbkowania pola elektromagnetycznego na pojedynczym punkcie pomiarowym zostanie ustalony w trakcie prac polowych. Synchronizacja sygnału pomiarowego przede wszystkim i pomiarowym odbywa się z użyciem urządzeń GPS.

Punkty pomiarowe lokalizowane będą według mapy topograficznej. Dla każdego punktu pomiarowego wykonany będzie szkic sytuacyjny układu nadawczego i pomiarowego z pomiarami do charakterystycznych punktów terenu.

#### Pomiary metod procesów przejściowych (TDEM)

Typowy system pomiarowy dla metody TDEM będzie składał się z nadajnika (transmitter-Tx), podłączonej do niego kwadratowej pętli nadawczej wykonanej z przewodnika umieszczonego na powierzchni ziemi oraz odbiornika (receiver-Rx) wraz z podłączonym do niego pętlą odbiorczą MTEM-AL.

Rozmiar pętli nadawczej jest uzależniony od potrzebnej głębokości penetracji. Dla głębokości penetracji do 1000 m i więcej konieczne jest stosowanie pętli nadawczej o rozmiarach około kilometry, dlatego do osiągnięcia zamierzonego celu bok kwadratowej pętli nadawczego układu pomiarowego dla metody TDEM będzie wynosił 1000 - 1200 m. Odbiornikiem w metodzie TDEM będzie wielozwojowa cewka (MTEM-AL) zlokalizowana na powierzchni ziemi wewnątrz pętli nadawczej (central loop) w odległości od wyznaczonego położenia pętli nie mniejszej niż 25% długości boku pętli.

#### Przetwarzanie danych i prace interpretacyjne

Przetwarzanie danych pomiarowych odbywa się przede wszystkim w dwóch etapach. Etap pierwszy to tzw. pre-processing obejmujący takie czynności jak kontrola jakości i wykonywane przede wszystkim w trakcie prac polowych. W etapie drugim, w pracach laboratoryjnych, stosowane będą bardziej zaawansowane procedury przetwarzania danych, w tym tzw. robust remote reference processing.

Interpretacja przetworzonych danych będzie miała charakter zarówno ilościowy jak i jakościowy. Ostateczne przekroje i mapy geoelektryczne uzyskane zostaną na drodze inwersji 1D i 2D danych elektromagnetycznych. W przypadku interpretacji sondowania MT/AMT możliwe będzie także modelowanie 3D pozwalające na przestrzenną analizę zmienności oporności w środowisku geologicznym.

### **Metodyka monitoringu elektrooporowego**

Celem prac jest określenie rozkładu oporności ośrodka geologicznego w otoczeniu otworów zatracających, co ma znaczenie dla rozpoznania litologii utworów przypowierzchniowych.

W rejonie każdego otworu zatracającego przewiduje się wykonanie badań metodami sondowania elektrooporowych, w regularnej siatce, o oczku (odległości pomiędzy poszczególnymi sondowaniami) siatki 100m. Badania takie powinny obejmować w przybliżeniu teren o kształcie kwadratu równobocznego o boku 1000 m, którego środek wyznaczy planowany otwór. Maksymalny rozstaw elektrod AB powinien umożliwić ledzenie stropu utworów podczwartorzędowych.

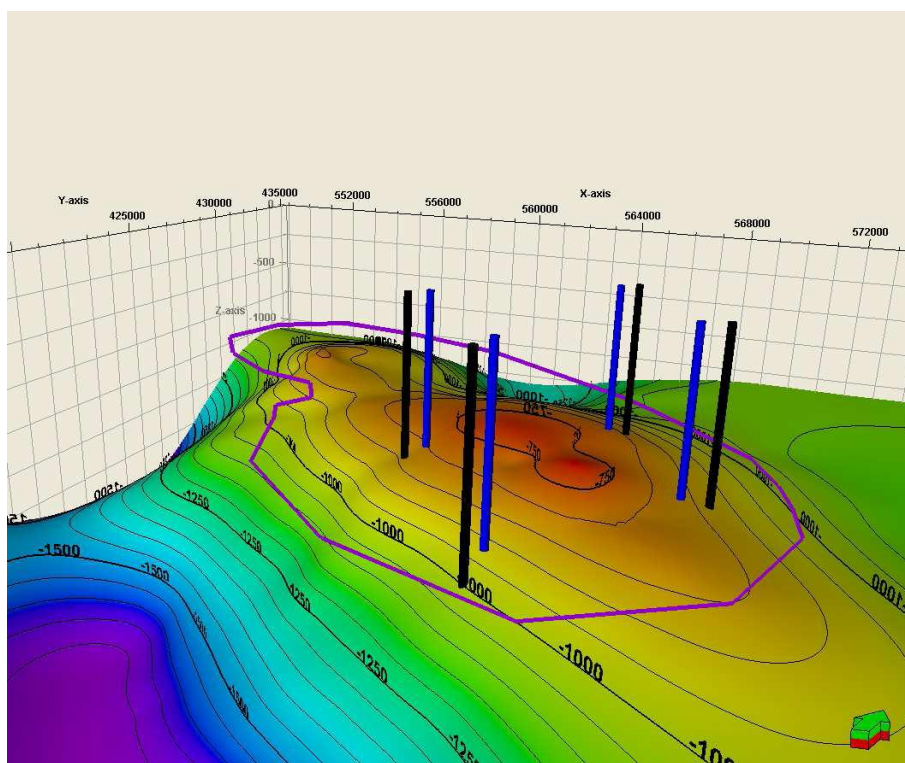
W rejonie każdego otworu zatracającego przewiduje się wykonanie badań metodami tomografii elektrooporowej. Przewiduje się wykonanie 10 równoległych profili o długości 1000 m, odległych od siebie o 100 m. Badania takie powinny obejmować w przybliżeniu teren o kształcie kwadratu równobocznego o boku 1000 m, którego środek wyznaczy planowany otwór. Rozstaw elektrod na profilu powinien wynieść nie więcej niż 10 m, a badania powinny umożliwić szczegółowe rozpoznanie ośrodka do co najmniej 50 m p.p.t.

## Monitoring sejsmologiczny i metod tomografii pasywnej (GIG)

Metoda sejsmologiczna może służyć przede wszystkim do badania zjawisk mikrosejsmicznych wywołanych powstawaniem szczelin na skutek wtłaczania CO<sub>2</sub>. Zjawiska sejsmiczne powinny występować szczególnie w sytuacji zbiorników charakteryzujących się niską przepuszczalnością, gdy zatłaczanie następuje pod wysokim ciśnieniem. W takiej sytuacji rejestrowane fale sejsmiczne przez zainstalowaną na stacji sejsmologicznej mogą być interpretowane w celu śledzenia rozprzestrzeniania się plamy CO<sub>2</sub> oraz potencjalnych dróg migracji w nadkładzie stanowiącym izolację. Niezależnie od zjawisk parasejsmicznych sejsmologiczna służy do monitorowania sejsmiczności naturalnej lub wstrząsów górniczych w przypadku składowania na terenach przyległych do obszarów górniczych.

Jednym z potencjalnych poziomów kolektorskich rozpatrywanej struktury jest górny odcinek formacji ostrowieckiej (synemur ó jura dolna). 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. Bezpośrednim uszczelnieniem dla tego poziomu zbiornikowego są ilaste utwory formacji gielniowskiej. Charakteryzują się one znaczną miąższością w szczytowych i północno-wschodnich partiach antykliny Budziszewice (do 98 m). Poziom ten ulega znacznemu cienieniu na południowo-zachodnim skłonie struktury (do około 35 m), co stanowi wartość wyrażoną w odniesieniu do zakładowanej dla poziomów uszczelniających.

Monitorowanie sejsmologiczne może się odbywać w czterech otworach monitorujących, wywierconych w odległości kilkudziesięciu metrów od czterech otworów iniekcyjnych. Rozmieszczenie otworów monitorujących jest w kierunku od otworów iniekcyjnych do wierzchołka antykliny Budziszewice-Zaosie (Rys. 1.1.18.3), czyli generalnie w kierunku modelowego rozprzestrzeniania się chmury. Otwory monitorujące dla struktury Budziszewice-Zaosie w jurze dolnej ó synemur, nie będą przekraczały głębokości 1000 metrów poniżej poziomu morza.



Rys. 1.1.18.3 Rozmieszczenie otworów do zatłaczania (czarne) oraz otworów monitorujących (niebieskie) na tle stropu utworów kolektora (jura dolna ó synemur); głębokości od poziomu morza.

## Sie sejsmologiczna

Budowa sieci sejsmologicznej jest jednorazowym wydatkiem na cały czas trwania procesu zatęszczania oraz na monitoring w czasie po likwidacji zbiornika (w przypadku analizowanej struktury to około 50 lat). Sie sejsmologiczna składa się z czujników drgań, transmisji danych i rejestratora wstrząsów. Drgania sejsmiczne zarejestrowane po wystąpieniu wstrząsu są automatycznie wyzwalane i rejestrowane w pamięci rejestratora.

Następnie poprzez transmisję (np. łączność komórkowa, linia kablowa) są automatycznie przesyłane do stacji bazowej, gdzie są gromadzone w formie plików cyfrowych. Zastosowanie odbiorników GPS na każdym stanowisku pomiarowym umożliwia wiarygodne czasowanie odebranych sygnałów przy wspólnej podstawie czasu, co pozwala w dalszej kolejności na interpretację zjawisk sejsmicznych (lokalizacja, magnituda, spadek naprężenia, tomografia). Aparatura tego typu jest produkowana przez wiele specjalistycznych firm, w tym dla kopalń podziemnych również przez Główny Instytut Górnictwa. Oprogramowanie GIG jest napisane w środowisku Windows i pozwala na interpretację zarówno samych wstrząsów jak i wykonanie obliczeń tomograficznych z promieniem krzywoliniowym oraz z promieniem prostoliniowym z wykorzystaniem algorytmów ewolucyjnych.

Czujniki drgań powinny być rozmieszczone przestrzennie, w celu uzyskania odpowiedniej wiarygodności lokalizacji zjawisk sejsmicznych w obszarze interesującego nas górotworu oraz wykonania wiarygodnych obliczeń tomograficznych. W tym celu czujniki drgań przypowierzchniowe powinny być natomiast umieszczone pod powierzchnią (sondy pomiarowe w wąskich otworach 20-30m, co zmniejsza szumy w porównaniu do lokalizacji czujników na powierzchni) oraz w otworach głębokich, najlepiej na głębokości zbliżonej do poziomu zatęszczania oraz na głębokościach porównywalnych między powierzchnią a poziomem zatęszczania. Do tego celu można wykorzystać otwory monitorujące dla procesu zatęszczania. Warunkiem takiego rozwiązania jest jednak podjęcie decyzji o budowie przestrzennej sieci sejsmologicznej na etapie wiercenia otworów, gdy jest to odpowiedni moment na ich zamontowanie. W przypadku specjalistycznych sond do pomiaru drgań i rejestracji zjawisk sejsmicznych podczas zatęszczania mediów do zbiorników, montowanych w otworach wiertniczych na stałe, można znaleźć kilka firm oferujących taki produkt. Można tutaj przykładowo wymienić produkty Terrascience System Ltd, pracujące na strukturze Violet Grove w Albercie, Kanada, a przede wszystkim produkty firmy SERCEL.

Czujniki drgań powinny być rozmieszczone przestrzennie, w celu uzyskania odpowiedniej wiarygodności lokalizacji zjawisk sejsmicznych w obszarze interesującego nas górotworu oraz wykonania wiarygodnych obliczeń tomograficznych. W tym celu czujniki drgań przypowierzchniowe powinny być natomiast umieszczone pod powierzchnią (sondy pomiarowe w wąskich otworach 20-30 m, co zmniejsza szumy w porównaniu do lokalizacji czujników na powierzchni) oraz w otworach głębokich, najlepiej na głębokości zbliżonej do poziomu zatęszczania oraz na głębokościach porównywalnych między powierzchnią a poziomem zatęszczania. Do tego celu można wykorzystać otwory monitorujące dla procesu zatęszczania. Warunkiem takiego rozwiązania jest jednak podjęcie decyzji o budowie przestrzennej sieci sejsmologicznej na etapie wiercenia otworów, gdy jest to odpowiedni moment na ich zamontowanie.

Sie sejsmologiczna może być również wykorzystana do monitorowania sejsmiczności nie związanej z procesem zatęszczania CO<sub>2</sub>. W strefach naturalnej aktywności sejsmicznej jest to trzęsienie Ziemi natomiast w strefach prowadzenia działalności górniczej są to wstrząsy górotworu indukowane procesem eksploatacji oraz warunkami lokalnej tektoniki. Z pierwszymi zjawiskami mamy w Polsce do czynienia rzadko i są to zjawiska o małej i średniej intensywności. Wstrząsy indukowane działalnością górniczą (GZW, LGOM, Bełchatów) mogą również sporadycznie osiągać intensywność rzędu 5-7, szczególnie w rejonie epicentralnym. Jeżeli ogniska takich wstrząsów lokalizowane są na powierzchniach uskokowych w rejonie planowanego zbiornika CO<sub>2</sub>, to w ich efekcie nastąpi powstanie skałków rólde wstrząsu, co może stanowić potencjalną drogę wycieku CO<sub>2</sub>. Monitorowanie sejsmiczności pozwala na ocenę ryzyka sejsmicznego w obszarze

skądowania CO<sub>2</sub> i zastosowanie wyprzedzaj co profilaktyki.

### **Monitorowanie aktywności sejsmicznej w trakcie procesu skądowania CO<sub>2</sub>.**

W zbiornikach CO<sub>2</sub> o niskiej porowatoci oraz przy du ych ci nieniach wtaczania, mo na oczekiwa wyst powania aktywnoci sejsmicznej. W takiej sytuacji prowadzenie staego monitoringu sejsmologicznego mo e da bardzo due korzy ci. Zarejestrowane zjawiska sejsmiczne s niecenionym i praktycznie darmowym ródem fal sejsmicznych. Sejsmika prospekcyjna wymaga wykonania drogich strzela i pomiarów -in situøaby uzyska dane do interpretacji. Tutaj wstrz sy indukuj si przy okazji samego procesu skądowania CO<sub>2</sub>.

Zastosowanie algorytmów do przestrzennej lokalizacji ognisk wstrz sów pozwala na ledzenie rozprzestrzeniania si i dróg migracji CO<sub>2</sub>. Zarejestrowane procesy p kania skaø na skutek wtaczania CO<sub>2</sub> pod du ym ci nieniem, pozwalaj równie na oszacowanie jako ci skaø zbiornikowych. W tym celu mona wykorzysta analizy parametrów ródca drga , takie jak spadek napr e , napr enia pozorne, aktywno sejsmiczna, moment sejsmiczny, przemieszczenie w ognisku, promie ogniska. Przykądowo due spadki napr e b d wiadczyø, e aktualnie wtaczamy w gorszym fragmencie zbiornika. W poczeniu z tomografi pasywn równie wykorzystuj c do oblicze naturalne šdarmoweø zjawiska sejsmiczne, metoda sejsmologiczna daje du o szersze i bardziej wiarygodne badania masywu skalnego i samego procesu zatczania do niego CO<sub>2</sub>.

### **Mo liwo ci zastosowania tomografii pasywnej do diagnostyki zmian w strukturach geologicznych w czasie procesu skądowania CO<sub>2</sub>.**

Wykorzystuj c naturalne zjawiska dynamiczne wywoywane tworzeniem si nowych szczelin podczas procesu zatczania CO<sub>2</sub> zarejestrowane przez przestrzenn sie sejsmologiczn , mo na wykonywa obliczenia pola pr dko ci fal sejsmicznych metod tzw. tomografii pasywnej. Metoda ta polega na ocenie i analizie pola pr dko ci fali podanej w przesuwaj cym si oknie czasowym. Technika taka pozwala na ledzenie zmian pola pr dko ci i korelowanie ich ze zmianami zachodz cymi w rejonie zatczania CO<sub>2</sub> oraz w nadkadzie. Mo e to pozwoli równie na ledzenie migracji i geometrii zatczonego CO<sub>2</sub>, o ile obrazy tomograficzne liczone b d w kolejnych oknach czasowych ukazuj c zmiany w czasie (tomografia pasywna 4D). Metoda wymaga oczywi cie zainstalowania staej sieci sejsmologicznej w rejonie zbiornika i zastosowania odpowiednich programów do tomografii pasywnej w wersji z krzywoliniowym promieniem. Opracowywanie kolejnych obrazów tomograficznych mogby si odbywa z dua cz stotliwo ci , nie wymaga by du ych nakładów finansowych i byby zdecydowanie ta sze od sejsmiki 3D i 4D. Niewtpliwie zastosowanie tomografii pasywnej byby du ym przeemem w monitorowaniu procesu zatczania CO<sub>2</sub>, zarówno pod wzgl dem jako ci wyników jak i obni enia kosztów. Warunkiem zastosowania tej metody jest jednak wyst powanie zjawisk sejsmicznych w trakcie zatczania. Eksploatacja w glowodorów jak równie hydroszczelinowanie skaø wskazuj , e nale y spodziewa si wyst powania aktywnoci sejsmicznej dla tych procesów (Baria i inni 2006). Równie zatczanie CO<sub>2</sub> powinno wywoywa powstawanie efektów dynamicznych zwi zanych z sp kaniem masywu skalnego podczas tego procesu. Niezale nie od naturalnych zjawisk dynamicznych stanowi cych ródca fal sejsmicznych do tomografii pasywnej, mo na wspomóc si wytwarzaniem ich przy pomocy ródca sztucznych (wibratory lub strzelania MW ó podobnie jak to si robi w sejsmice prospekcyjnej). Przewag systemu sejsmologicznego zamontowanego na staø jest w takim przypadku przestrzenne rozmieszczenie czujników drga (lepsza dokadno i wiarygodno odwzorowania pola pr dko ci) oraz ni sze koszty. Tomografia pasywna wydaje si w tej chwili jedna z najbardziej obiecuj cych metod ledzenia sp ka w masywie skalnym oraz ledzenia rozwoju chmury zatczonego CO<sub>2</sub> oraz wykrywania dróg migracji CO<sub>2</sub>.



### Opis sieci sejsmologicznej dla struktury Budziszewice-Zaosie

W kolektory struktury Budziszewice-Zaosie planuje się wtłaczać czterema otworami 1.8 mln ton CO<sub>2</sub> rocznie (450 tys. ton rocznie w każdym otworze przez okres 25 lat). W pierwszym roku w instalacji demonstracyjnej testowej planowane jest wtłoczenie 20 tys. ton w otworze 1.

Czujniki drga powinny być zamontowane w otworach monitorujących, a ich parametry powinny wytrzymać w środowisku do 150°C, do 50 MPa ciśnienia.

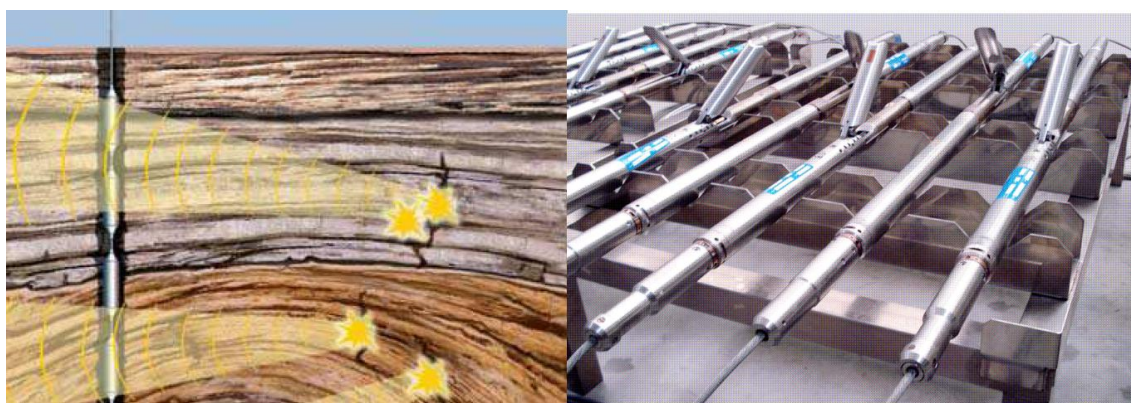
#### Etap I

Proponuje się zainstalowanie 12 trójskładowych czujników drga w otworze monitorującym 10 (Rys. 1.1.18.4). Pierwszych czujników należy zainstalować co 10-15m w ostatnich 50 m otworu (kolektor), a kolejne 11 czujników w odstępach 30 m (powyżej). Sygnały z czujników (zjawiska sejsmiczne) rejestrowane winny być automatycznie na rejestratorze na powierzchni. Ponadto proponuje się instalację systemu przypowierzchniowych sond geofonowych w punktach otworów (30-50m). Połączony wspólnym czasem (GPS) geofony w otworze monitorującym oraz geofony przypowierzchniowe, pozwolą na pseudo-ciągłą obserwację mikrosejsmologiczną podczas zatłaczania CO<sub>2</sub>, wykonywania 4D obrazów tomograficznych (w przypadku znaczącej aktywności sejsmicznej) metodą tomografii pasywnej, a w przypadku słabej aktywności sejsmicznej - metodą tomografii aktywnej (wykonanie strzału impulsami MW lub metodą wibracji). Z pomiarami mikrosejsmologicznymi oraz pasywną tomografią w zaproponowanej geometrii sieci geofonowej, można na równocześnie wykonywać inne pomiary i analizy znane z aktywnej sejsmiki prospekcyjnej, takie jak profilowanie VSP, time-lapse czy AVO.

Przykładem takiego poligonu, na którym do mikrosejsmologii, tomografii pasywnej i sejsmiki aktywnej wykorzystuje się wspólnie geofony zainstalowane na stałe, jest zbiornik Penn West w Albercie w Kanadzie, gdzie wtłaczany jest CO<sub>2</sub>. Ze względu na długoletnie wtłaczanie CO<sub>2</sub> do zbiornika Budziszewice-Zaosie (planowane 25 lat) i obowiązek monitorowania po zamknięciu składowiska przez kolejne 20-30 lat, rozwinięcie z geofonami zainstalowanymi na stałe wydaje się być najlepsze i najtańsze.

#### Etap II

Proponuje się zainstalować w czterech otworach monitorujących po 12 trójskładowych czujników drga. Odległości między otworami są rzędu 5 km i przy silniejszym zjawisku sejsmicznym, powinniśmy uzyskać zarejestrowane drgania na wszystkich czujnikach. Do otworów monitorujących proponuje się zakupić dobrej klasy, cienkie sondy (slim), które łatwiej jest zamontować w otworze, a takie nie zajmują zbyt dużo miejsca w otworze. Przed zakupem i montażem czujników otworowych, powinno być wykonane modelowanie przebiegu i pokrycia obszaru badań promieniami sejsmicznymi, co pozwoli dobrać optymalne rozmieszczenie sejsmicznych sond pomiarowych.



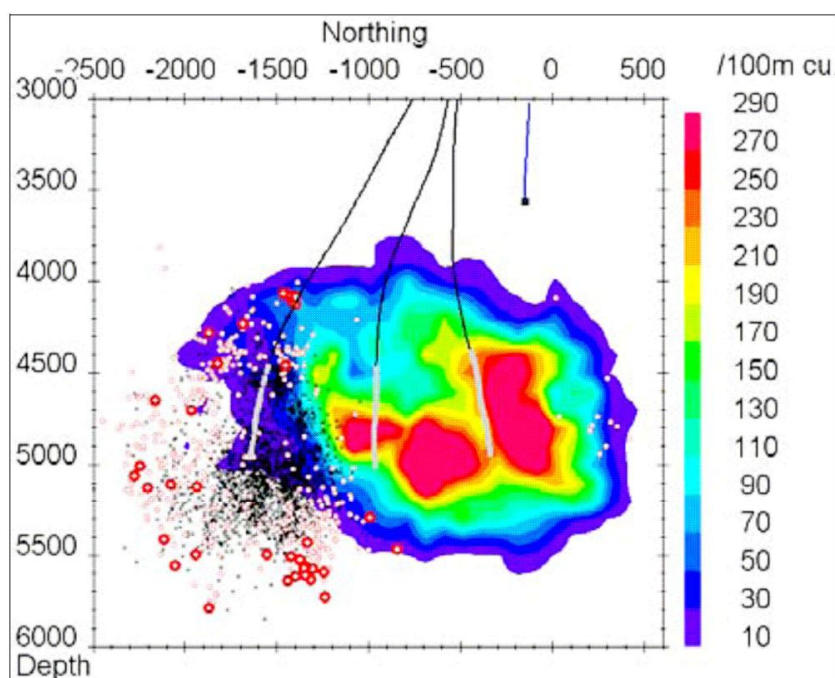
Rys. 1.1.18.4 Widok sondy geofonowej do otworów SLIMWAVE™ produkcji firmy SERCEL.

Przykładowy sprzęt (parametry sprzętu) opisane są na bazie produktów firmy SERCEL, która prowadzi wiele projektów monitorowania sejsmicznego podczas zatęszczania mediów do skały.

Dla naszego celu optymalne z oferty SERCEL są cienkie sondy geofonowe o nazwie SLIMWAVETM, których średnica wynosi 43 mm (1 11/16 cala) i mogą być stosowane w otworach od 2 1/4 cala do 13 cala. Sondy te mogą pracować w środowisku do 100 MPa oraz w temperaturze do 150°C. Przy głębokości otworów rzędu 1000-1500m są to parametry w zupełności wystarczające. Do rejestracji wstrząsów używana jest aparatura Wavelab Acquisition Panel, wraz z odpowiednim oprogramowaniem i przesyłaniem danych pomiarowych. System może pracować w trybie czuwania, czyli wyzwalania zapisu tylko po wystąpieniu wstrząsu (drżania) o wybranym poziomie amplitudowym, a próbkowanie sygnału jest skorelowane z czasem bezwzględnym z GPS. Na Rys. 1.1.18.4 przedstawiono widok sond SLIMWAVETM firmy SERCEL.

Powierzchniowa sieć geofonów może składać się z kilkudziesięciu sond, umieszczonych ze względu na zmniejszenie szumów w płytkich otworach 20-30m. Mogą to być geofony produkowane przez wiele firm. Przykładem może być sonda trójosiowa firmy GeoSig (takie sondy pracują w Górnośląskiej Regionalnej Sieci Sejsmologicznej GIG). Sygnał przypisanym czasem bezwzględnym z GPS przesyłany jest przez modem komórkowy do aparatury rejestrującej wstrząsy.

W efekcie naturalnej sejsmiczności podczas procesu zatęszczania CO<sub>2</sub> oraz ewentualnie sztucznych drgań wadkami MW lub metod wibracyjnych, uzyskuje się zbiór rejestracji z otworów i z powierzchni o wspólnej podstawie czasu. Można wówczas wykonywać analizy danych sejsmometrycznych w aspekcie lokalizacji zjawisk sejsmicznych (miejsca powstania skały kolektora podczas zatęszczania CO<sub>2</sub>, uzyskania obrazów pola prędkości z tomografii pasywnej lub aktywnej 3D i 4D (przekroje pionowe i na wybranych horyzontach w poziomie w celu śledzenia rozwoju chmury CO<sub>2</sub>), jak również obrazy uzyskane z analizy VSP, time lapse seismic i AVO. Do lokalizacji zjawisk sejsmicznych oraz do obliczania parametrów źródła sejsmicznego GIG posiada odpowiednie własne oprogramowanie. Podobnie GIG dysponuje oprogramowaniem do tomografii pasywnej z promieniem krzywoliniowym oraz do tomografii aktywnej.



Rys. 1.1.18.5 Przykład lokalizacji zjawisk sejsmicznych podczas wiercenia studni w celach geotermalnych (Baria i in. 2006).

Na Rys. 1.1.18.5 pokazano przykład lokalizacji zjawisk sejsmicznych przy uruchamianiu otworów geotermalnych (Baria i inni, 2006). Taka sejsmiczność zapewnia dokładny i tani monitoring ruchu chmury CO<sub>2</sub>, o ile jest zarejestrowana przez odpowiednią sieć geofonów zainstalowanych na stałe.

Należy mocno podkreślić, że żadne inne rozwiązanie sprzętowe ani zaopiekanie sieci geofonów w otworach i przy powierzchni, nie zapewni możliwości ciągłego monitorowania zjawisk sejsmicznych podczas zatęszczania CO<sub>2</sub> oraz nie pozwoli na wykonywanie pasywnej tomografii. Przy niskiej porowatowości zbiorników w Polsce, z bardzo dużym prawdopodobieństwem należy oczekiwać aktywności sejsmicznej podczas zatęszczania CO<sub>2</sub>, co może znacznie poprawić jakość wyników monitorowania rozprzestrzeniania się plamy CO<sub>2</sub>, a równocześnie nie obniży kosztów w stosunku do drogiej metody sejsmicznej, szczególnie w wydaniu 3D i 4D.

### **Podsumowanie**

Poza standardowo stosowanymi aktualnie technikami monitorowania, w dokumentacji zaproponowano wykorzystanie metody sejsmologicznej do monitorowania geologicznego składowania CO<sub>2</sub>. Stacjonarna sieć sejsmologiczna jest w stanie rejestrować zjawiska sejsmiczne związane z porowatością niskiej porowatości w trakcie wtęszczania CO<sub>2</sub>. Metoda ta pozwala na lokalizację punktu, a tym samym na śledzenie chmury wtęszczanego CO<sub>2</sub> oraz określenie i kierunku ewentualnych dróg przecieku.

Wykorzystując naturalne zjawiska dynamiczne wywołane tworzeniem się nowych szczelin podczas procesu wtęszczania CO<sub>2</sub> zarejestrowane przez przestrzenną sieć sejsmologiczną, można równie wykonywać obliczenia pola prędkości fal sejsmicznych metodą tzw. tomografii pasywnej (prześwietlenie masywu skalnego). Technika taka pozwala na śledzenie zmian pola prędkości i korelowanie ich ze zmianami zachodzącymi w rejonie wtęszczania CO<sub>2</sub> oraz w nadkładzie.

Sieć sejsmologiczna może być równie wykorzystana do monitorowania sejsmiczności związanej z procesem wtęszczania CO<sub>2</sub>. W strefach naturalnej aktywności sejsmicznej słońca Ziemi natomiast w strefach prowadzenia działalności górniczej słońca wstrząsy górotworu indukowane procesem eksploatacji oraz warunkami lokalnej tektoniki. Korzyści zastosowania tej metody byłyby równie ograniczenie ilości drogich pomiarów sejsmicznych 2D, 3D i 4D.

## **Monitoring mikrobiologiczny i stężenia CO<sub>2</sub> w powietrzu podglebowym (IGSMiE PAN)**

Prace dotyczą opracowania programu monitoringu w zakresie badań zawartości dwutlenku węgla w powietrzu podglebowym, pomiarów strumienia tego gazu oraz biomonitoringu w obszarze I (rejon Bełchatowa) w rejonie otworu zatłaczającego (symulacyjnego) nr 1 ó przewiduje się analogiczne prace będące prowadzone w rejonach pozostałych otworów zatłaczających. Przeanalizowano dostępne opracowania i dotychczas wykonywane prace w tym zakresie oraz przedstawiono zakres, cel, metodykę i harmonogram planowanych prac monitoringowych.

Program monitoringu zawartości dwutlenku węgla w powietrzu podglebowym oraz biomonitoringu opracowano w oparciu o dane wiadomości i wyniki badań wykonanych przez Zakład Geotechnologii IGSMiE PAN w ramach prac statutowych i projektów badawczych (Tarkowski i in., 2008a,b; [www.co2sink.org](http://www.co2sink.org)), jak również na podstawie dostępnej literatury.

### **Program monitoringu**

Jednym z elementów monitoringu geologicznego śledzenia dwutlenku węgla są badania powierzchniowe. W ich zakres wchodzi pomiary: zawartości dwutlenku węgla w powietrzu podglebowym (wzdłuż wyznaczonych profili, badania powierzchniowe, zmiany sezonowe oraz głębokościowe) oraz strumienia tego gazu.

Celem prac monitoringowych jest badanie zmian zawartości CO<sub>2</sub> w powietrzu podglebowym oraz strumienia na terenie składowiska w celu stwierdzenia wycieków. Wzrost stężenia dwutlenku węgla w powietrzu podglebowym oraz wielkości strumienia tego gazu będzie wskazywać na wyciek ze składowiska. Szczegółowe cele badań monitoringu geochemicznego to:

- ustalenie tła dwutlenku węgla przy wykorzystaniu siatki punktów pomiarowych,
- oszacowanie naturalnej zmienności stężenia dwutlenku węgla w powietrzu glebowym w czasie w tym zmiany sezonowe,
- zidentyfikowanie miejsc o podwyższonym strumieniu dwutlenku węgla, które mogą wskazywać na miejsca ucieczki gazu,
- długoterminowy monitoring mający na celu oszacowanie możliwych ucieczek zatłoczonego dwutlenku węgla.

W ramach monitoringu śledzenia dwutlenku węgla na składowisku w obszarze I (rejon Bełchatowa) proponuje się wykonanie następujących badań geochemicznych:

- szczegółowe zdjęcie geochemiczne zawartości dwutlenku węgla na terenie składowiska w obszarze I,
- powierzchniowe badania geochemiczne zawartości CO<sub>2</sub> w pobliżu otworu zatłaczającego,
- sezonowe powierzchniowe badania geochemiczne zawartości CO<sub>2</sub> na terenie składowiska w obszarze I,
- badania geochemiczne rozkładu stężenia CO<sub>2</sub> do głębokości 5 m w wybranych punktach,
- cięgieł pomiarów zawartości CO<sub>2</sub> w powietrzu podglebowym w zastabilizowanych punktach pomiarowych.

Na etapie monitorowania poziomu odniesienia badania te mają na celu ustalenie tła zawartości CO<sub>2</sub> w powietrzu podglebowym oraz jego zmian sezonowych i rozkładu głębokościowego dla składowiska z obszaru I. Posłuży one jako punkt odniesienia do porównania wyników pomiarów uzyskanych z badań prowadzonych w trakcie eksploatacji składowiska i po jego zamknięciu.

W trakcie eksploatacji i po zamknięciu składowiska badania te mają na celu stwierdzenie wycieków gazu. Jako miejsce zatłaczania dwutlenku węgla emitowanego przez elektrownię Bełchatów jest proponowana struktura Budziszewic-Zaosia. Jest to rozległa struktura o dwóch kolektorach w obrębie jury dolnej (pliensbach, synemur i hetang) rozdzielonych uszczelnieniem i przykrytych uszczelniającymi utworami toarku. Między utworów zbiornikowych jest zmienna - największe między nimi obserwujemy na skrzydłach antykliny (67 m - Buków I 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, na skrzydłach również górnego odcinka formacji drzewickiej. Między formacją ciechocińską waha się od 53 m (Budziszewice IG 1) - 77 m (Buków 1) do 120 m (Zaosie 1). Na skrzydłach antykliny bezpośrednio nad formacją drzewicką występuje około 10-15 m kompleks skał ilasto-mułowcowych najwyższego odcinka formacji drzewickiej.

Piętro czwartorzędowe występuje na całym omawianym obszarze, przykrywane przez osadami o zmiennej miąższości, od kilku do kilkudziesięciu metrów, starsze piętra wodonośne mezozoiku zapadające pod niewielkim kątem w kierunku NW. Warstwy wodonośne budują piaski i wiry, zalegające w różnym położeniu w stosunku do glin zwęzłych (na glinach, między glinami, pod glinami) zlodowacenia rodkowopolskiego. Charakter zwierciadła wody jest zmienny: jest ono swobodne, niekiedy lokalnie napięte, przy czym ciśnienie wód przyjmuje wartość do 0,05 MPa. Wydajność studni przeważnie waha się od 30 do 50 m<sup>3</sup>/h. (Wójcicki (red.), 2009).

### **Metodyka pomiarów zawartości CO<sub>2</sub> w powietrzu podglebowym**

W planowaniu lokalizacji punktów pomiarowych powinno się brać pod uwagę budowę geologiczną (litologię, tektonikę i warunki hydrogeologiczne), morfologię, hydrografię i zabudowę terenu. Wybór siatki i lokalizacji punktów pomiarowych zależy od rodzaju wykonywanych badań. Zaproponowaną lokalizację punktów pomiarowych wokół otworu zatęszczajcego (symulacyjnego) nr 1 ustalono wstępnie na mapach topograficznych (skala 1:10 000). Należy ją zweryfikować na podstawie rekonesansu w terenie. W terenie, położenie wszystkich punktów pomiarowych powinno się ustalić za pomocą urządzeń nawigacji satelitarnej GPS. Ciąg punktów pomiarowych ze względu na występowanie trwałej nawierzchni, przeszkód terenowych, instalacji podziemnych może być przesunięte o niewielką odległość. Planowane punkty pomiarowe powierzchniowego zdjęcia geochemicznego zawartości CO<sub>2</sub> będą rozmieszczone w siatce podstawowej 200 x 200 m. Obszar skądowiska, na którym wykonywane będą pomiary koncentracji CO<sub>2</sub> w powietrzu glebowym jest zlokalizowany w okolicach Ujazdu, Niewiadowa i Józefowa i ma powierzchnię około 15 km<sup>2</sup>. Na obszarze tym przewidziano 358 podstawowych punktów pomiarowych (Rys. 1.1.18.6).

Lokalizacja punktów do badań zmian sezonowych zawartości dwutlenku węgla została zaplanowana w formie siatki o rozmiarach 500 x 500 m na obszarze skądowiska przewidziano 59 punktów pomiarowych do badań sezonowych (Rys. 1.1.18.7). Rozkład zawartości CO<sub>2</sub> w powietrzu glebowym proponuje się badać dokładniej w pobliżu otworu zatęszczajcego. Punkty będą lokalizowane w odległości 25 m; przewiduje się, że punktów tych będzie 80 (Rys. 1.1.18.8). Punkty, w których będzie prowadzony ciągły pomiar zawartości dwutlenku węgla w powietrzu glebowym zostaną zlokalizowane w pobliżu otworu zatęszczajcego i obserwacyjnych. Dokładna lokalizacja tych punktów będzie możliwa po sporządzeniu planu zagospodarowania otoczenia poszczególnych otworów.

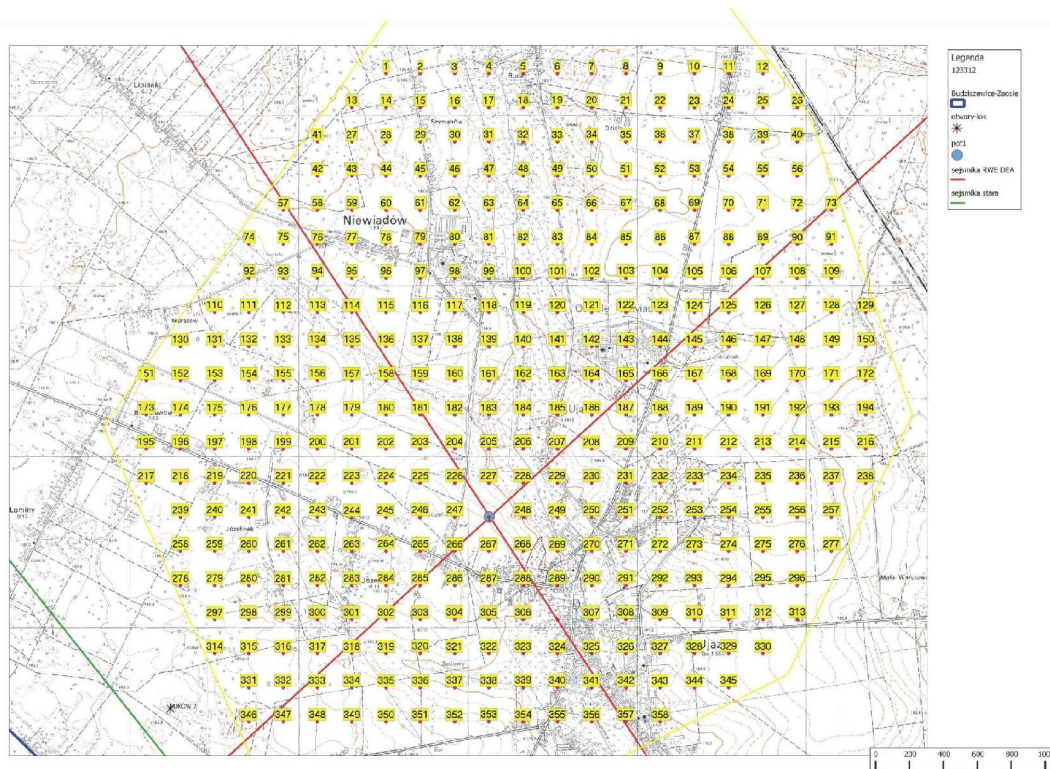
Powierzchniowe pomiary geochemiczne (zdjęcia zawartości CO<sub>2</sub> oraz zmiany sezonowe) będą prowadzone na głębokości do 1 m w punktach pomiarowych przewidzianych dla poszczególnych typów badań. Zawartość CO<sub>2</sub> w powietrzu glebowym będzie mierzona w próbkach zasysanych z określonej głębokości przez pompkę wbudowaną do miernika gazu. Do pobrania próbki gazu zastosowana zostanie sonda wbijana o średnicy około 2,5 cm (Rys. 1.1.18.9).

Głębokościowy rozkład stężenia dwutlenku węgla będzie wykonany w 10 punktach w otworach odwierconych do głębokości 5 m. Pomiar stężenia będzie wykonywany na głębokości 1, 2, 3, 4 m. Oznaczenie stężenia będzie wykonywane detektorem X-am 7000 firmy Dräger. Miernik ten jest wyposażony w sensor CO<sub>2</sub> działający na zasadzie absorpcji promieniowania podczerwonego technik NDIR (*Non-dispersive Infrared*) o zakresie pomiarowym 0-100% obj. gazu.

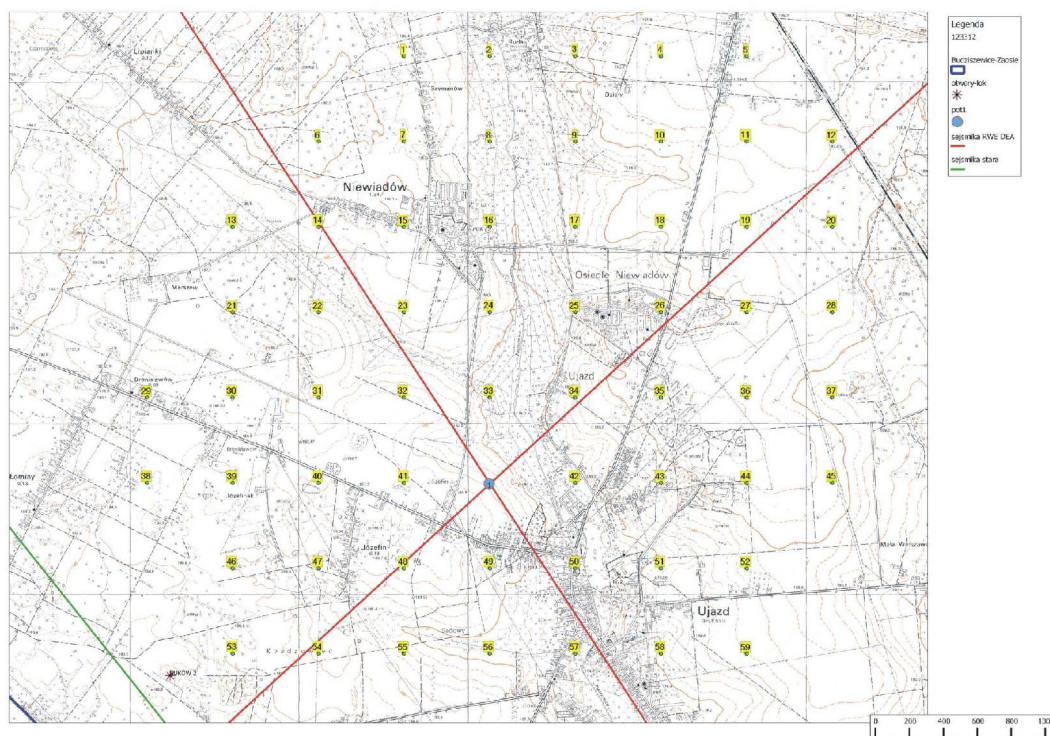
Instalacja ciągłego pomiaru zawartości i rejestracji dwutlenku węgla w powietrzu glebowym



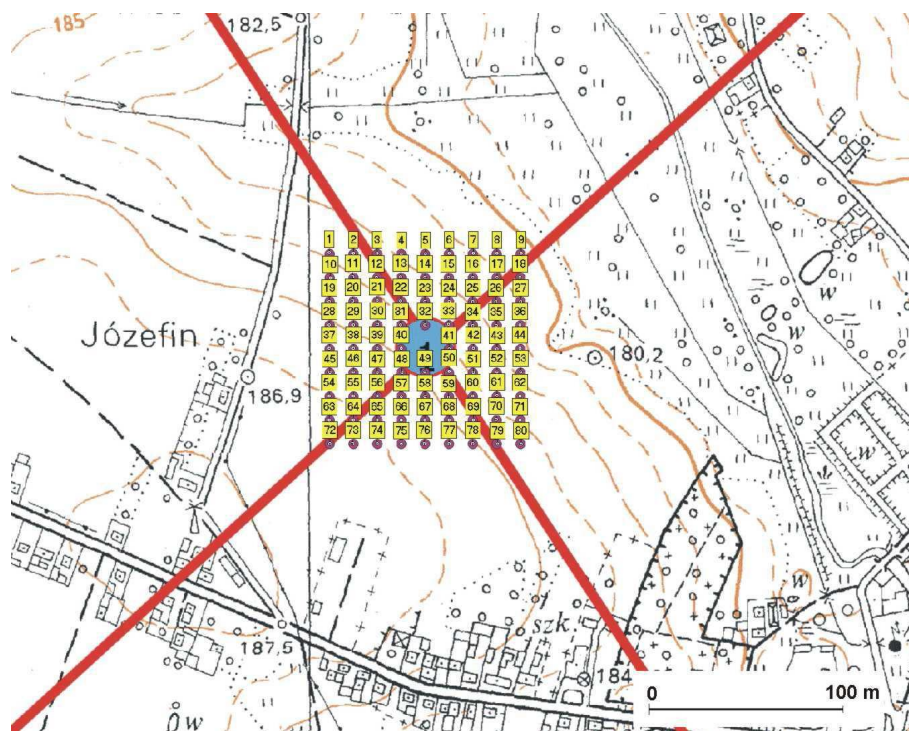
b dzie składa si z przetworników (liczba zostanie ustalona na etapie projektowania prac), ród zasilania, skanera pomiarowego oraz komputera. Przetworniki umieszczone b d w rurach PCV o rednicy 100 mm; na gĘboko ci 110 cm, w dolnej cz ci b d one perforowane: zasilane napi cciem 24 V DC, z zasilacza napi cia staÉgo.



Rys. 1.1.18.6 Lokalizacja punktów pomiarowych zawarto ci dwutlenku w gla w powietrzu podglebowym na skłdowisku na obszarze I.

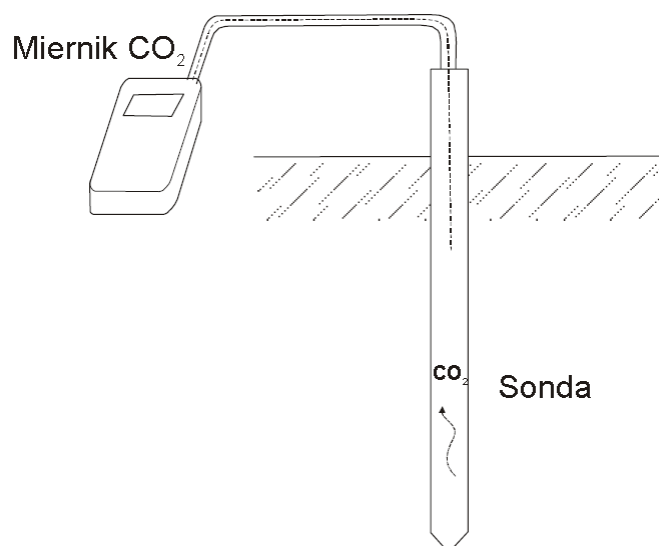


Rys. 1.1.18.7 Lokalizacja punktów pomiarów sezonowych zawarto ci dwutlenku w gla w powietrzu podglebowym na skłdowisku na obszarze I



Rys. 1.1.18.8 Lokalizacja punktów pomiarowych zawartości dwutlenku w glebie w powietrzu podziemnym wokół otworu zafundowanego

Skaner pomiarowy, zlokalizowany w oddzielnej skrzynce pomiarowej, połączony jest kablami sygnałowymi z przetwornikami  $\text{CO}_2$  umieszczonymi na głębokości 70 cm. Skaner umożliwia obserwację bieżących pomiarów w postaci cyfrowej na wyświetlaczu oraz archiwizację danych pomiarowych na karcie pamięci SD. Dodatkowo rejestrowane pomiary będą transmitowane do komputera za pomocą modemu GPRS.



Rys. 1.1.18.9 Schemat pomiarów zawartości dwutlenku w glebie w powietrzu podziemnym.



### Harmonogram pomiarów stężenia CO<sub>2</sub> w powietrzu podglebowym

Badania zawartości dwutlenku węgla w powietrzu podglebowym będą prowadzone w trakcie głównych etapów projektu: monitorowanie poziomu odniesienia, w czasie eksploatacji i po zamknięciu składowiska.

W ramach monitorowania poziomu odniesienia (monitoring zerowy) dla składowiska z obszaru I proponuje się wykonanie następujących badań (Tab. 1.1.18.1):

- szczególne zdjecie geochemiczne zawartości dwutlenku węgla na terenie składowiska - 4 razy w roku,
- powierzchniowe badania geochemiczne zawartości dwutlenku węgla w pobliżu otworu zatłaczającego - 4 razy w roku,
- sezonowe powierzchniowe badania geochemiczne zawartości dwutlenku węgla na terenie składowiska - 8 razy w roku (2 razy w sezonie wiosennym, letnim, jesiennym i zimowym),
- badania geochemiczne rozkładu stężenia CO<sub>2</sub> do głębokości 5 m w wybranych punktach - 2 razy w roku (sezon ciepły i chłodny),
- cięgi pomiarowe zawartości CO<sub>2</sub> w powietrzu glebowym w zastabilizowanych punktach pomiarowych.

W trakcie eksploatacji składowiska CO<sub>2</sub> obszaru I proponuje się wykonanie następujących badań geochemicznych zawartości dwutlenku węgla:

- szczególne zdjecie geochemiczne zawartości dwutlenku węgla na terenie składowiska - 2 razy w roku (sezon ciepły i chłodny),
- powierzchniowe badania geochemiczne zawartości dwutlenku węgla w pobliżu otworu zatłaczającego - 4 razy w roku,
- cięgi pomiarowe zawartości CO<sub>2</sub> w powietrzu podglebowym w zastabilizowanych punktach pomiarowych.

Po zamknięciu składowiska z obszaru I proponowane są następujące badania geochemiczne zawartości dwutlenku węgla:

- powierzchniowe badania geochemiczne zawartości dwutlenku węgla w pobliżu otworu zatłaczającego - 2 razy w roku (sezon ciepły i chłodny),
- cięgi pomiarowe zawartości CO<sub>2</sub> w powietrzu podglebowym w zastabilizowanych punktach pomiarowych.

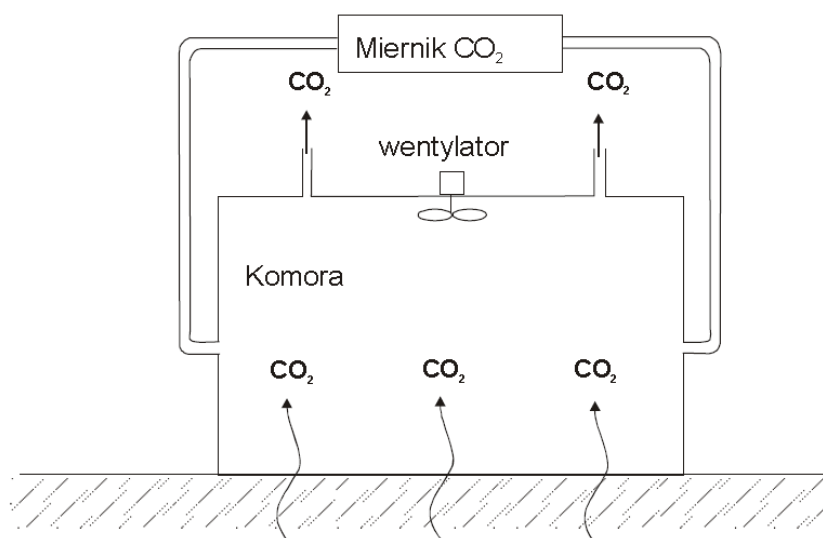


Rys. 1.1.18.10 System pomiaru strumienia CO<sub>2</sub> urządzeniem LI-8100 (<http://www.licor.com/env/>).

## Metodyka pomiarów strumienia CO<sub>2</sub>

Pomiary naturalnego strumienia dwutlenku w gła prowadzi się przy wykorzystaniu zamkniętej komory. Strumień dwutlenku w gła mierzy się przy wykorzystaniu systemu pomiarowego z jednej z jednostki pomiarowej i jednej lub kilku komór pomiarowych oraz komputera (palmtopa) rejestrującego wyniki. System ten oprócz pomiarów strumienia dwutlenku w gła powinien mierzyć temperaturę gleby. Gotowe systemy pomiarowe tego rodzaju są produkowane przez firmę LI-COR Inc. System LI-8100 stosowany jest do pomiarów strumienia dwutlenku w gła jednorazowych i długoterminowych (Rys. 1.1.18.10). Zawiera one jednostkę kontrolną (*LI-8100 Analyzer Control Unit (ACU)*) i jedną lub dwie komory pomiarowe (*Survey Chambers*). Dostępne są komory o dwóch średnicach 10 cm i 20 cm. Wyniki pomiarów zapisywane są na komputerze.

System pomiarowy strumienia naturalnego dwutlenku w gła może być również wykonany w oparciu o miernik wielogazowy z czujnikami na podczerwiec (Rys. 1.1.18.11).

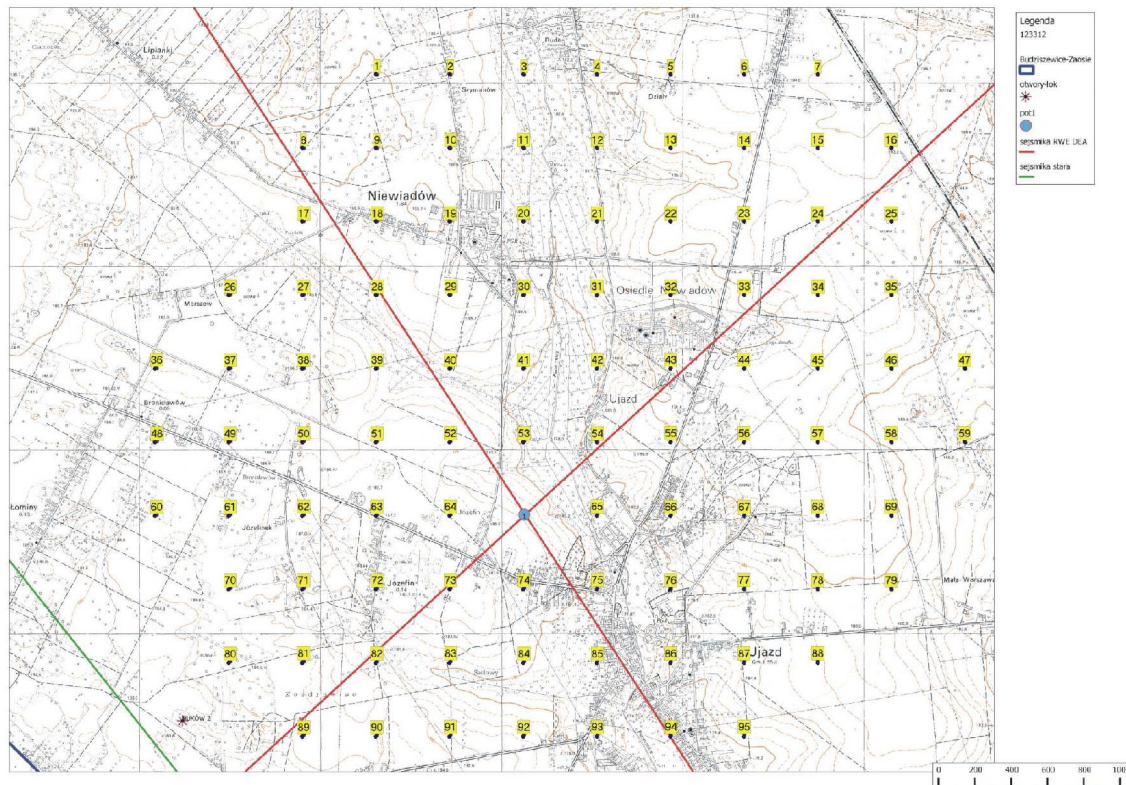


Rys. 1.1.18.11 Schemat komory do pomiaru strumienia dwutlenku w gła (Jak i in., 2002).

W planowaniu lokalizacji punktów pomiarowych strumienia dwutlenku w gła powinno się brać pod uwagę budowę geologiczną (litologię, tektonikę i warunki hydrogeologiczne), morfologię, hydrografię i zabudowę terenu. Badania strumienia dwutlenku w gła powinny być wykonane na obszarze oddziaływania zatępczanego gazu, na tym samym terenie gdzie będą wykonywane pomiary strumienia dwutlenku w gła.

Planowane punkty pomiarowe strumienia CO<sub>2</sub> będą rozmieszczone w siatce podstawowej o rozmiarach około 400 x 400 m (Rys. 1.1.18.12). Przy otworze zatępczającym badania powinny być wykonywane w dodatkowych punktach pomiarowych. Na obszarze tym przewidziano 80 punktów pomiarowych w siatce (25 x 25 m) wokół otworów. Ich lokalizację, po weryfikacji na podstawie prac terenowych, należy przedstawić na mapie topograficznej w skali 1:10 000 (por. Rys. 1.1.18.8).

W każdym punkcie pomiaru strumienia CO<sub>2</sub> powinny być wykonywane przez około 10 minut przy wykorzystaniu systemu automatycznego pomiaru LI-8100. Wokół otworów można również prowadzić ciągły pomiar strumienia dwutlenku w gła przy wykorzystaniu systemu firmy LI-COR Inc. Lokalizację punktów pomiarowych powinno się ustalić w terenie za pomocą urządzeń nawigacji satelitarnej GPS. Cztery punkty pomiarowych ze względu na występowanie trwałej nawierzchni, przeszkód terenowych może być przesunięte o niewielką odległość w stosunku do planowanej.



Rys. 1.1.18.13 Lokalizacja punktów pomiarowych strumienia powierzchniowego dwutlenku w glebie i poboru próbek do badań biomonitoringu na składowisku.

### Harmonogram pomiarów strumienia CO<sub>2</sub>

Pomiar strumienia dwutlenku w glebie należy przeprowadzić w trakcie wszystkich głównych etapów projektu: monitorowanie poziomu odniesienia (monitoring zerowy), w czasie eksploatacji i po zamknięciu. W ramach monitorowania poziomu odniesienia dla składowiska z obszaru I proponuje się wykonanie następujących badań strumienia dwutlenku w glebie (Tab. 1.1.18.1):

- badania temp. strumienia dwutlenku w glebie w siatce podstawowej na terenie składowiska - 4 razy w roku,
- badania temp. strumienia dwutlenku w glebie w pobliżu otworu zatłaczającego - 4 razy w roku,
- cięgi pomiaru strumienia dwutlenku w glebie w pobliżu otworów.

W trakcie eksploatacji składowiska obszaru I proponuje się wykonanie następujących badań strumienia dwutlenku w glebie:

- badania strumienia dwutlenku w glebie w siatce podstawowej na terenie składowiska o 2 razy w roku (sezon ciepły i zimny),
- badania strumienia dwutlenku w glebie w pobliżu otworu zatłaczającego - 4 razy w roku,
- cięgi pomiaru strumienia dwutlenku w glebie w pobliżu otworów.

Po zamknięciu składowiska z obszaru I proponowane są następujące badania strumienia dwutlenku w glebie:

- badania temp. strumienia dwutlenku w glebie w pobliżu otworu zatłaczającego - 4 razy w roku,
- cięgi pomiaru strumienia dwutlenku w glebie w pobliżu otworów.

### Program biomonitoringu dla składowiska w obszarze I (rejon Bełchatowa)

Biomonitoring oparty będzie na badaniu zmian ilościowych wskaźnikowych mikroorganizmów i procesów życiowych będących wynikiem zmiany podłoża dwutlenku w glebie w środowisku glebowym wywołanej wyciekami tego gazu z podziemnego składowiska.



Próby gruntowe pobierane z terenu składowiska CO<sub>2</sub> stanowi materiał do badań mikrobiologicznych wykonywanych w ramach prac monitoringowych. Przy poborze próbek należy uwzględnić odpowiednią lokalizację punktów i głębokość poboru oraz zachowania jakości poboru próbek. Wpływa to na wyniki badań mikrobiologicznych i jest jednym z istotnych elementów warunkujących ich powodzenie.

Lokalizacja punktów poboru próbek do badań mikrobiologicznych z terenu składowiska dwutlenku węgla powinna być sporządzona w oparciu o istniejące materiały geologiczne i mapy terenu. Należy określić miejsca poboru (siatkę poboru próbek), ich niezbędną ilość oraz głębokość poboru próbek. Liczba próbek pobieranych do badań jest uzależniona od warunków terenowych (zabudowy, ukształtowania terenu, dostępnoci poszczególnych punktów poboru próbek), lokalizacji otworu zatłaczającego, geologii struktury, w tym prawdopodobnego przebiegu uskoku.

W celu uzyskania pełnej informacji o mikroflorze występującej na danym terenie, w środowisku gruntowym, próbki powinny się pobierać ze stałą głębokością (60-80 cm). Zróżnicowanie mikroflory w zależności od głębokości bytowania jest znaczne, gdy podaż gazów atmosferycznych jest od tej wielkości silnie zależna. Skutkuje to dużymi wahaniami w składzie jakościowym i ilościowym mikroorganizmów w zależności od głębokości występowania. Istotnym czynnikiem jest czas, jaki dzieli pobranie próbek od ich badania w laboratorium, który powinien być jak najkrótszy.

Tabela 1.1.18.1 Harmonogram pomiarów zawartości CO<sub>2</sub> w powietrzu podglebowym, strumienia i biomonitoringu na składowisku na obszarze I

Metoda badań		Poziom odniesienia	Eksploatacja składowiska	Po zamknięciu składowiska
Pomiar koncentracji CO <sub>2</sub>	szczegółowe zdjęcie	4 razy w roku	2 razy w roku	-
	badania wokół otworów	4 razy w roku	4 razy w roku	2 razy w roku
	sezonowe badania	8 razy w roku	-	-
	pomiary ciągłe	ciągłe	ciągłe	ciągłe
	rozkład stężeń z głębokością	2 razy w roku	-	-
Pomiar strumienia CO <sub>2</sub>	badania w siatce podstawowej	4 razy w roku	2 razy w roku	-
	badania wokół otworów	4 razy w roku	4 razy w roku	2 razy w roku
	ciągłe pomiary strumienia	ciągłe	ciągłe	ciągłe
Biomonitoring - badania tła mikrobiologicznego środowiska gruntowego		4 razy w roku	-	-
Biomonitoring - badania zmian ilościowych bakterii i procesów wskaźnikowych		4 razy w roku	4 razy w roku	4 razy w roku

### Metodyka i harmonogram badań biomonitoringu

Proponuje się przeprowadzenie następujących prac w ramach biomonitoringu składowania dwutlenku węgla przed, w trakcie i po zatłaczaniu gazu (Tab. 1.1.18.1):

- badania tła mikrobiologicznego środowiska gruntowego na obszarze składowiska (monitorowanie poziomu odniesienia),
- badania zmian ilościowych bakterii i procesów wskaźnikowych na obszarze składowiska (w trakcie i po zakończeniu eksploatacji składowiska).

Przed zatłaczaniem należy przeprowadzić badania tła mikrobiologicznego przyszłego składowiska. Profil mikroflory będzie wykonany na próbkach pobranych z gruntu z obszaru składowiska

czterokrotnie w ciągu roku w sezonie zimowym, wiosennym, letnim i jesiennym. Zaleca się aby badania te prowadzi przez 2 lata lub do momentu rozpoczęcia eksploatacji składowiska dwutlenku w gła.

Monitoring mikrobiologiczny w czasie eksploatacji składowiska dwutlenku w gła i po jej zakończeniu prowadzi się przede wszystkim poprzez badania zmian ilościowych bakterii i procesów wskaźnikowych na obszarze składowiska. Badania mikroorganizmów wskaźnikowych należy prowadzi czterokrotnie w ciągu roku przez cały czas trwania zatłaczania dwutlenku w gła.

Pobór próbek będzie wykonany na obszarze całego składowiska w siatce o rozmiarach około 400 x 400 m (por. **Rys. 1.1.18.13**). Próbki pobierane będą z głębokości 80 cm p.p.t. za pomocą wiadra rącznego z zachowaniem czystości mikrobiologicznej. Przewiduje się również pobór próbek w pobliżu otworu zatłaczającego i obserwacyjnych.

## **Propozycja programu monitoringu parametrów kolektorów i uszczelnienia na podstawie planowanych prac z zakresu sejsmiki 4D (INiG)**

Sejsmika 4D zrodziła się na gruncie potrzeb przemysłu naftowego. Poniżej informację opracowano na podstawie wykładu i materiałów kursu pt. „4D Reservoir Management” przedstawionych przez Johna R. Waggonera ó konsultanta do spraw zóowych firmy Schlumberger z Houston w Teksasie (Waggoner, 2009).

Sejsmika 4D w wielu potnych kampaniach naftowych stała się integralną częścią zagospodarowania i monitorowania eksploatacji zówa, szczególnie na Morzu Północnym, gdzie umoliwiła po wielokro przekroczyć oczekiwania i wyzwania ekonomiczne stawiane zarówno geofizykom, jak i inżynierom zóowym. Idea sejsmiki 4D jest niezwykle prostą wykonać dwa (lub więcej) razy pomiary sejsmiki 3D w tym samym miejscu; obserwować różnice zapisów i interpretować je w sensie zmienności poziomu nasyceń zóowych, nasyceń i poziomu wody pod ciśnieniem; również korzystać z porównania wyników w otworach.

Przygotowanie do prostego pozornie pomiaru wymaga:

- określenia charakterystyki zówa; zrozumienia problemów ujawnionych na podstawie symulacji zóowej (ciśnienia i nasyceń);
- znajomości relacji pomiędzy parametrami fizycznymi skały zbiornikowej, a pomiarami profilowania akustycznego (jak też elastycznego);
- określenia koniecznej rozdzielczości zapisu sejsmicznego;
- zapewnienia dalszej powtarzalności wykonywanych pomiarów dla zapewnienia jednoznacznej odpowiedniości zmiany zapisu - zmiany wóciwości zbiornikowych (Rys. 1.1.18.14).

### **Wybrane elementy technologii sejsmiki 4D w aspekcie potrzeb podziemnego magazynowania dwutlenku węgla CO<sub>2</sub>**

Charakteryzując technologię sejsmiki 4D wóciwo możemy napisać, że jest to po prostu sejsmika powierzchniowa 2D lub 3D. Jednak celem, który zawsze determinuje jej zastosowanie jest obserwacja zmienności określonych wóciwości o rodka geologicznego lub wybranych parametrów.

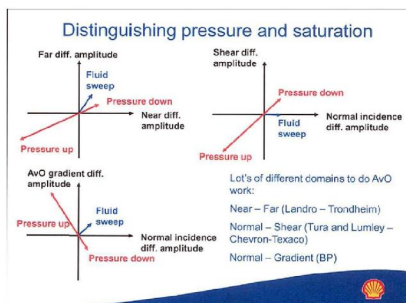
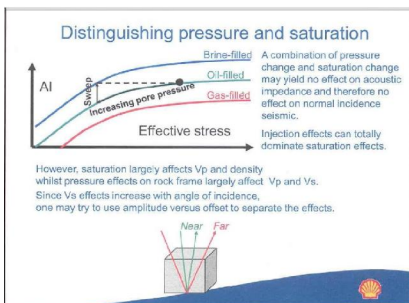
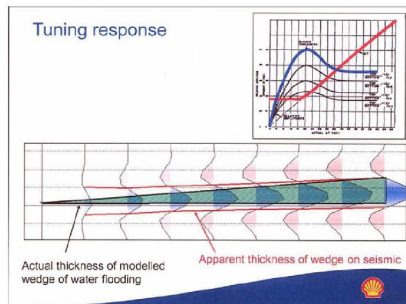
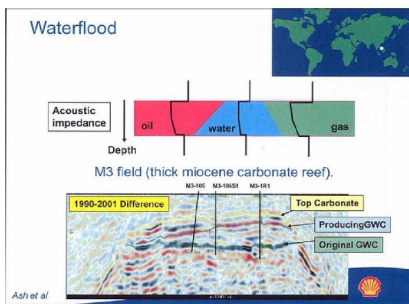
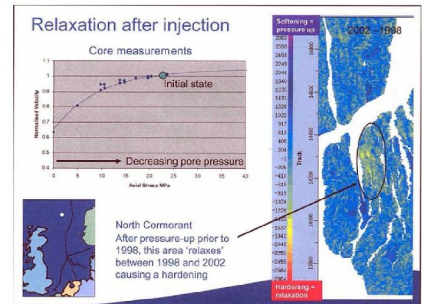
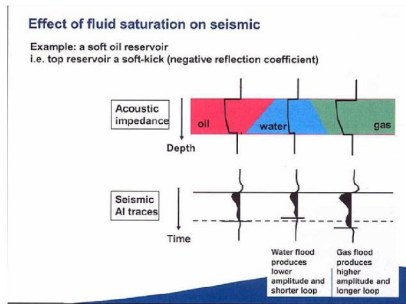
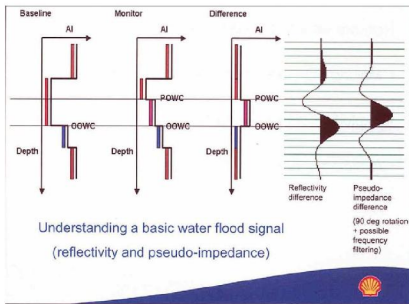
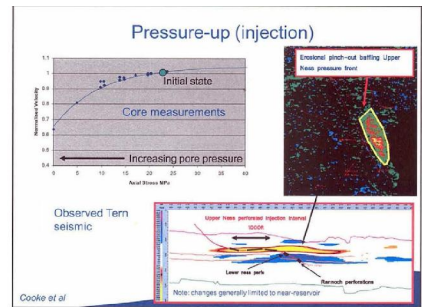
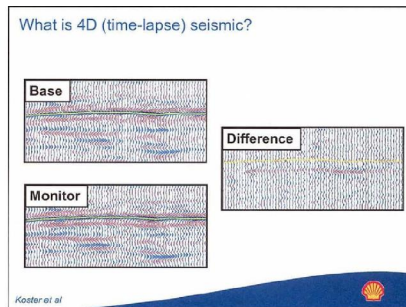
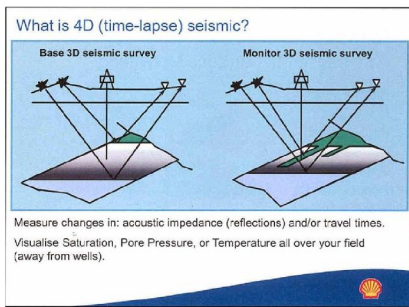
Skala obserwowanej zmienności zależy oczywiście od rodzaju zjawiska, które zachodzi w o rodka geologicznym. Rozpatrywanie sejsmiki 4D jako technologii monitoringu w podziemnych magazynach CO<sub>2</sub> musi być wóciwo nie ukierunkowana na możliwość ledzenia zmienności zachowania się CO<sub>2</sub> zatłoczonego do składowiska.

W podtekście każdego celu czy skutkowego tkwi element zmienności w czasie. I to jest podstawowe zadanie monitoringu sejsmicznego. A więc pomiary muszą być powtarzane, tak aby zauważyć różnice w zapisie pomiędzy kolejnymi pomiarami.

Efekt rejestracji w metodzie sejsmicznej jest trasa sejsmiczna wyrażona przez amplitudę drgań jako funkcji czasu [A(t)]. Posługując się wysokim poziomem uogólnienia we wnioskowaniu domyślamy się, że aby zobaczyć różnicę amplitudy i czasu w określonym interwale czasowym (góbkociowym) zmienności muszą podstawowe parametry o rodka geologicznego wpówać na tzw. twardość akustyczną (iloraz góstości i prędkości propagacji fali sprężystej).

Bardzo obrazowo te zagadnienia przedstawił Rob Staples (i współautorzy), który z ramienia European Association of Geoscientist and Engineers wygósł w Krakowie, w październiku 2009 roku, wykład zatytułowany „An Introduction to Time-Lapse (4D) Seismic Monitoring” (Staples, 2009).

Poniżej przytoczono wybrane obrazy ze wspomnianej prezentacji, które objęły główny nurt metodyczny sejsmiki 4D (Rys. 1.1.18.14) i podkreślają te elementy technologii, które mogłyby być zaimplementowane wprost do monitoringu podziemnych magazynów CO<sub>2</sub>.



Rys. 1.1.18.14 Idea sejsmiki 4D i jej zastosowania do monitoringu geologicznego składowania CO<sub>2</sub> (Staples, 2009); wi e si to ze ledzeniem zmian impedancji akustycznej o rodka porowego oraz pr dko ci podł nych i poprzecznych fal sejsmicznych (wielko ci te obrazuj m.in. nasycenie i ci nienie panuj ce w kolektorze).

### Charakterystyka obiektów geologicznych z uwagi na efektywno monitoringu z zastosowaniem technologii sejsmiki 4D

Przedstawiony powy ej przegl d zada wchodzacych w skł d sejsmiki 4D pokazuje, e jest to technologia co najmniej tak samo kosztowna jak standardowa sejsmiki 3D ( w warunkach polskich redni projekt sejsmiki 3D ó akwizycja-przetwarzanie-interpretacja ó kosztuje kilkana cie milionów złotych, a wi c to koszt porównywalny z wybudowaniem 20,40 domów jednorodzinnych).

Dlatego decyzja o uruchomieniu projektu sejsmiki 4D musi by poprzedzona dwoma

wa nymi etapami:

1. Ocen technicznego ryzyka projektu (Formularz D.E. Lumleya; Lumley et al., 1997),
2. Studium wykonalności.

Do chwili obecnej w Polsce nie przeprowadzono żadnego eksperymentu sejsmiki 4D, dlatego do wiadomości polskie są bardziej niemiarkowane (J. Drzejowska-Tyczkowska H., i inni, 2004) i nie wykracza poza eksperymentalne studium wykonalności dla złóż a BMB.

Odnośnie oceny ryzyka technicznego w skali międzynarodowej przyjmuje się wykorzystywanie tzw. Formularze Lumleya (4D Technical Risk Spreadsheet), które w zwięzły i szybki sposób podają informacje o obiekcie planowanym do objęcia monitoringiem.

Zawarta w formularzu analiza składa się z czterech podstawowych kroków:

1. wypełnianie karty informacyjnej obiektu (Completing the 4D Fact Sheet),
2. kwalifikacja parametrów zmiennych danych geologicznych i sejsmicznych,
3. wypełnienie karty ryzyka technicznego,
4. interpretacja karty ryzyka technicznego.

Ad 1. Karta informacyjna obiektu, uzupełniona o preferencje kwalifikacji idealnej, musi zawierać m.in. dane na temat:

#### zbiornika

- głębokość (preferowany płytki)
- ciśnienia w nakładzie (preferowane niskie)
- ciśnienia porowego (preferowane wysokie)
- temperatury (preferowana wysoka)
- miąższość (preferowana duża)

#### skala kolektorskiej

- moduł sprężystości (preferowany niski) skał nienasyconej
- gęstość skał nienasyconej (preferowany niski)
- porowatość

#### porównów nasycających

- ropość rozpuszczalność GOR (Gas/Oil Ratio) (preferowana wysoka)
- gęstość (preferowana niska)
- moduł sprężystości (preferowany niski)
- woda - zasolenie (preferowane wysokie)
- gęstość (preferowana wysoka)
- moduł sprężystości (preferowany wysoki)

- gaz - gęstość (preferowana niska)
- moduł sprężystości (preferowany niski)

#### zmienneści porównów w czasie (4D fluids)

- zmiana nasycenia (preferowana wysoka)
- różnica stopnia sprężenia (preferowana wysoka)

#### danych sejsmicznych

- częstotliwość dominująca (preferowana wysoka)
- redniej rozdzielczość (uwidocznienie warstwy cienkiej 1/4 długości fali)
- jako obrazu (w skali 1 do 5, najlepiej 5; stosunek sygnału do zakłócenia)
- powtarzalność (w skali 1 do 5, najlepiej 5)
- manifestacji kontaktu porównów w obrazie pola falowego (w skali 1 do 5, najlepiej 5)
- prognozowane zrównicowanie hodografu (jako krotność kroku próbkowania > 4)
- prognozowane zrównicowanie impedancji (w procentach > 4%)

Poniżej w tabeli 1.1.18.2 przytoczono dane do ewaluacji przydatności obiektów do efektywnej aplikacji sejsmiki 4D.



Tabela 1.1.18.2 Eksperymentalne dane przyjmowane do kwalifikacji obiektów planowanych objętych projektem sejsmiki 4D.

Parametr	Miara	Skala ocen					
		5	4	3	2	1	0
Moduł sprężystości	GPa	<3	3-5	5 - 10	10 - 20	20 - 30	>30
Kontrast sprężenia płynu	% zmiany	>250	150-250	100-150	50-100	25-50	0-25
Zmiana nasycenia płynu	% zmiany	>50	40-50	30-40	20-30	10-20	0-10
Porowatość	%	>35	25-35	15-25	10-15	5-10	0
Zmiana impedancji	%	>12	8-12	4-8	2-4	1-2	0
Zmiana hodografu (pozycji refleksu)	ilość próbek (krotność kroku próbkowania)	>10	6-10	4-6	2-4	1-2	0

**Propozycja przedwstępna projektu badań sejsmicznych 4D i 3C w rejonie EC Bełchatów, typowanym jako składowisko dwutlenku węgla CO<sub>2</sub>**

Alternatywą i/lub uzupełnieniem dla sejsmiki wysokorozdzielczej może być wykonanie monitoringu sejsmicznego 4D-3C (trójkomponentowego). Preferowane jest wykonanie najpierw sejsmiki wysokorozdzielczej oraz innych geofizycznych badań powierzchniowych, gdy dopiero taki model (w szczególności dla jury i triasu), otrzymany przez uaktualnienie istniejącego o wyniki nowych prac, interpretacji można uznać za model zerowy, pod warunkiem wykonania dla niego symulacji sejsmicznych (sekcji syntetycznych) i bardzo szczegółowej interpretacji geologicznej.

W przypadku zadania o tak wygórowanych wskaźnikach technicznych, jak bezpieczne i bezterminowe monitorowanie składowisk CO<sub>2</sub> pomiar bazowy i kolejne monitorujące należy wykonać w metodzie sejsmiki 3D z możliwie gęstą siatką profili (np. DLL = DXL = 50 m).

Efektownym musi być model głęboko-głęboki, a więc inwersja sejsmiczna będzie jedną z najważniejszych procedur badawczych. Bardzo wskazane byłoby wykonanie badań technologii 3C, szczególnie użyteczne, gdy płynem nasycającym jest gaz CO<sub>2</sub> (prawie dwukrotnie cięższy od powietrza). W tym elemencie w programie monitoringu powinny być pomiary weryfikujące PPS (VSP i Vertical Seismic Profile) w wersji Walk Away lub Azimuthal.

Krótką charakterystyką dostępnych informacji metodycznie niezbędnych do wykonania projektu sejsmiki 3D została przedstawiona w rozdziałach 1.1.15 i 1.1.16. Odnosząc te informacje do obowiązujących norm można dla nich przedstawić następujące zestawienie poniżej (Tabela 1.1.18.3).

Tabela 1.1.18.3 Informacje potrzebne do wykonania projektu sejsmicznego (4D-3C).

TYPOWY ZAKRES INFORMACJI W PROJEKTOWANIU SEJSMIKI 2D i 3D				
Zadanie w projekcie	Dostępność informacji			Uwagi
	TAK	NIE	CZĘŚCIOWA	
1. Położenie geograficzne, charakterystyka topograficzna i gospodarcza, rejon badań	X			
2. Decyzje koncesyjne				?
3. Charakterystyka geologiczna rejonu badań: * stratygrafia i litologia * tektonika * wybrane wyniki inżynierii złoża	X			
4. Charakterystyka hydrogeologiczna obszaru i zagadnień ochrony przyrody	X			

Istotne znaczenie posiadają parametry metodyczne akwizycji; dla sejsmiki 2D i 3D są nieco różne:

Sejsmika 2D - krotko nominalna profilowania np. 60

- ilość kanałów aktywnych np. 240
- rozstaw np. regularny
- odległość pomiędzy punktami odbioru np.  $D_{PO} = 12.5 \text{ m}$
- odległość pomiędzy punktami wzbudzenia np.  $D_{PO} = 25 \text{ m}$
- grupowanie geofonów np. powierzchniowe 6 geofonów/kanał
- baza grupowania np. punktowe
- krok próbkowania (1,2,4 ms) np. 2 ms
- wzbudzanie (dyn/wibr) np. wibratorowe
- ilość sweepów/PW zależnie od poziomu zakłóceń w strefie badań
- czas emisji np. 10 sek

Sejsmika 3D - powierzchnia operacyjna np. 100 km<sup>2</sup>

- powierzchnia celu geologicznego np. 75 m<sup>2</sup>
- krotko profilowania np. 24
- schemat obserwacji np. typowy prostokątny
- rozstaw czynny np. regularny, symetryczny
- ilość kanałów aktywnych np. 576
- wymiary binu np. 25x25
- odległość pomiędzy PW np. 50
- odległość pomiędzy PO np. 50
- odległość pomiędzy liniami PW np. 200
- odległość pomiędzy liniami PO np. 100
- rozstaw (offset) min np. 50 m
- rozstaw (offset) max np. 160
- sposób wzbudzania np. wibrator
- parametry sweepu
- współczynnik efektywności zdziwienia

- powierzchnia celu geolog. / powierzchnia op np. 0.75.

W typowych projektach sejsmicznych zazwyczaj wykonuje się prace eksperymentalne dla potwierdzenia sensu ci zaproponowanej metodyki, oraz często dodatkowe badania np. strefy męch pr dko ci.

W tym elementem projektu są „Podstawowe założenia do przetwarzania” oraz „Zalecenia dotyczące interpretacji i dokumentowania wyników badań”, w których detalizuje się najważniejsze procedury, skalę map i przekrojów, poziom odniesienia itp.

### **Realne perspektywy i terminy dla sejsmiki 4D**

Jak widać z wcześniejszych zestawień, projekt prac sejsmicznych 3D można opracować kierując się poznaniem geologicznym obszaru badań nawet o charakterze trendowym, bowiem najczęściej cytowanym celem pomiarów sejsmiki 3D jest właśnie nie uszczegółowienie informacji o budowie ośrodka geologicznego.

Nie są to jednak te informacje dostateczne, aby przedstawić projekt badań sejsmicznych dla sejsmiki 4D, czy też dla wiarygodnych symulacji złowych. W tych ostatnich zadaniach bardzo ważnym elementem posiadania może być dokładny model geologiczny, który stanowi podstawę do studium wykonalności.

Gdzie i kiedy możemy powiedzieć, że realizacja projektu sejsmiki 4D przyniesie pozytywne efekty? Tam i wtedy, gdy pomierzone w zadeklarowanych odstępach czasowych pole sprężyste wykazuje znaczące, dostateczne dla scharakteryzowania wywołanych przyczyn.

Szacunki i prognozy jako ciowe nie są wystarczające, aby wiarygodnie opisać proces zachodzący w ośrodku.

Oceny ilościowe różnic, przewidywanych efektów, można uzyskać porównując wyniki obliczeń teoretycznego pola falowego dla modeli o zmieniających się, zgodnie z analizowanym procesem, parametrach ośrodka. I to jest właśnie podstawowy element studium wykonalności.

Ocenić ilościowo oczekiwane zmiany i odpowiedzi na pytania, jak metodyk, jak aparaty i przy aplikacji jakich parametrów óczywiście dla określonego obiektu i procesu ó jeste my w stanie te zmiany zarejestrować, zaobserwować i zinterpretować.

Dla realizacji tego celu niezbędne jest wyspecjalizowane, matematyczne oprogramowanie modelowania sejsmicznego. Przy okazji nadmienić trzeba, że Instytut Nafty i Gazu oprogramowanie takie posiada, nawet dla bardzo skomplikowanych ośrodków geologicznych.

W świetle przedstawionych wyżej danych literaturowych i do wiadomości własnych wykonawcy, opracowanie projektu sejsmiki 4D można rozpocząć w chwili uzyskania następujących danych:

- sekcje sejsmiczne (2D lub lepiej 3D) zarejestrowane z przeznaczeniem celu jakim jest sekwencja w konkretnych warunkach geologicznych;
- wyniki przetwarzania tych danych z uwzględnieniem standardów wysokiej rozdzielczości;
- przestrzenny model pr dko ci dla obszaru objętego monitorowaniem w domenie czasu i głębokości;
- przestrzenny model geologiczny (strukturalny i litofacyjny) dla obszaru objętego monitorowaniem;
- krzywe profilowania akustycznego oraz głębokościowe wykonane sondami o powtarzalnej kalibracji;
- wyniki badań laboratoryjnych na próbach skalnych, a przede wszystkim: porowatość, przepuszczalność, nasycenie, ciśnienie, głębokość, pr dko propagacji fal P i S.

Jak wspomniano już wcześniej, fundamentalną procedurą, która decyduje o poprawności przejścia z domeny czasu, w jakiej zarejestrowane są dane sejsmiczne, do domeny głębokości, w jakiej odtwarzany jest model geologiczny jest tzw. inwersja sejsmiczna (Jdrzejowska-Tyczkowska H., 2009), stanowi musi obowiązkowy etap opracowania modelu zerowego (na podstawie którego budujemy model przybliżony).

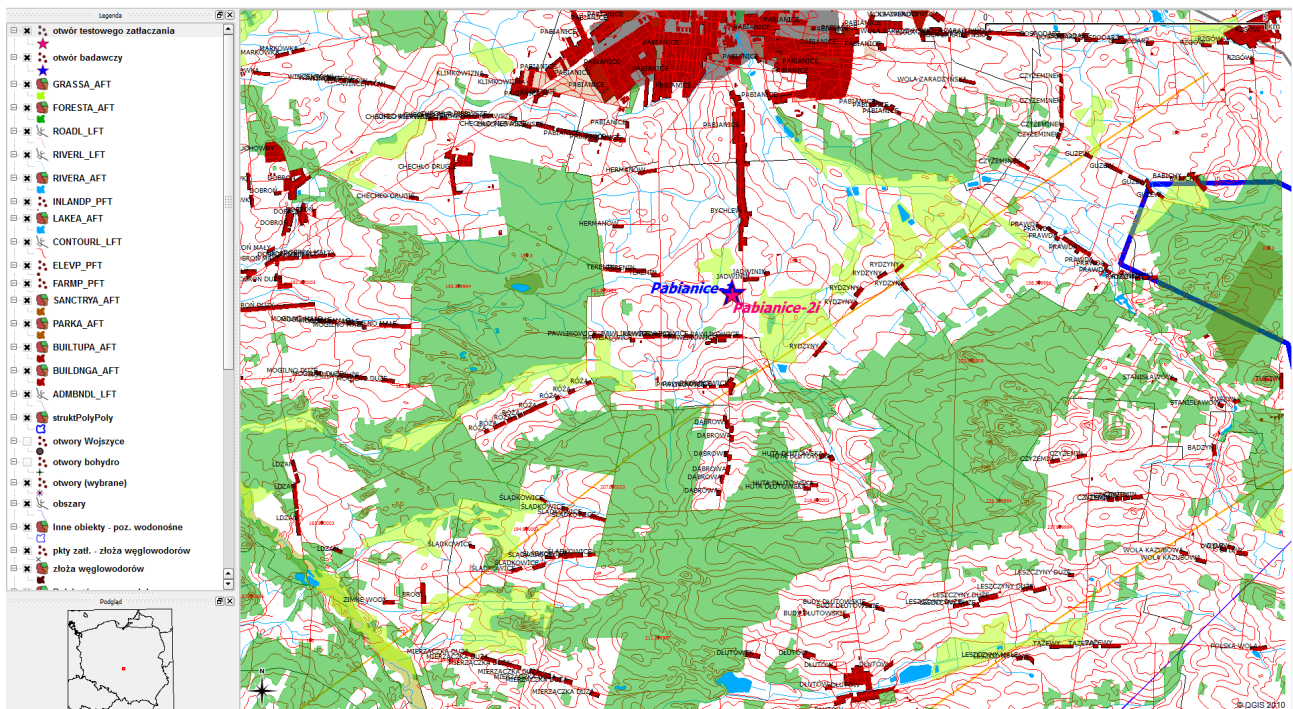
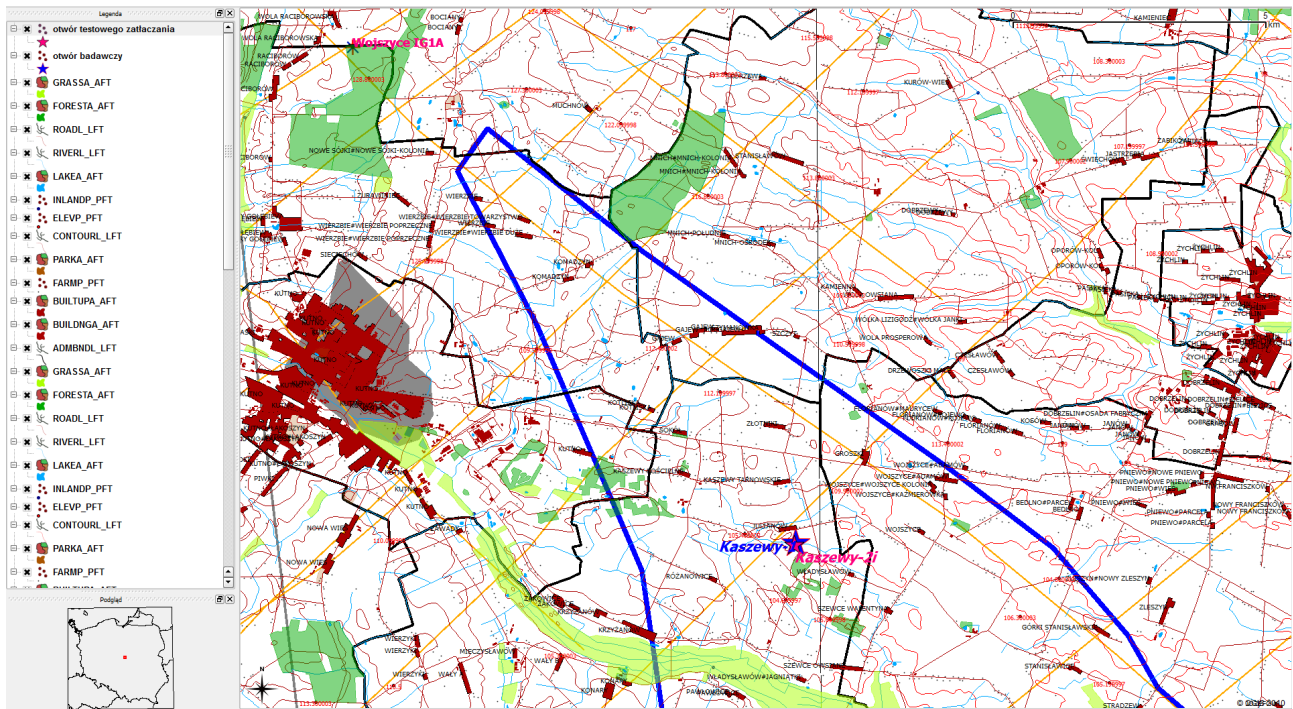
Drugą ważną procedurą umożliwiającą przejście z danych wymiaru 1D do wymiaru przestrzennego 3D jest modelowanie geostatystyczne (J. Drzejowska-Tyczkowska H., 2003; Shanor G., et al., 2002).

Reasumując, wykonanie monitoringu z wykorzystaniem sejsmiki 4D musi zawierać następujące etapy (Tabela 1.1.18.4):

Tabela 1.1.18.4 Przykładowy harmonogram prac sejsmicznych 2D/3D/4D.

ETAP	WYNIK	Prawdopodobny termin realizacji
I. Polowe prace sejsmiczne w konwencji 2D lub 3D  a. przetwarzanie danych sejsmicznych b. interpretacja danych sejsmicznych c. ocena dopasowania do danych otworowych (tzw. History Matching)	Model geologiczny zerowy („trendowy”)	marzec 2010  styczeń 2011
II. Polowe prace sejsmiczne w konwencji 2D/3D – 3C (wielokomponentowej)  a. przetwarzanie danych sejsmicznych b. interpretacja danych sejsmicznych c. ocena dopasowania do danych otworowych (tzw. History Matching)	Model geologiczny bazowy	wrzesień 2011
III. Studium wykonalności, określenie okresowości powtarzania prac sejsmicznych (dla monitoringu)	Warunki i parametry powtarzalności sejsmiki 4D	grudzień 2011
IV. Modelowanie sejsmiczne	Sekcje czasowe teoretyczne	styczeń 2012
V. Polowe prace sejsmiki 4D w konwencji 2D/3D – 3C	Model geologiczny "MONITOR"	marzec 2012
VI. Interpretacja wyników	Wnioski odnośnie skuteczności monitorowania	grudzień 2012

Przedstawiona jako element końcowy opracowanie wizja realizacji projektu „Sejsmika 4D”, zakładająca właściwe przygotowanie zespołu realizatorów, zarówno w sferze intelektualnej, jak i technicznej, jest wyrazem ogromnego optymizmu autora niniejszego rozdziału oraz przekonania, że próbne testy zatężania CO<sub>2</sub> zostaną wykonane możliwie jak najszybciej i będzie poligonem do wiadczenia dla przejścia do konkretnych działań w skali przemysłowej, potwierdzającą gotowość kadry naukowej i inżynierskiej do realizacji zadań sekwestracji.

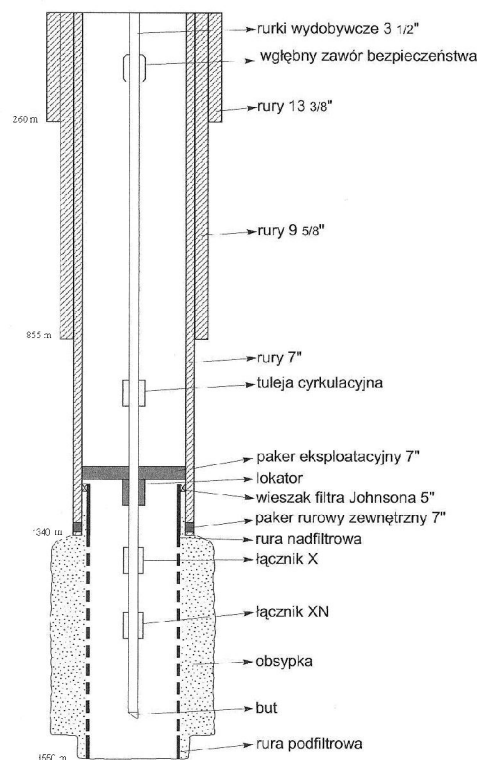


Rys. 1.1.18.15 Lokalizacja otworów badawczych i planowanych do testowego (pilotowe) zatlaczania dla struktur rezerwowych Wojszyce (rejon Kutna, gmina Krzyżanów) i Lutomiersk-Tuszyn (rejon Pabianic, gmina Pabianice-wiejska)



## Plany monitoringu testowego zatłaczania CO<sub>2</sub> na jednej ze struktur rezerwowych (AGH & PIG-PIB)

W ramach tego zadania opracowano dwa projekty prac geologicznych (Modliński i in., 2009a,b) na wiercenia pilotowych (testowych) otworów zatłaczających (Rys. 1.1.18.16) dla dwóch struktur rezerwowych (Rys. 1.1.18.15), w siedziwie otworów badawczych realizowanych już na zlecenie PGE Bełchatów (Nowak i in., 2009a,b). Jest to inicjatywa Ministerstwa Rodowiska mająca na celu stworzenie polskiego odpowiednika „laboratorium” polowego w Ketzin, w ramach której zostanie wybrana jedna z tych dwóch lokalizacji, dla której zostanie zatłaczane około 20 tysięcy ton dwutlenku węgla i wykonane kompleksowe badania odnośnie detekcji, monitoringu i zachowania się dwutlenku węgla w kolektorach dolnej jury (1.1.18.17), które występują we wszystkich rozpatrywanych strukturach rejonu Bełchatowa. Lokalizacja na Wojszycach posiada warunki geologiczne (w tym zakresie głębokości) najbardziej zbliżony do tej jak mamy na strukturze Budziszewice-Zaosię.

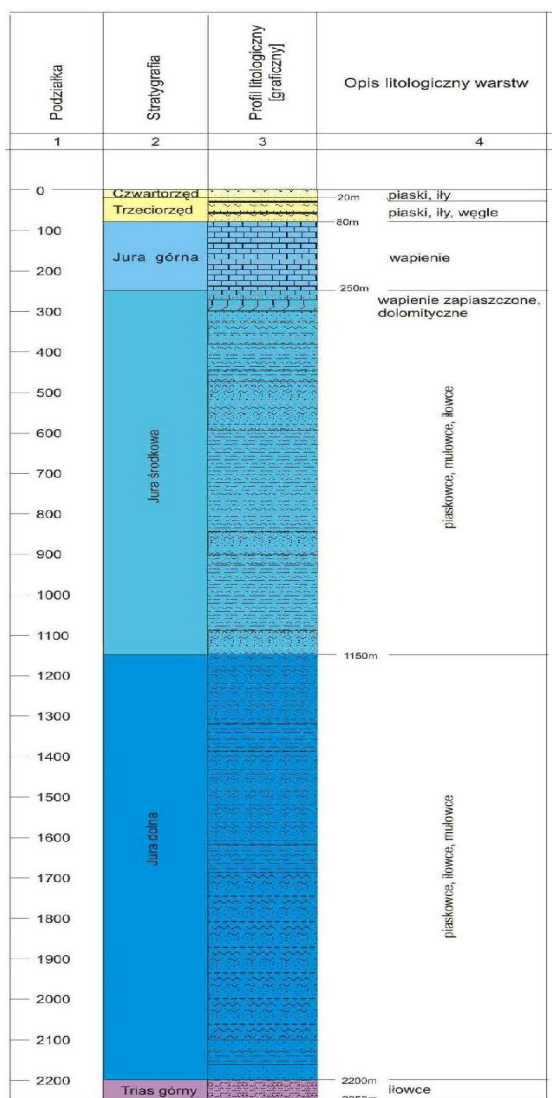


Rys. 1.1.18.16 Schemat otworu do zatłaczania CO<sub>2</sub>

### Zakres i cel prac

- Określenie ciśnienia maksymalnego - na początku zatłaczania. Zatłoczenie markerów (np. gazowych, SF<sub>6</sub>).
- Testowanie metod geofizycznych: VSP, tomograficznych (cross well tomography) i innych - pokazujących zmiany nasycenia wokół odwiertu zatłaczającego oraz zasięgu zatłaczanego CO<sub>2</sub>: tomografia otworowa, X-well tomography), sejsmika pasywna, VSPa.
- Przygotowania do technologii monitoringu wgębnego

- Okrelenie na podstawie danych z wiercenia włośności przepuszczalności pionowych, poziomych (absolutnych) oraz fazowych (w laboratorium). Okrelenie ciśnienia progowego ("threshold pressure") - na podstawie rdzeni z nadkładu.
- Okrelenie ciśnienia "threshold pressure" w trakcie testu *in situ*
- Okrelenie indeksu chłonności i określenie przewodności (kh)
- Potwierdzenie szczelności poprzez test pulsacyjno-interferencyjny w badanym otworze
- Sprawdzenie szczelności przez cementowanie otworów badawczych
- Okrelenie współczynnika składowania ( $c \times \phi \times h$ )
- Wykonanie kompletu badań geochemicznych
- Przygotowanie i wdrożenie pierwszego systemu monitoringu geofizycznego
- Przygotowanie i sprawdzenie innych procedur związanych z bezpieczeństwem składowania CO<sub>2</sub>
- Przygotowanie odpowiedniego raportu badawczego dla Ministerstwa Rodowiska i Wsi oraz Urzędu Górniczego
- Przygotowanie innych publikacji dot. pilotowego zatęszczania.



Rys. 1.1.18.16 Profil otworu Kaszewy 2i (Modliński i in., 2009a); wybrano do zatęszczania kolektor górnego piensbachu (formacja drzewicka) na głębokości 1620-1690 m a uszczelnienie stanowi utwory dolnego toarku (formacja ciechocińska) na głębokości 1390-1620 m.

## Monitoring procesu zatłaczania

### Wprowadzenie

Miejsce do składowania CO<sub>2</sub> musi się cechować odpowiednio dobrymi parametrami zbiornikowymi oraz posiada wystarczającą izolację hydrauliczną skałostropowych i spągowych oraz posiada wystarczającą izolację skał w strefach brzońnych przyszłego zbiornika, celem uniemożliwienia ucieczki CO<sub>2</sub>. Szczelność zależy od struktury geologicznej zbiornika jego własności petrofizycznych oraz od rodzaju porożu zatłaczanego (czy CO<sub>2</sub> jest w postaci gazowej czy w postaci krytycznej) oraz rozkładu ciśnienia w trakcie zatłaczania. Ryzyko utraty szczelności jest trudne do oceny ze względu na złożoność struktur o rodzaju geologicznego niemożliwe do pełnego rozpoznania, skomplikowane procesy fizyczne zachodzące w zbiorniku, nieliniowe zmiany w górotworze. Dlatego do badania szczelności zbiornika CO<sub>2</sub> najlepiej używać metod pozwalających kontrolować rozprzestrzenianie się gazu w strukturze geologicznej. Do osiągnięcia tego celu bardzo pomocnymi mogłyby metody geofizyczne. Wykorzystanie tych metod jest oparte na rozpoznaniu zmian własności fizycznych zachodzących w ośrodku skalnym, w którym przepływa gaz. Dotyczy to takich parametrów jak prędkość fal sejsmicznych i ich tłumienie, gęstość ośrodku i jego własności elektryczne.

### Monitoring sejsmiczny

Zmiany własności sprężystych wywołane zatłaczeniem dwutlenku węgla dają wyraźny efekt sejsmiczny. Do wiadomości uzyskane dotychczas na złożu norweskim Sleipner oraz badania modelowe wykazały, że najlepszymi metodami wykorzystania pomiarów sejsmicznych jest badanie zmienności amplitudy (AVO) z odległości wzdłuż profilu oraz bez wątpienia najbardziej efektywna metoda opóźnień czasowych (time lapse). Ta ostatnia metoda polega na badaniu różnic czasów w jakich rejestruje się kolejne sygnały w sejsmogramie. Nasyconie warstwy dwutlenkiem węgla powoduje, że czas przejścia przez tę warstwę wzrasta a więc obserwujemy opóźnienie refleksów sejsmicznych pochodzących z poziomów nasyconych warstwa w porównaniu z czasami zarejestrowanymi w ośrodku nie nasyconym CO<sub>2</sub>.

Z uwagi na projektowaną ilość zatłaczanego CO<sub>2</sub> nie przewiduje się monitoringu sejsmicznego.

### Monitoring grawimetryczny

Ze względu na to, że pole grawimetryczne zanika z kwadratem głębokości to przy stosunkowo dużych głębokościach zbiorników i niewielkiej ilości zatłaczanego gazu efekt grawimetryczny wywołany zatłaczeniem może być bliski błędowi pomiaru, zwłaszcza w pierwszym etapie testowego zatłaczania. Jeśli jednak możemy go pomierzyć, to ten sposób detekcji CO<sub>2</sub> w zbiorniku jest użyteczny ma bowiem następujące zalety: jest tani i pomiary można powtarzać często. Przewiduje się wykonanie pomiarów na 200 punktach grawimetrycznych, w promieniu 40 m od otworu i na profilu o długości 1 km w formie:

- monitoringu zerowego przed zatłaczeniem (t<sub>0</sub>)
- pomiarów po zakończeniu kolejnych etapów zatłaczania.

Przedmiotem interpretacji będą anomalie różnicowe (np. różnica pomiarów po pierwszym etapie zatłaczania i pomiaru w ramach monitoringu zerowego).

### Monitoring z wykorzystaniem sejsmiki pasywnej

Zatłaczanie dwutlenku węgla do złoża powoduje powstanie naprężenia w ośrodku, o złożonym rozkładzie. Dotyczy to zarówno lokalnych rozkładów naprężenia wokół poroży powstających w rejonach dużego gradientu ciśnienia jak również regionalnych rozkładów w nadkładzie gdzie powstają naprężenia wynikające przesuwanego się frontu zatłaczania. Jeśli te naprężenia przekroczą wartości krytyczne to wówczas następuje relaksacja energii sprężystej, która może się manifestować emisją fal sejsmicznych. Rejestracja tych fal daje możliwość uzyskania informacji o

zjawiskach, jakie mają miejsce w ośrodku.

Jeżeli rejestracja jest prowadzona z użyciem sieci pomiarowej to:

É można badać intensywność procesów zachodzących w ośrodku badanej ciekawo (ilość zdarzeń w jednostce czasu) sejsmoakustycznie.

É lokalizacja hipocentrum można wykonać, gdy prowadzimy rejestrację przy pomocy sieci czujników, pozwala wyznaczyć rejony, w których naprężenia są szczególnie intensywne.

É jeżeli rejestracja dotyczy fal poprzecznych, to można określić kierunki sprężki, wykorzystując fakt, że ten rodzaj fali ulega rozszczepieniu i dzięki temu zjawisku istnieje możliwość takiej interpretacji zarejestrowanych fal sejsmicznych, aby można było wyznaczyć kierunki sprężki.

Wykorzystanie sejsmiki pasywnej (czyli inaczej mikrosejsmologii) jest przewidywane w trakcie procesu zatracania i monitorowania.

Szczególne zakresy przedsięwzięć związanych z umiejscowieniem sond (nadajników/anten), czystości pomiarów, pochylenie poziome i pionowe - będą przedmiotem odrębnego projektu technicznego.

#### Monitoring elektromagnetyczny i VSP 3C

Przewiduje się wykorzystanie multidyscyplinarnego monitoringu elektromagnetycznego i VSP 3C z wykorzystaniem sond geofizycznych.

Szczególne zakresy przedsięwzięć związanych z umiejscowieniem sond (nadajników/anten) w otworach, czystości pomiarów, pochylenie pionowe - będą przedmiotem odrębnego projektu technicznego.

#### Monitoring geochemiczny gruntu i wód gruntowych wokół otworu zatracającego cego

Faza przed zatracaniem określone t.

Obszar badań około 5000 m<sup>2</sup>, tzn. W promieniu około 40 metrów wokół otworu:

- pomiary zawartości CO<sub>2</sub>, radonu, helu, węgla, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> + N<sub>2</sub> w powietrzu glebowym w siatce 10x10 m - 200 pkt. pomiarowych
- wykonanie 18 otworów mierznicowych wokół planowanego otworu zatracającego cego
- pomiary zawartości CO<sub>2</sub>, radonu, helu w mierznicowych otworach wykonanych wokół planowanego otworu zatracającego cego o 2 strefy (łącznie 18 otworów)
- pobór próbek powietrza glebowego
- badania próbek powietrza glebowego w laboratorium o metodami chromatograficznymi oraz badania izotopowe węgla i tlenu w CO<sub>2</sub>
- wykonanie piezometrów o 4 otwory do max 20 m o 80 mb
- pobór próbek wód podziemnych w określonych okolicznych studniach, w wykonanych piezometrach
- badania wód z okolicznych studni lub piezometrów (określenie zawartości jonów głównych, pH, alkaliczności, izotopy stałe, gazy łącznie z węglowodorami, CO<sub>2</sub>)
- znaczniki gazów zatracane razem z CO<sub>2</sub> do otworu o mierzone w odwiercie obserwacyjnym

Faza zatracania

Bięce pomiary CO<sub>2</sub> w powietrzu glebowym wykonywane w trakcie pompowania CO<sub>2</sub> do otworu

Faza po zatraceniu o monitoring

- pomiary zawartości CO<sub>2</sub>, radonu, helu, węgla, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> + N<sub>2</sub> w powietrzu glebowym w siatce 10x10 m - 200 pkt. pomiarowych

- pomiary zawartości CO<sub>2</sub>, radonu, helu w małych rdnicowych otworach wykonanych wokół planowanego otworu o 2 strefy (łącznie 18 otworów)
- pobór i badania próbek powietrza glebowego w laboratorium o metodami chromatograficznymi oraz badania izotopowe w glą i tlenu w CO<sub>2</sub>
- pobór próbek wód podziemnych w określonych okolicznych studniach, w wykonanych piezometrach
- badania wód podziemnych (określenie zawartości jonów głównych, pH, alkaliczności, izotopy stałe, gazy łącznie z w glowodorami, CO<sub>2</sub>)

### Biomonitoring

Przewiduje się badania koncentracji CO<sub>2</sub> w ramach biomonitoringu wokół odwiertu w obszarze o wymiarach 200 x 200 m, w siatce 50 x 50 m. Próbki gleby pobierane z głębokości 80 cm będą badane na obecność określonych mikroorganizmów. Zakres badań może obejmować inne badania fauny, a szczególny zakres prac zostanie podany w odrębnym projekcie technicznym. Prace zostaną wykonane w formie:

- monitoringu zerowego przed rozpoczęciem (t<sub>0</sub>)
- pomiarów po zakończeniu kolejnych etapów rozpoczęcia.

### Prace geodezyjne

Dokładna lokalizacja punktów otworów małych rdnicowych i piezometrów oraz punktów poboru próbek gleby/gruntu zostanie określona za pomocą GPS. Współrzędne punktów grawimetrycznych zostaną określone za pomocą GPS i niwelacji klasycznej,



## PODSUMOWANIE

Niniejsze opracowanie stanowi pierwszą w naszym kraju próbę kompleksowego scharakteryzowania potencjalnego składowiska dwutlenku węgla zgodnie z wymogami Dyrektywy unijnej w sprawie geologicznego składowania dwutlenku węgla (2009/31/WE).

Charakteryzowana była, w oparciu o dostępne materiały archiwalne, struktura Budziszewice-Zaosie, położona w odległości około 60 km od elektrowni Bełchatów. Została ona wybrana w rezultacie prac wykonanych w ramach I segmentu dla rejonu Bełchatowa i przeprowadzono dla niej wszystkie analizy przewidziane w zakresie ramowym dla II segmentu (patrz wyżej), na bazie dostępnych materiałów archiwalnych. Struktura ta jest najlepiej rozpoznana otworami (6 otworów) i sejsmiki (3 profile z lat 1999-2000, 6 profili z lat 1970-tych nadających się do wykorzystania) spośród wszystkich rozpatrywanych w rejonie Bełchatowa. Nie spełnia ona idealnie wszystkich podrzecznych kryteriów przydatności na potencjalne składowisko dla projektu demonstracyjnego PGE Elektrownia Bełchatów S.A., ale tylko dla niej można przeprowadzić wiarygodne analizy przewidziane w ramach II segmentu, w oparciu o dostępne materiały archiwalne.

Struktura Budziszewice posiada kolektory przydatne do geologicznego składowania dwutlenku węgla w utworach jury dolnej (bezpieczny jest kolektor synemuru, ale jest on w szczytowej części struktury lokalnie poręczony z poręczym kolektorem górnego pliensbachu; główne uszczelnienie stanowi utwory dolnego toarku) oraz w mniejszym stopniu triasu dolnego. Wskaźniki kolektorskie utworów dolnej jury są, według realistycznych szacunków wystarczające dla geologicznego składowania dwutlenku węgla w założonych ilościach. Zatemczanie do formacji synemuru (i lokalnie hettangu) byłoby bezpieczne i wykonalne pod warunkiem przeprowadzenia zaproponowanego programu monitoringu zerowego, który dałby w rezultacie model struktury o stopniu szczegółowości wystarczającym na potrzeby projektu demonstracyjnego.

Jako struktury/obiekty rezerwowe zaproponowano dla PGE EBSA kolejne struktury w rankingu: Lutomiersk i Wojszyce, które wydają się spełniać wspomniane kryteria nawet lepiej niż Budziszewice-Zaosie, ale może wynikać to z faktu, że są nieporównywalnie słabiej rozpoznane. Dla wspomnianych struktur rezerwowych przewidziano w najbliższym czasie wykonanie rozpoznawczych prac sejsmicznych (Nowak *et al.*, 2009a i 2009b) i odwiercenie po jednym otworze badawczym. Przewidziano w tym wykonanie jednego otworu w rejonie Pabianic, na SE od struktury Lutomiersk, w siedztwie w zakresie tektonicznym, co umożliwi odpowiedź na pytanie, na ile bezpieczne może być geologiczne składowanie w utworach dolnej jury dla struktury Lutomiersk i ewentualnie struktury Tuszyn (pomiędzy nimi wg map geologicznych w skali 1:500 000 występuje w rejonie Pabianic niewielkie podniesienie w permie, ale nie wiadomo, czy odpowiada temu struktura w dolnej jurze) oraz jednego w szczytowej partii NW części struktury Wojszyce, w obrębie której brak jest otworów nawiercających jurę (siedztwie). Po wykonaniu powyższych prac i opracowaniu ich wyników struktury te będą rozpoznane w porównywalnym stopniu jak struktura Budziszewice-Zaosie (do pewnego stopnia jednak także w mniejszym zakresie). Na potrzeby projektu demonstracyjnego zostanie wtedy wybrana przez PGE EBSA jedna z trzech struktur/obiektów, uwzględniając nie tylko informacje geologiczne, ale także możliwe konflikty interesów (głębokie rezerwowe zbiorniki wód podziemnych, koncesje naftowe, możliwości i koszty transportu rurociągiem, ewentualny opór mieszkańców i właścicieli gruntów).

Jako rozszerzenie niniejszego raportu (a konkretnie zadania **1.1.18**) sporządzono projekt prac geologicznych na potrzeby monitoringu potencjalnego składowiska projektu demonstracyjnego PGE EBSA w Budziszewice-Zaosie, którego szczególne charakterystyki przedstawiono w rozdziałach **1.1.14** i **1.1.17** oraz projekty prac geologicznych na wiercenie otworów do pilotażowego zateczania dwutlenku węgla (Modliński *et al.*, 2009a i 2009b).

## Literatura

*Amyx J.W. Bass D.M., Whilting R.L., 1960 ó Petroleum Reservoir Engineering ó Physical Properties, Mc Crew-Hill Book Company, New York, Toronto, London.*

*Baria R., Jung R., Tischne T., Nicholls J., Michelet S., Sanjuan B., Soma N., Asanuma H., Dyer B. and Garnish J., 2006 - Creation of an HDR reservoir at 5000 m depth at the European HDR project. PROCEEDINGS, Thirty-First Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, January 30-February 1, 2006 SGP-TR-179*

*Beyer L.,R., 1993 ó Contouring with center line faults: Using fault geometry to your advantage. Part 1: A close look at map quality achieved with centerline fault technology and a description of a program execution. The Leading Edge. January 1994.*

*Bernstone C., 2009 ó Progress from the Vattenfall CCS Demonstration projects in Denmark and Germany: CO2 Storage and Transportation, CO2NET Seminar 2009, Trondheim.*

*Beyer L.,R. 1994 ó Contouring with center line faults: Using fault geometry to your advantage. Part 2: A comparison to standard methods of computer mapping in heavily faulted terrain. The Leading Edge. December 1993, Buller et al eds, p. 399-406.*

*Biaćek T., Grzesik H., Hać E., 1992 ó Dokumentacja sejsmiczna Justynów - Je ów; Skierniewice - Nowy Kaw czyn 1990/1991. Arch Pa stw. Inst. Geol. Warszawa.*

*Bloch J., 1979 ó Dokumentacja otworu badawczego Zaosie 1. Przedsi biorstwo Poszukiwa Nafty i Gazu w Woćminie. Arch. Pa stw. Inst. Geol. Warszawa.*

*Bojarski L, 1993 ó Mapa hydrochemiczna i hydrodynamiczna utworów dolnej jury. Wyd. Kartogr. Warszawa.*

*Bojarski L., 1996 ó Atlas hydrogeologiczny i hydrodynamiczny paleozoiku i mezozoiku oraz ascezyjnego zasolenia wód podziemnych na Ni u Polskim, 1:1 000 000. Pa stw. Inst. Geol. Warszawa.*

*Carter R.D., Tracy G.W., 1960 ó An Improved method for Calculating Water Influx, Trans AIME 219, Journal Petroleum Technology, Dec. 1960, 58-60.*

*Chadwick A., Arts R., Bernstone C., May F., Thibeau S., Zweigl P, 2008 ó Best practice for the storage of CO<sub>2</sub> in saline aquifers. Keyworth, Nottingham, British Geological Survey.*

*Cosetino L., 2001 ó Integrated Reservoir Studies. Enfield Distribution. (March 01.2001).*

*Davis J.,C., 1986, Statistic and data analysis in geology. John Wiley & Sons, New York, Second Edition.*

*Dadlez R., red. 1998 ó Mapa tektoniczna kompleksu cechszty sko-mezozoicznego na Ni u Polskim, 1:500 000. Pa stw. Inst. Geol. Warszawa.*

*Dadlez R., 2001 ó Przekroje geologiczne przez bruzd óródpolsk . Pa stw. Inst. Geol. Warszawa.*

Dadlez R., Marek S., Pokorski J., red., 2000 ó Mapa geologiczna Polski bez utworów kenozoiku, 1:1 000 000. Pa stw. Inst. Geol. Warszawa.

Deutsch, Clayton V., 2002 ó "Geostatistical Reservoir Modeling". Oxford University Press.

Deutsch, C., Journel A.G., 1992 ó GSLIB: Geostatistical Software Library and Users Guide, New York, Oxford University press, 340 p.

Deczkowski Z., 1976 ó Charakterystyka osadów jury dolnej i rodkowej obszaru kalisko-cz stochowskiego. IG, Biuletyn 295. Z bada stratygraficzno-paleontologicznych w Polsce, tom IX

Duan ZH., Moller N., Weare J.H., 1992 - An equation of state (EOS) for CH<sub>4</sub>-CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O I: pure systems from 0 to 1000 C and from 0 to 8000 bar. Geochim. Cosmochim. Acta, 56: 2605-2617.

Dubrule O., 1998 ó Geostatistics in Petroleum Geology. AAPG Continuing Education Course Note Series #38. AAPG. Tulsa, Oklahoma, USA 1998.45 pages. 125 figs.

Dubrule O., 2003 ó Geostatistics for Seismic Data Integration in Earth Models. 2003 Distinguished Instructor Short Course. Distinguished Instructor Series. No. SEG/EAGE. Tulsa, Oklahoma, USA. 2003.279.

Dyrektywa 2009/31/WE PARLAMENTU EUROPEJSKIEGO i RADY z dnia 23 kwietnia 2009 w sprawie geologicznego składowania dwutlenku w glia oraz zmieniaj ca Dyrektywy Rady 85/337/EWG, 96/61/WE, Dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2000/60/WE, 2001/80/WE, 2004/35/WE, 2006/12/WE i Rozporz dzenie (WE) nr 1013/2006 oraz Accompanying document to the proposal for a DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on the geological storage of carbon dioxide Impact Assessment.

Dziewi ska L., Marek S., Jó wiak W., 2001 ó Przekroje sejsmiczno-geologiczne przez wałkujawski i gielniowski, 1:100 000. Biul. Inst. Geol. 398. Warszawa.

Dziewi ska L., Petecki Z., 2004 - Kompleksowa interpretacja bada geofizycznych N obrze enia Gór wi tokrzyjskich. Instr. i metody bada geologicznych PIG, zesz. 58.

Ershaghi I., et al., 1983 ó JPT March, 691, SPE 10311.

FEP Database System and Generic CO<sub>2</sub> Geological Storage FEP Database updated, January 2008 - Quintessa FEP database (Features, Events and Processes).

Gerstenberger M., Nicol A., Stenhouse M., Berryman K., Stirling M., Webb T., Smith W., 2008 ó Modularised logic tree risk assessment method for carbon capture and storage projects, Energy Procedia.

Gousie, M., Franklin, R., 1998 ó Converting Elevation Contours to a Grid. In Proceedings, Eighth International Symposium on Spatial Data Handling (1998), T. Poiker and N. Chrisman, Eds., pp. 647-656.

Gousie, M. B. and Franklin, W. R., 2003 ó Constructing a DEM from Grid-based Data by Computing Intermediate Contours. In GIS 2003: Proceedings of the Eleventh ACM International

*Symposium on Advances in Geographic Information Systems (New Orleans, 2003), E. Hoel and P. Rigaux, Eds., pp. 71-77. [[pdf]*

*Gousie, M. B., 1998 ó Contours to Digital Elevation Models: Grid-Based Surface Reconstruction Methods. PhD thesis, Rensselaer Polytechnic Institute, 1998.*

*Górecki W., Reicher B., Ma kowski. T., I apinkiewicz A., Papiernik B., Poprawa P., et al., 1998 ó Ocena potencjału naftowego i możliwości odkrycia złóż w głowodorów w utworach mezozoicznych w wybranych strefach Ni u Polskiego w relacji do basenu Morza Północnego - analiza i interpretacja w systemie Landmark.. (Na zlecenie Ministerstwa środowiska) Arch. ZSE, AGH Kraków.*

*Górecki W., Papiernik B., Ma kowski T., Krzywiec P., I apinkiewicz A.P., Reicher B., Kowalczewski Z., Żonkiewicz, Z., Poprawa P., Kotarba M., Kosakowski P., Kowalski A. Smolarski L., li K., 2001 ó Geologiczne i generacyjno - akumulacyjne uwarunkowania występowania złóż ropy naftowej i gazu ziemnego w niecce miechowskiej - analiza, reprocessing i reinterpretacja w systemie Promax i StrataModel. Archiwum ZSE AGH (Temat finansowany ze środków NFO )*

*Górecki W., red., 2006 - Atlas zasobów geotermalnych na Ni u Polskim. Formacje mezozoiku. Kraków, GOLDRUK.*

*Heidberg S., Swinkles W.J.A.M., 2001 - Probabilistic Reserves Estimation Procedures (Chapter 5 in: Guidelines for the Evaluation of Petroleum Reserves and Resources, p. 41 - 52. Society of Petroleum Engineer, 2001).*

*J drzejowska-Tyczkowska H., 2009 - Inwersja sejsmiczna, akustyczna i elastyczna fal podziemnych, konwertowanych i poprzecznych w zagadnieniach interpretacji złóż ropy. Prace INiG nr 160.*

*J drzejowska-Tyczkowska H. i in., 2004 - First Experience with 4D seismic in Poland; Feasibility Studies of BMB Field. EAGE 66<sup>th</sup> Conference and Exhibition, Paris, June 2004.*

*J drzejowska-Tyczkowska H., 2003 ó Sejsmicznie konsystentne estymatory złóż ropy w głowodorów. Prace IGNiG nr 123.*

*Jones, T.A., Hamilton, D.E., 1992 ó A philosophy of the Contour Mapping with the Computer. In: Computer Modeling of Geologic Surfaces and Volumes ed. Hamilton, D., E., Jones, T. A., AAPG Computer Applications in Geology, No. 1. Tulsa, Oklahoma, USA. 1-8.*

*Journel, A.G., Huijbregts Ch., J, 1978 ó Mining Geostatistics, Academic Press, New York.*

*Journel, A.G., Gomez Hernandez J., J., 1989 ó Stochastic Imaging of the Wilmington Clastic Sequence, SPE 19857.*

*Karwasiecka M, 1997 ó Parametry geotermalne na obszarze Polski. Opracowanie archiwalne PIG.*

*Kriege D.V., 1966 ó Two-dimensional weighted moving-average trend surfaces for ore evaluation. In Proc. Symposium on Mathematical Statistics and Computer Applications in Ore Valuation. Mar. 7-8: Jour. South African Inst. Mining and Metallurgy, Johannesburg. p.13-38.*

- Labus K., 2009 *ó Modeling hydrochemical effects of carbon dioxide sequestration in saline aquifers of the Upper Silesian Coal Basin*. Wyd. Pol. l. Gliwice. pp. 1-109 (w druku).
- Labus K., 2008a *ó Mo liwo ci geologicznego skądowania CO<sub>2</sub> w utworach formacji d bowieckiej ó miocen SW cz ci GZW*. Zesz. Nauk. Pol. l. Seria: Górnictwo. Nr 286. pp. 25-35.
- Labus K., 2008b *ó Modelowanie efektów zatfuczania CO<sub>2</sub> do poziomów wodono nych karbonu GZW*. Biuletyn PIG nr 431. pp. 111- 120.
- Labus K., 2008c *ó Model oddziaćywania z utworami izoluj cymi CO<sub>2</sub> zatfuczanego do poziomów wodono nych karbonu GZW*. Zesz. Nauk. Pol. l. Seria Górnictwo. Z. 285. Gliwice. Pp 137-150.
- Larsen et al., 2007 *ó Kalundborg case study, a feasibility study of CO<sub>2</sub> storage in onshore saline aquifers, Rapport 2007/2*.
- Lines of Defence/Layers of Protection Analysis in the COMAH Context. Prepared by Amey Vectra Limited for the Health and Safety Executive.*
- Lorentz J., Bray B.G., Clark C.R.J., 1964 *ó Calculating Viscosity of Reservoir Fluids from there Composition* *Journal of Petroleum Technology*, 23.
- Lumley D.E., Behrens R.A., Wang Z., 1997 - *Assesing the technical risk of a 4-D seismic project*. The Leading Edge, September 1997.
- l obaziewicz Z., Misiewicz W., Majewska B., 1976 *ó Dokumentacja sejsmiczna l ód - Tomaszów Mazowiecki 1975/1976*. Arch. Pa stw. Inst. Geol. Warszawa.
- Majorowicz J., 1983 *ó Badania geotermiczne. W: Budowa geologiczna niecki warszawskiej (pćockiej) i jej podć a pod redakcj S. Marka. Prace Pa stw. Inst. Geol. Warszawa.*
- Mallet J.-L., 2002 *ó Geomodelling. Oxford University Press Monograph*.
- Mallet, J.-L., 2008 *ó Numerical Earth Models. EAGE Publications, 147 pp.*
- Marek S., 1959 *ó Budowa geologiczna antykliny Justynowa koć l odzi. Kwartalnik Geologiczny 3/1.*
- Marek S., 1971 *ó Ropo-gazono no waću kujawskiego i obszarów przylegćych na tle budowy geologicznej. Cz I - Budowa geologiczna. Prace Pa stw. Inst. Geol. Warszawa.*
- Marek S., 1973 *ó Dokumentacja wynikowa otworu wiertniczego Je ów IG-1. Arch. Pa stw. Inst. Geol. Warszawa.*
- Marek S. Red., 1977 *ó Budowa geologiczna wschodniej cz ci niecki mogile sko-ćdzkiej, strefa Gopć-Pon tów-Pabianice. Prace Pa stw. Inst. Geol. 80. Warszawa.*
- Marek S., Znosko J., 1972 *ó Tektonika Kujaw. Kwartalnik Geologiczny 16/1.*
- Marek S. Red., 1983 *ó Budowa geologiczna niecki warszawskiej (pćockiej) i jej podć a. Prace Pa stw. Inst. Geol. 103.*



Matheron G., 1963 *ó Principles of geostatistics: Economic Geology* 58, p. 1246 ó 1266.

Matheron, G., 1970 *ó The Theory of Regionalized Variables and Its Applications. Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique, Fascicule 5, available from the Centre de Geostatistique de l'École des Mines de Paris, 35 rue St. Honore, 77300 Fontainebleau, France.*

MIDCARB Sequestration Calculator: [www.midcarb.org/calculators](http://www.midcarb.org/calculators)

Modli ski Z., Skrzypczyk L., Adamczak T, Feldman-Olszewska A., Wróbel G., 2009a *ó Projekt prac geologicznych w celu wykonania pilota owego otworu wiertniczego Pabianice-2i w po€czeniu z pilota owym zat€czaniem dwutlenku w gla w struktur wodono n Lutomiersk.*

Modli ski Z., Skrzypczyk L., Adamczak T, Feldman-Olszewska A., Wróbel G., 2009b *ó Projekt prac geologicznych w celu wykonania pilota owego otworu wiertniczego Pabianice-2i w po€czeniu z pilota owym zat€czaniem dwutlenku w gla w struktur wodono n Wojszyce.*

Nagy S., Siemek J., Zawisza L., Blicharski J., Rybicki C., Smulski R., 2008 *ó Ograniczenia emisji dwutlenku w gla w wietle wyzwa cywilizacyjnych i klimatycznych poprzez proces separacji, transportu i geosekwestracji CO<sub>2</sub>.*

Noco W. Red., 1990 *ó Dokumentacja wynikowa otworu poszukiwawczego Zaosie 2. Zakład Poszukiwa Nafty i Gazu w Wo€minie. Arch. Pa stw. Inst. Geol. Warszawa.*

Nowak A., Adamczak T, Feldman-Olszewska A., Wróbel G., 2009a *ó Projekt prac geologicznych dla rozpoznania struktury LutomierskóTuszyn pod k tem jej przydatno ci do sk€dowania dwutlenku w gla, archiwum PGE EBSA.*

Nowak A., Adamczak T, Feldman-Olszewska A., Wróbel G., 2009b *ó Projekt prac geologicznych dla rozpoznania struktury Wojszyce pod k tem jej przydatno ci do sk€dowania dwutlenku w gla, archiwum PGE EBSA.*

Numbere P., et al., 1977 *ó Stanford University Petroleum Reservoir Research Report, November.*

Papiernik B., 1998 *ó Processing of analog contour maps into grid based computer maps. PB-2, Extended Abstra ct Book. Conference and Exhibition, Modern Exploration and Improved Oil and Gas Recovery Methods. Cracow, Poland, 1 ó 4 September 1998.*

Papiernik B., Jó wiak P., Pelczarski A., Grotek I., Bruszevska B., 2000 *ó Konstrukcja cyfrowej mapy strukturalnej sp gu cechsztynu w oparciu o analogow map sejsmiczn sp gu cechsztynu. PIG Warszawa.*

Papiernik B., 2002 *ó Zalety i ograniczenia wykorzystania programu ZMAP - PLUS do konstruowania sejsmicznych map czasowych i g€boko ciowych na podstawie sejsmiki 2D. Materiały konferencyjne: šRelease 2003 - Nowoczesno i konieczno ö. Szkolenie u ytkowników stacji Landmark. 6-8 listopad 2002, Kraków.*

Papiernik B, Hajto M., Górecki W., 2005 *ó Computer-aided quantitative subsurface mapping - examples of utilization. Przegl d Geologiczny Nr.10/2 October 2005. Vol.53 p.956-960.*

Papiernik B., Machowski G., 2007 ó Model litologiczno ó zbiornikowy. W: Semyrka et al. Charakterystyka zmienno ci parametrów petrofizycznych dolomitu gównego w rejonie Mi dzychodu. Grant MNiIL.

Pazdro Z., 1977 ó Hydrogeologia ogólna. Wyd. Geolog. Warszawa.

Podr cznik u ytkownika Petrel 2009.1. Eclipse 300, v 2008.1 firmy GeoQuest Schlumberger.

Prevedel B., Wolgemuth L., Henniges J., Krüger K., Norden B., Förster A. , 2008 ó The CO2SINK Boreholes for Geological Storage Testing, Progress Report, Potsdam.

Pruess, K. and J. García. Solutions of Test Problems for Disposal of CO2 in Saline Aquifers, Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBNL-51812, December 2002.

Pruess, K., J. García, T. Kavscek, C. Oldenburg, J. Rutqvist, C. Steefel and T. Xu. Intercomparison of Numerical Simulation Codes for Geologic Disposal of CO2, Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBNL-51813, Berkeley, CA 94720, December 2002.

Pruess, K. and Spycher N. ECO2N ó a fluid property module for the TOUGH2 code for studies of CO2 storage in saline aquifers. Science Direct, Energy Conversion and Management. No 48. 2007.

Pruess K., Garcia J., Kavscek T., Oldenburg C. Rutqvist J., Steefel C., Xu T.. Code intercomparison builds confidence in numerical simulation models for geologic disposal of CO2. Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBNL-51813, Berkeley, 2004.

Reicher B., Jarosz Z., 190 ó Katalog otworów wiertniczych i studni góbinowych w utworach kredy dolnej i jury dolnej na Ni u Polskim. ISE AGH.

Risk assessment for analyzing the safety of geological CO2 sequestration operations in the deep subsurface. Information Geo Energy. TNO, grudzie 2006.

Rosenbauer R.J., Kokosalan T., Palnandri J. L., 2005 ó Experimental investigation of CO2-brine-rock interactions at elevated temperature and pressure: Implications for CO2 sequestration in deep-saline aquifers. Fuel Processing Technology, 86: 1581-1597.

Ross J.G., 2001 ó Petroleum Resources Classifications and Definitions. (Chapter 2 in: Guidelines for the Evaluation of Petroleum Reserves and Resources, p. 7-24. Society of Petroleum Engineers, 2001.

Seyegh S.C., Najman J., 1987 ó Cdn J of Chem Eng, April, 65, 314.

Shanor G., et al., 2002 ó From seismic to simulator trough geostatistical modeling and inversion. First Break, Vol. 20, No 2.

Solik-Heliasz E., Kubica J., 2007 - Instalacja demonstracyjna usuwania, transportu i składowania dwutlenku w gla dla BOT, Elektrowni Bechatówö. Cz : Wytypowanie miejsc do podziemnego składowania, kosztów składowania oraz okre lenie potencjału sekwestracji. Dokumentacja IChPW Zabrze.

Solik-Heliasz E., 2008 ó Czynniki geologiczne okre laj ce mo liwo podziemnego składowania

CO<sub>2</sub>. Przegląd Górniczy, 11-12.

Sowiński A., 2009 - Analiza niepewności i ocena ryzyka w petrofizycznym - facjalnym modelowaniu struktur geotermalnych: Praca Statutowa INiG Kraków, Nafta-Gaz (w druku).

Span P., Wagner W., 1996 - A new equation of state for carbon dioxide covering the fluid region from the triple-point temperature to 1100 K at pressures up to 800 MPa. *Journal of Chemical Reference Data*, 25 (6), s. 1509-1596.

Staples R., et al., 2009 - An Introduction to Time-Lapse (4D) Seismic Monitoring. DISC - kurs European Association of Geoscientists & Engineers, Kraków, październik 2009.

Swan A., R., H., Sandilands M., 1996 - Introduction to Geological Data Analysis. Blackwell Science.

Swinkles W.J.A.M., 2001 - Aggregation of reserves (Chapter 6 in: Guidelines for the Evaluation of Petroleum Reserves and Resources, p. 53-72. Society of Petroleum Engineers, 2001).

Szklarczyk T., Adamczyk A., 1990 - Warunki hydrogeologiczne dolnojurajskiego zbiornika geotermalnego. *Konferencja o wykorzystaniu wód geotermalnych w Polsce ze szczególnym uwzględnieniem Synklinorium Mogiłańsko-Łódzkiego*. *Prace Instytutu Geologicznego*, 26-37, październik.

Szott W. i zespół INiG, 2009 - Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO<sub>2</sub> wraz z programem ich monitorowania. Zadanie 1.1.15: Opracowanie szczegółowych statycznych modeli orodzenia geologicznego składowisk (trias dolny). Kraków, czerwiec 2009.

Szyperko-Teller A., Moryc W., 1988 - Rozwój basenu sedymentacyjnego piaskowca na obszarze Polski. *Kwartalnik Geologiczny* 37/1.

Szyperko-Teller A., 1997 - Trias dolny. Formalne i nieformalne jednostki litostratygraficzne triasu dolnego (piaskowca). W: *Epikontynentalny perm i mezozoik w Polsce*, pod redakcją S. Marka i M. Pajchłowej. *Prace Państwowego Instytutu Geologicznego* 153.

Tarkowski R., Marek S., Uliasz-Misiak B., 2009 - Wstępna geologiczna analiza struktur do składowania CO<sub>2</sub> w rejonie Bełchatowa, *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, tom 25, Zeszyt 2, s. 37-45.

Tarkowski R., Barabasz W., Królik W., Uliasz-Misiak B., 2008a - Preliminary results of the microbiological research on CO<sub>2</sub> natural exhalations executed for geobiomonitoring needs. *Slovak Geological Magazine*, s. 23-28.

Tarkowski R., Królik W., Uliasz-Misiak B., Wdowin M., 2008b - CO<sub>2</sub> contents in soil air for needs of carbon dioxide storage monitoring. *Slovak Geological Magazine*, s. 15-18.

Tarkowski R., Stopa J., 2007 - Szczelność struktury geologicznej przeznaczonej do podziemnego składowania dwutlenku węgla. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi* t. 23.

Tarkowski R. (red.) 2005: Podziemne składowanie CO<sub>2</sub> w Polsce w głębokich strukturach geologicznych (ropo-, gazo- i wodonośnych), Wyd. IGSMiE PAN.

Tarkowski R., 2005 ó Geologiczna sekwestracja CO<sub>2</sub>. Wydawnictwo IGSMiE PAN.

Troelsgaard-Sørensen A., Klinkby L., Christensen N.P., Dalhoff F., Biede, O., Noer M., 2009 - Outline some of the site investigations and future monitoring issues involved in the 'CCS Demo DK' project proposed by Vattenfall Nordic in Denmark. *First Break* v. 27, 1, pp. 79-83.

Tyski S., Calikowski J., red., 1965 ó Wyniki bada geologicznych i wásno ci fizycznych skał wschodniej cz ci struktury Justynowa. *Arch. Pa stw. Inst. Geol. Warszawa*.

Waggoner J.R., 2007 ó 4D Reservoir Management. DISC ó kurs, European Association of Geoscientists and Engineers 69th Conference & Exhibition, London, UK, 11-14 June 2007.

Warnecki i zespół INiG, 2009 ó Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO<sub>2</sub> wraz z ich programem monitorowania. Zadanie 1.3.2: Oznaczenia parametrów petrofizycznych próbek skał zbiornikowych i uszczelniających. Część 2 zadania obejmują wykonanie 30-50 analiz PVT dla warunków złożowych występujących w otworach w rejonie Bełchatowa. Krosno czerwiec 2009.

Watson D., F., 1992 ó Contouring. A Guide To The Analysis and Display of Spatial Data. *Computer Methods in the Geosciences* v. 10. Pergamon Press.

Wójcicki A., 2009 (red.) - Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO<sub>2</sub> wraz z ich programem monitorowania, Raport merytoryczny nr 1: Segment I, rejon Bełchatów. Strona projektu: <http://skladowanie.pgi.gov.pl>

Wurdemann H., 2008 ó News from the Ketzin storage site, CO<sub>2</sub>NET Seminar 2008, Warsaw.

Wysocka-Kudła H., 1989 ó Dokumentacja otworu poszukiwawczego Zaosie 3 - Zakład Poszukiwa Nafty i Gazu w Wołominie. *Arch. Pa stw. Inst. Geol. Warszawa*.

Zawisza L., 1993 - Uproszczona metoda oceny absolutnej przepuszczalności warstw porowatych. *Archives of Mining Sciences Polish Academy of Sciences*, vol. 38, issue 4.

Zoraster S., 1996 ó Imposing Geologic Interpretations on Computer Generated Contours Using Distance Transformations, *Mathematical Geology*, 28: 969-985.

Łak S., Przylibski T.A., Ciełkowski W., 2008 - Określenie zawartości dwutlenku węgla w powietrzu glebowym w Sudetach w rejonach występowania szczawów. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław*, 2008, s. 87.