Spis treści

Spis treści 1

1.1.18 OPRACOWANIE PROGRAMU MONITORINGU DLA WYTYPOWANYCH SKŁADOWISK (ORAZ PODSUMOWANIE II SEGMENTU) 6

Obiekt solankowy w rejonie Bełchatowa 6

Plan monitoringu powierzchniowego sejsmicznego, grawimetrycznego i elektromagnetycznego (PIG-PIB & PBG) 9

Metodyka badań sejsmicznych 9

Metodyka badań grawimetrycznych 12

Metodyka monitoringu elektromagnetycznego 15

Metodyka monitoringu elektrooporowego 17

Monitoring sejsmologiczny i metodą tomografii pasywnej (GIG) 18

Sieć sejsmologiczna 19

Monitorowanie aktywności sejsmicznej w trakcie procesu składowania CO_2 20

Opis sieci sejsmologicznej dla struktury Budziszewice-Zaosie 22

Podsumowanie 25

Monitoring mikrobiologiczny i stężenia CO2 w powietrzu podglebowym (IGSMiE PAN) 26

Program monitoringu powierzchniowego CO2 dla składowiska 26

Program biomonitoringu dla składowiska w obszarze l (rejon Bełchatowa) 35

Propozycja programu monitoringu parametrów kolektorów i uszczelnienia na podstawie planowanych prac z zakresu sejsmiki 4D (INiG) 37

Wybrane elementy technologii „sejsmika 4D" w aspekcie potrzeb podziemnego magazynowania dwutlenku węgla 37

Charakterystyka obiektów geologicznych z uwagi na efektywność monitoringu z zastosowaniem technologii sejsmiki 4D 39

Realne perspektywy i terminy dla sejsmiki 4D 44

Plany monitoringu testowego zatłaczania CO2 na jednej ze struktur rezerwowych (AGH & PIG-PIB). 47

Zakres i cel prac 48

Monitoring procesu zatłaczania 50

Obiekt solankowy w rejonie GZW 54

Program monitoringu (grawimetrycznego, elektromagnetycznego i elektrooporowego) stanu początkowego oraz w trakcie i po zakończeniu zatłaczania CO_2 dla obiektu Skoczów-Czechowice (PBG) 55

Monitoring metodą grawimetryczną 55

Monitoring metodą elektromagnetyczną 62

Monitoring metodą elektrooporową 71

Projekt wiercenia i wyposażenia otworów ISKRZYCZYN 1 i ISKRZYCZYN 2i (PIG-PIB & AGH) 78

Cel wiercenia, lokalizacja i planowana głębokość otworu Iskrzyczyn 1 i Iskrzyczyn 2i 78

Zakres badań geofizycznych 83

Szczegółowy projekt konstrukcji otworów 85

Monitoring sejsmologiczny i metodą tomografii pasywnej (GIG) 92

CHARAKTERYSTYKA WYBRANEGO ZBIORNIKA SKŁADOWANIA CO2 W WARSTWACH SOLANKOWYCH GZW 92

PODSTAWY FIZYCZNE TWORZENIA SIĘ MIKROWSTRZASÓW W OŚRODKU PORO-PLASTYCZNYM96

METODY MONITOROWANIA 104

ZAŁOŻENIA METODYCZNE MONITOROWANIA METODĄ SEJSMOLOGICZNĄ 107

Opis sieci sejsmologicznej dla obiektu Skoczów-Czechowice 115

PODSUMOWANIE 117

Plany monitoringu testowego zatłaczania CO2 dla struktury będącej alternatywą dla obiektu Skoczów-Czechowice (AGH & PIG-PIB) 118

Cel i zakres prac 118

Monitoring procesu zatłaczania 120

Trzeci obiekt solankowy 124

Wstępne projekty wierceń na potrzeby programu monitoringu dla obiektu Choszczno-Suliszewo (AGH) 126

Cel wiercenia, lokalizacja i planowana głębokość otworów 128

Zakres badań geofizycznych 133

Szczegółowy projekt konstrukcji otworów 136

Model przepływu CO2 wokół otworu Choszczno IG-1a 141

Monitoring procesu zatłaczania – założenia oraz badania dodatkowe 145

Przykładowy projekt wiercenia i wyposażenia otworów do testowego zatłaczania CO2 dla lokalizacji w rejonie Kłodawy (AGH & PIG-PIB)..... 149

Cel i zakres prac..... 149

Monitoring procesu zatłaczania 151

Monitoring sejsmologiczny i metodą tomografii pasywnej dla obiektu Choszczno-Suliszewo (GIG). 155

Charakterystyka wybranego zbiornika składowania CO_2 w poziomach solankowych Choszczno-Suliszewo 155

Podstawowe geofizyczne metody monitorowania 157

Założenia metodyczne monitorowania metoda sejsmologiczną 159

Przykład modelowania inwersji tomograficznego pola prędkości 166

Opis sieci sejsmologicznej dla struktury Choszczno-Suliszewo 169

Podsumowanie 171

Monitoring mikrobiologiczny i stężenia CO2 w powietrzu podglebowym dla obiektu Choszczno-Suliszewo (IGSMiE) 172

Teoretyczne podstawy monitorowania zawartości dwutlenku węgla w powietrzu glebowym oraz biomonitoringu..... 174

Program monitoringu powierzchniowego CO_2 dla składowiska na strukturze Suliszewo 179

Program monitoringu (grawimetrycznego, elektromagnetycznego, elektrooporowego oraz sejsmiki 2D) stanu początkowego oraz w trakcie i po zakończeniu zatłaczania CO_2 dla obiektu Choszczno-Suliszewo (PBG & PIG-PIB) 203

Monitoring metodą grawimetryczną 203

Monitoring metodą elektromagnetyczną 210

Monitoring metodą elektrooporową 217

Monitoring metodą sejsmiki 2D 223

Propozycja programu monitoringu parametrów kolektorów i uszczelnienia na podstawie planowanych prac z zakresu sejsmiki 4D dla obiektu Grodzisk-Ujazd-Bukowiec-Paproć (INiG) 226

Charakterystyka wybranego obszaru badań i materiałów polowych 226

Metodyka oceny wykonalności monitoringu w zadaniach CARBON CAPTURE SEQUESTRATION (CCS) z wykorzystaniem analizy sejsmicznego pola falowego 251

Modelowanie numeryczne uproszczonych modeli ośrodka 254

Modele rzeczywiste i dane pomiarowe - przedział ufności i zakres dopuszczalnej wiarygodności286

Zakończenie 291

Struktury naftowe 292

Propozycja programu monitoringu parametrów kolektorów i uszczelnienia na podstawie planowanych prac z zakresu sejsmiki 4D dla obszaru złoża ropy naftowej Nosówka oraz rejonu GZW (INiG) 295

Monitorowanie przebiegu składowania CO_2 w zależności od rodzaju składowiska 297

Charakterystyka rejonów badań 304

Ocena dostępnych materiałów geologicznych i geofizycznych 315

Wstępny projekt monitorowania obiektu Nosówka 335

Podsumowanie 340

Projekt wiercenia i wyposażenia odwiertu Wilków 9I (AGH, PIG-PIB) 341

Cel wiercenia, lokalizacja i planowana głębokość otworu Wilków 9i 341

Zakres badań geofizycznych 347

Szczegółowy projekt konstrukcji otworu 349

Program monitoringu zawartości dwutlenku węgla w powietrzu podglebowym oraz biomonitoringu na obszarze złoża Wilków oraz złoża Nosówka (IGSMiE) 355

Powietrze i mikroorganizmy glebowe 355

Badania monitoringowe strumienia powierzchniowego i koncentracji CO_2 w powietrzu podglebowym w projektach składowania 362

Program monitoringu powierzchniowego CO_2 dla składowiska na złożu Wilków 365

Program monitoringu powierzchniowego CO2 dla składowiska Nosówka 389

Program monitoringu (grawimetrycznego, elektromagnetycznego i elektrooporowego)stanu początkowego oraz w trakcie i po zakończeniu zatłaczania CO_2 dla obiektu Wilków (PBG) 406

METODA GRAWIMETRYCZNA 406

METODY ELEKTROOPOROWE 413

METODY ELEKTROMAGNETYCZNE 419

Obiekt w pokładach węgla 427

Projekt wiercenia i wyposażenia otworów MIZERÓW S-1 i S1A -do pokładów 405 oraz wydobycia– cz. techniczna (AGH, PIG-PIB) 429

Cel wiercenia, lokalizacja i planowana głębokość otworów 431

Zakres badań geofizycznych 436

Szczegółowy projekt konstrukcji otworów 438

Model przepływu metanu wokół otworu Mizerów S1 i S1A 445

Program monitoringu zawartości dwutlenku węgla w powietrzu podglebowym oraz biomonitoringu dla składowiska Pawłowice-Studzionka (IGSMiE) 451

Metodyka pomiarów zawartości CO_2 w powietrzu podglebowym 452

Metodyka pomiarów strumienia CO_2 458

Harmonogram pomiarów zawartości i strumienia CO2 460

Program biomonitoringu dla składowiska Pawłowice-Studzionka 463

Monitoring sejsmologiczny i metodą tomografii pasywnej dla wytypowanych składowisk w pokładach węgla GZW w rejonie Pawłowice-Mizerów (GIG) 465

PODSTAWY FIZYCZNE PROWADZENIA MONITORINGU GEOFIZYCZNEGO 467

Metoda sejsmiczna 468

ZAŁOŻENIA METODYCZNE MONITOROWANIA METODĄ SEJSMOLOGICZNĄ 481

Możliwości zastosowania tomografii pasywnej do diagnostyki zmian w strukturach geologicznych w czasie procesu składowania CO_2 487

Przykład modelowania inwersji tomograficznego pola prędkości 493

Opis sieci sejsmologicznej dla struktury Brzeźce i Studzionka 496

Program monitoringu grawimetrycznego stanu początkowego oraz w trakcie i po zakończeniu zatłaczania CO_2 dla obiektu w pokładach węgla (PBG) 499

Monitoring metodą grawimetryczną 499

PODSUMOWANIE II SEGMENTU (zadania 1.1.14 - 1.1.18) 505

Dodatek A. Modelowania procesów zatłaczania CO2 do potencjalnych składowisk 514

1.1.18 OPRACOWANIE PROGRAMU MONITORINGU DLA WYTYPOWANYCH SKŁADOWISK (ORAZ PODSUMOWANIE II SEGMENTU)

Obiekt solankowy w rejonie Bełchatowa

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 geofizyką (w tym sejsmiką 2D) i otworami jest obecnie nieporównywalnie lepszy niż struktur rezerwowych Wojszyce i Lutomiersk(-Tuszyn) a nawet będzie w pewnym zakresie lepszy niż po wykonaniu dla tych struktur prac badawczych (przewidzianych w dokumentacjach geologicznych - 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 zatłaczaniem (najpierw testowym, ale lokalizację otworu do testowego zatłaczania w projekcie demonstracyjnym wybiera się z myślą o jego przyszłym wykorzystaniu do zatłaczania w pełnej skali) monitoringu zerowego (Chadwick et al., 2008). Z kolei prace wykonane w ramach monitoringu zerowego powtarza się z różną częstotliwością, w zależności od metody i etapu projektu demonstracyjnego, w trakcie zatłaczania 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*)[1].

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

W pierwszym przypadku chodzi głównie o międzynarodowy projekt badawczy CO2SINK, koordynowany przez GFZ Potsdam, gdzie prowadzi się zatłaczanie 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 zatłacza się około 30 tysięcy ton CO_2 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 biomonitoring. W Niemczech planowany jest projekt demonstracyjny dla elektrowni Vattenfalla w Janschwalde w Brandenburgii (Bernstone, 2009). Rozpatrywane są dwie lokalizacje - Birkholz-Beskow i Neutrebbin, niedaleko granicy z Polską, w rejonie Frankfurtu nad Odrą. Poziomem kolektorskim jest pstry piaskowiec (trias dolny) na głębokości około 1600 metrów. Projekt pilotowy Schwarze Pumpe obejmuje z kolei składowanie w sczerpanym złożu gazu Altmark, czyli dla innej opcji niż 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

[1] Zgodnie z zapisami Dyrektywy i najlepszymi praktykami dla rozpatrywanej struktury opracowuje się coraz to lepszy model statyczny, prowadzi symulacje zatłaczania, analizy ryzyka i opracowuje plany monitoringu, odpowiednio po uzupełniających pracach polowych (takich, jakie np. robiło PGE), szczegółowych pracach polowych, przy testowym zatłaczaniu, w trakcie pełnoskalowego zatłaczania, po zakończeniu zatłaczania. Niniejsze prace stanowiły etap „zerowy", gdyż rozpoczęto od danych archiwalnych.

wykonano badawcze prace sejsmiczne 2-D i rozpoczęto kampanię szczegółowego rozpoznania struktury sejsmiką 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 lądzie niż pod dnem morza (Sleipner -Chadwick et al., 2009) i w poziomach solankowych a nie w sczerpanych złożach węglowodorów (przynajmniej dla niniejszego opracowania z rejonu Bełchatowa). Biorąc to pod uwagę, okazuje się że takich projektów nie ma zbyt wiele - 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 ze 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

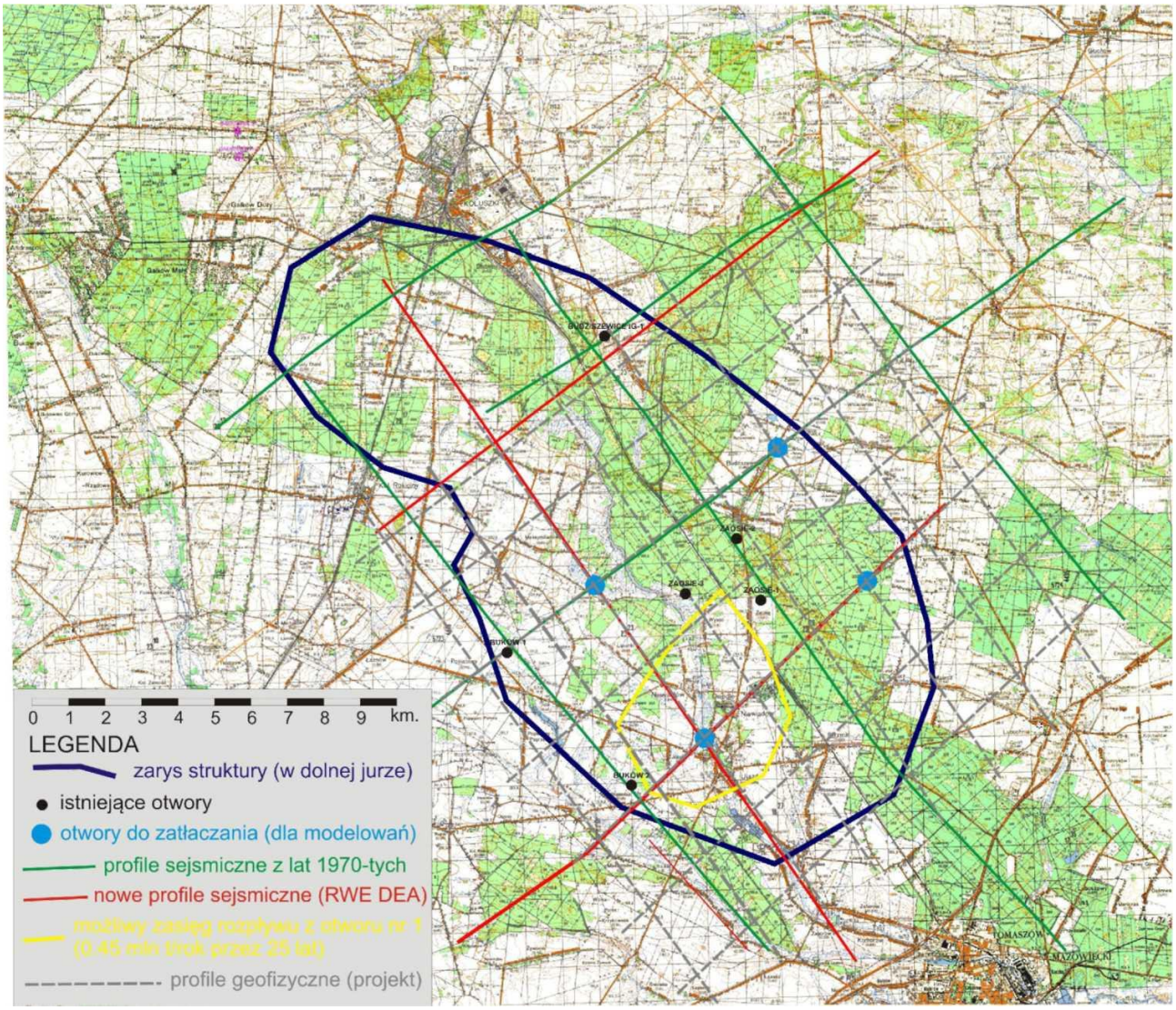


Fig. 1.1.18_1 Lokalizacja prac geofizycznych dla monitoringu zerowego[2] na tle mapy topograficznej

[2] Jest to odpowiednik prac rozpoznawczych „pseudo-3D" dla wskazania optymalnej lokalizacji otworów geotermalnych (Bujakowski (red.), 2009), z tym że w przypadku geologicznego składowania CO2 (Chadwick et al., 2006) jest to fragment zakresu prac związanych z rozpoznaniem potencjalnego składowiska (w ramach koncesji na rozpoznanie); pominięto tu kosztowną sejsmikę 3D/3C służącą do określenia parametrów złożowych.

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

(Adam Wójcicki, Grzegorz Wróbel)

(Cezary Ostrowski, Marek Wojdyła)

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 zatłaczanie CO_2 (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 **Fig. 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 półszczegółowego zdjęcia grawimetrycznego (**Fig. 1.1.18_2**).

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

Metodyka badań sejsmicznych

Planowane badania mają umożliwić właściwe wykartowanie antykliny, tektoniki deformującej horyzonty będące przedmiotem badań oraz w szczególności uszczelnienia i wyżej leżącego nadkładu. Dokładne odwzorowanie struktury uskoków 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 zatłaczania 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 źródeł, tj. testy sygnału generowanego przez wibratory (sweepu), ilości sweepów, ilości wibratorów, długości sygnału, szerokości pasma i długości taperów.

Źródło wzbudzania:

- Ilość wibratorów 2 + 1 zapas
- Interwał wzbudzania 25 m
- Baza sweepowania stacjonarnie
- Sweep 5 - 130 Hz
- Rodzaj sweepu - 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 środkowy
- Odległość między kanałami 6,25 m
- Częstotliwość rezonansowa odbiorników 10 Hz
- Grupowanie geofonów 6 geofonów punktowo (umożliwiające tworzenie DGF)

Parametry rejestracji:

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

Dla spełnienia w/w wymagań, nowe pomiary sejsmiczne powinny mieć dużą szerokość pasma (zarówno na niskim jak i na wysokim końcu spektrum częstotliwości). Metodyka akwizycji wymaga wystarczającej elastyczności aby zapewnić dostateczne wytłumienie szumów otoczenia. Jest to szczególnie ważne tam, gdzie dolna jura zalega płycej przez co efektywna krotność pokrycia byłaby dużo niższa niż wartość nominalna.

Rozpoznanie strefy małych prędkości (SMP)

- badanie rozkładu prędkości w strefie przypowierzchniowej metodą mikroprofilowania prędkości w otworach o głębokościach 40-60m (głębokość musi być wystarczająca do identyfikacji warstwy o prędkości co najmniej 1500 m/s)
- krok pomiaru 1m do głębokości 20 m, głębiej co 2 m
- ilość mikroprofilowań prędkości: do 50
- ilość LVL: około 160

- miejsce lokalizacji i głębokość mikroprofilowań SMP: na krzyżówkach profili, oraz równomiernie na profilach. W miejscach pogorszenia jakości rejestracji pomiary należy zagęścić.
- na podstawie interpretacji mikrokarotażu zostanie wyliczona statyka polowa

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)
- Tłumienie 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 prędkości co ok. 1 km
- Sprawdzanie i korekta wiązania na krzyżówkach
- Automatyczna korekta poprawek statycznych
- Sprawdzanie i korekta wiązania na krzyżówkach
- DMO
- Końcowe analizy prędkości co 0,5 km
- Analiza mutingu zmiennego wzdłuż profilu
- Wprowadzenie poprawek kinematycznych i mutingu
- Skalowanie amplitud (1 okno lub długie AGC)
- Suma końcowa
- Sprawdzenie i ewentualna korekta wiązania na krzyżówkach
- Migracja czasowa po składaniu
- Korekta widma sygnału
- Filtracja częstotliwościowa
- Poprawa stosunku sygnał/zakłócenie
- Skalowanie amplitud tras

- Migracja czasowa przed składaniem
- Migracja głębokościowa po składaniu

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 małych prędkości oraz generalnie do weryfikacji modelu prędkości).

Projektowane zdjęcie grawimetryczne obejmie ww. profile sejsmiczne w ilości 15 sztuk. Łączna długość profili wyniesie około 250 km, a krok pomiarowy na profilu - 100 m. W ramach zdjęcia 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^2.

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^2),
- określenie wysokości h dla 5000 punktów pomiarowych (niwelacja) z powtórzeniem pomiarów na ok. 5 % stanowisk. Średni błąd kwadratowy niwelacji nie powinien przekroczyć ±0,05 m; niwelację należy dowiązać 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° (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 przęseł łączących te punkty z punktami osnowy grawimetrycznej.
- wykonanie 5500 pomiarów siły ciężkości na 5000 stanowisk pomiarowych,
- wykonanie 250 nawiązawczych pomiarów siły ciężkości na stanowiskach bazowych (podstawowych), w tym także pomiary przęseł sieci podstawowej,
- 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 ±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 siły 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 siły ciężkości w redukcji Bouguera dla stałej i zmiennej gęstości utworów warstwy redukowanej,
- 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 stałych i zmiennej gęstości
- warstwy redukowanej 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 gęstości 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.

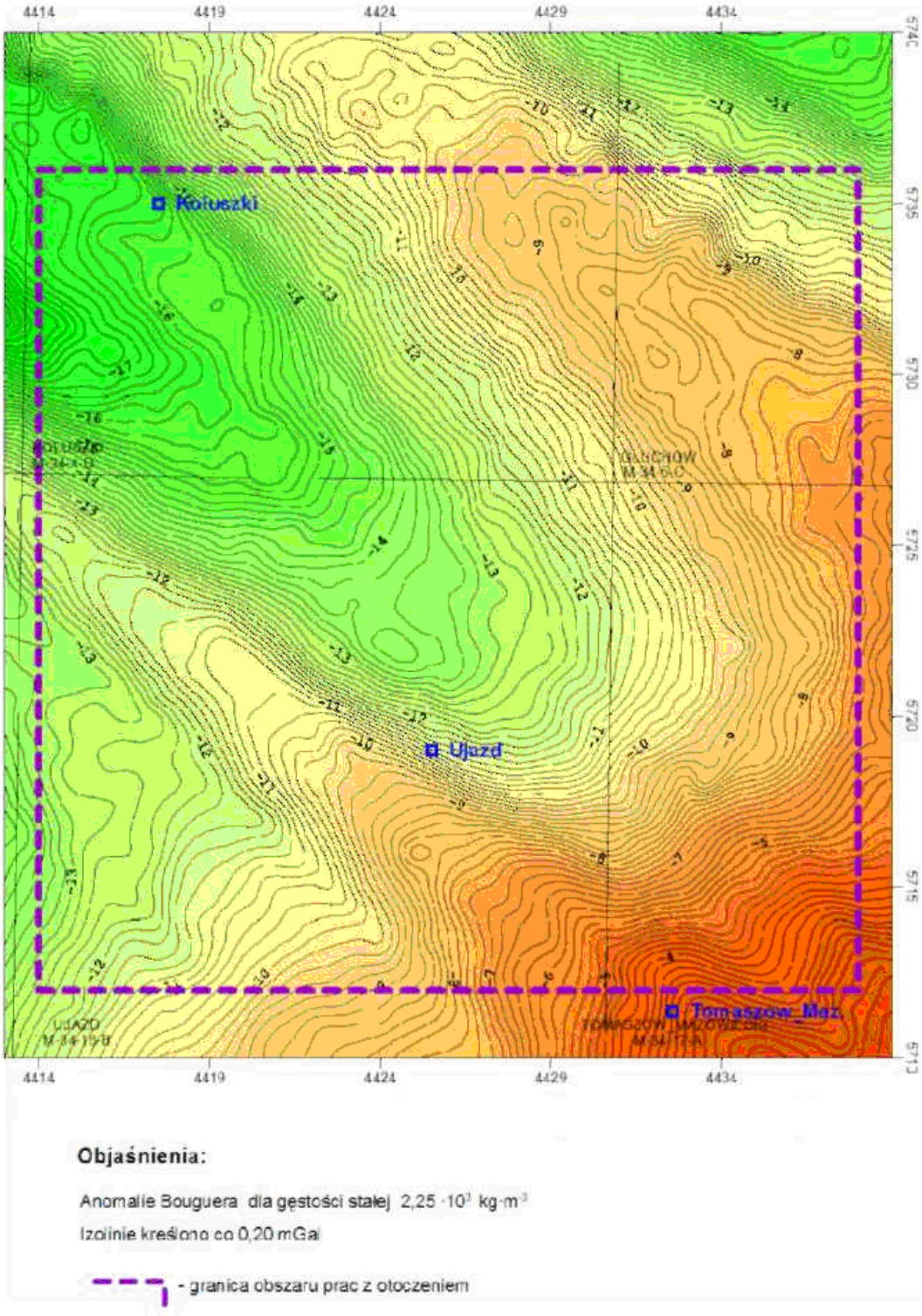


Fig.1.1.18_2 Mapa anomalii Bouguera w rejonie badań na podstawie danych archiwalnych

Metodyka monitoringu elektromagnetycznego

Prace geoelektryczne wykonane zostaną metodą magnetotelluryczną MT/AMT (w paśmie magnetotellurycznym - MT i audiomagnetotellurycznym - AMT), w wariancie ze sztucznym źródłem pola elektromagnetycznego CSAMT (Controlled Source Audiofrequency Magnetotelluric), IP (Induced Polarization) oraz metodą procesów przejściowych TDEM (Time - Domain Electromagnetic). Projekt prac obejmuje wykonanie prac pomiarowych wraz z przetwarzaniem i interpretacją danych wzdłuż profili o łącznej długości około 120 km (realizację wszystkich tych badań umożliwia aparatura 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. polaryzowalności, z czym związane są procesy elektrochemiczne zachodzące na granicy ciało stałe - roztwór) i powiązanie tej zmienności ze zmianami litologicznymi. Ponadto należy zauważyć że najważniejszy parametr metod elektromagnetycznych - oporność osiąga bardzo wysokie wartości dla "poduszki" nadkrytycznego CO_2 (Chadwick et al., 2008) co powoduje że metody te są potencjalnie bardzo użyteczne dla monitoringu zatłoczonego CO_2 (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 - profilowe i parametryczne (MT/AMT)

Jedną z metod wykorzystaną w badaniach będzie metoda sondowań magnetotellurycznych w paśmie magnetotellurycznym - MT i audiomagnetotellurycznym - AMT. Krok pomiarowy punktów podstawowych (5-cio składnikowych: Ex, Ey, Hx, Hy i Hz) wynosił będzie, w zależności od warunków topograficznych 500 metrów. Dodatkowo do każdego punktu podstawowego wykonany zostanie punkt dodatkowy, 2-składnikowy (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 polegały 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 - 10000 Hz. Czas rejestracji dla omawianych badań, na jednym punkcie pomiarowym wynosić będzie wynosił ok. 24 - 36 godzin, w zależności od warunków pomiarowych (poziomu zakłóceń).

Podstawowy układ pomiarowy sondowań MT/AMT składał 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 środka 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 uziemień 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 metodą kontrolowanego źródła (CSAMT/IP)

Podstawowy układ pomiarowy zastosowany przy pomiarze metodą CSAMT/IP dla odbiornika sygnału składać się będzie z 3 dipoli elektrycznych Ex ułożonych w linii profilu, oraz czujnika magnetycznego zlokalizowanego w pobliżu środka linii dipoli elektrycznych (tylko w przypadku CSAMT). Długość dipoli wynosić będzie 25 - 100 m. Źródłem fali elektromagnetycznej będzie układ nadawczy zbudowany z dwóch grup elektrod stalowych. Długość dipola prądowego zależna będzie od przyjętej metodyki prac i wynosić może od kilkudziesięciu metrów (pomiary IP układem dipol-dipol) do kilku kilometrów (pomiary CSAMT). Grupy elektrod podłączone będą do transmitera (nadajnika). Transmiter zasilany będzie prądnicą. Przebiegi czasowe zapisywane będą na karcie pamięci zainstalowanej w sterowniku nadajnika podłączonym do transmitera. Czas rejestracji oraz częstotliwości próbkowania pola elektromagnetycznego na pojedynczym punkcie pomiarowym zostanie ustalony zostanie w trakcie prac polowych. Synchronizacja sygnału pomiędzy układem prądowym i pomiarowym odbywać się będzie z użyciem urządzeń GPS. Punkty pomiarowe lokalizowane będą wg mapy topograficznej. Dla każdego punktu pomiarowego wykonany będzie szkic sytuacyjny układu nadawczego i pomiarowego z domiarami do charakterystycznych punktów terenu.

Pomiary metodą 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 podłączoną 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 kilometra, 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 odbywać się będzie w dwóch etapach. Etap pierwszy to tzw. pre-processing obejmujący także kontrolę jakości i wykonywany będzie bezpośrednio w trakcie prac polowych. W etapie drugim, właściwym, 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 sondowań MT/AMT możliwe będzie także modelowanie 3D pozwalające na przestrzenną analizę zmienności oporności w ośrodku geologicznym.

Metodyka monitoringu elektrooporowego

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

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

W rejonie każdego otworu zatłaczającego przewiduje się wykonanie badań metodą tomografii elektrooporowej. Przewiduje się wykonanie 10 równoległych profili o długości 1000 m, odległych od siebie o 100 m. Badania takie powinny objąć 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 metodą tomografii pasywnej (GIG)

(Grzegorz Mutke, Józef Dubiński, Henryk Marcak, Adam Lurka, Krystyna Stec, Jarosław Chećko, Robert Siata, Jacek Chodacki)

Metoda sejsmologiczna może służyć przede wszystkim do badania zjawisk mikrosejsmicznych wywoływanych pękaniem skał na skutek wtłaczania CO_2. 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 zainstalowana na stałe sieć sejsmologiczną mogą być interpretowane w celu śledzenia rozprzestrzeniania się plamy CO_2 oraz potencjalnych dróg migracji w nadkładzie stanowiącym izolacje. Niezależnie od zjawisk parasejsmicznych sieć 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 - jura dolna). Wykazuje on tendencje 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 północnowschodnich partiach antykliny Budziszewic (do 98 m). Poziom ten ulega znacznemu ścienieniu na południowo-zachodnim skłonie struktury (do około 35 m), co stanowi wartość wyraźnie niższa od zakładanej dla poziomów uszczelniających.

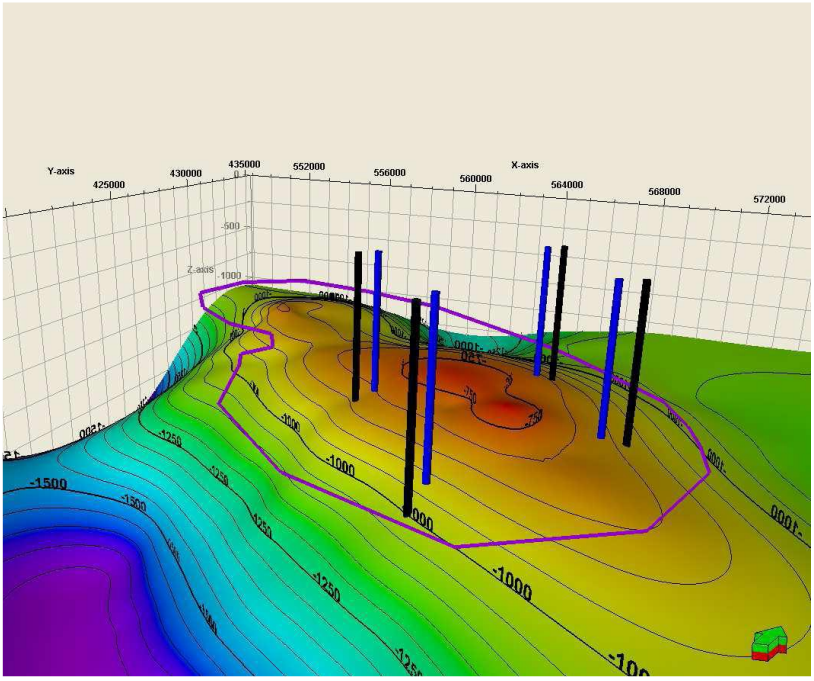


Fig.1.1.18_3 Rozmieszczenie otworów do zatłaczania (czarne) oraz otworów monitorujących (niebieskie) na tle stropu utworów kolektora (jura dolna - synemur); głębokości od poziomu morza

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 (**Fig.1.1.18_3**), czyli generalnie w kierunku modelowego rozprzestrzeniania się chmury. Otwory monitorujące dla struktury Budziszewice-Zaosie w jurze dolnej - synemur, nie będą przekraczały głębokości 1000 metrów poniżej poziomu morza.

Sieć sejsmologiczna

Budowa sieci sejsmologicznej jest jednorazowym wydatkiem na cały czas trwania procesu zatłaczania oraz na monitoring w czasie po likwidacji zbiornika (w przypadku analizowanej struktury to około 50 lat). Sieć 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 czasowanie odebranych sygnałów przy wspólnej podstawie czasu, co pozwala w dalszej kolejności na interpretację zjawisk sejsmicznych (lokalizacja, magnituda, spadek naprężeń, 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 na stałe umieszczone pod powierzchnia (sondy pomiarowe w płytkich otworach 20-30 m, co zmniejszy szumy w porównaniu do lokalizacji czujników na powierzchni) oraz w otworach głębokich, najlepiej na głębokości zbliżonej do poziomu zatłaczania oraz na głębokościach pośrednich miedzy powierzchnia i poziomem zatłaczania. Do tego celu można wykorzystać otwory monitorujące dla procesu zatłaczania. 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 zatłaczania mediów do zbiorników, montowanych w otworach wiertniczych na stałe, można znaleźć kilka firm oferujących taki produkt. Mona tutaj przykładowo wymienić produkty Terrascience System Ltd, pracujące na strukturze Violet Grove w Albercie, Canada, 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 na stałe umieszczone pod powierzchnią (sondy pomiarowe w płytkich otworach 20-30 m, co zmniejszy szumy w

porównaniu do lokalizacji czujników na powierzchni) oraz w otworach głębokich, najlepiej na głębokości zbliżonej do poziomu zatłaczania oraz na głębokościach pośrednich miedzy powierzchnią i poziomem zatłaczania. Do tego celu można wykorzystać otwory monitorujące dla procesu zatłaczania. Warunkiem takiego rozwiązania jest jednak podjęcie decyzji o budowie przestrzennej sieci sejsmologicznej na etapie wiercenia otworów, gdy jest to odpowiedni moment na ich zamontowanie.

Sieć sejsmologiczna może być również wykorzystana do monitorowania sejsmiczności nie związanej z procesem zatłaczania CO_2. W strefach naturalnej aktywności sejsmicznej są to trzęsienia 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 górnicza (GZW, LGOM, Bełchatów) mogą również sporadycznie osiągać intensywność rzędu 5-7, szczególnie w rejonie epicentralnym. Jeżeli ogniska takich wstrząsów lokalizowane są na płaszczyznach uskokowych w rejonie planowanego zbiornika CO_2, to w ich efekcie następuje pękanie skał w źródle wstrząsu, co może stanowić potencjalną drogę wycieku CO_2. Monitorowanie sejsmiczności pozwala na ocenę ryzyka sejsmicznego w obszarze składowania CO_2 i zastosowanie wyprzedzająco profilaktyki.

Monitorowanie aktywności sejsmicznej w trakcie procesu składowania CO_2

W zbiornikach CO_2 o niskiej porowatości oraz przy dużych ciśnieniach wtłaczania, można oczekiwać występowania aktywności sejsmicznej. W takiej sytuacji prowadzenie stałego monitoringu sejsmologicznego może dać bardzo duże korzyści. Zarejestrowane zjawiska sejsmiczne są niecenionym i praktycznie darmowym źródłem fal sejsmicznych. Sejsmika prospekcyjna wymaga wykonania drogich strzelań i pomiarów 'in situ' aby uzyskać dane do interpretacji. Tutaj wstrząsy indukują się przy okazji samego procesu składowania CO_2.

Zastosowanie algorytmów do przestrzennej lokalizacji ognisk wstrząsów pozwala na śledzenie rozprzestrzeniania się i dróg migracji CO_2. Zarejestrowane procesy pękania skały na skutek wtłaczania CO_2 pod dużym ciśnieniem, pozwalają równie na oszacowanie jakości skał zbiornikowych. W tym celu mona wykorzystać analizy parametrów źródła drgań, takie jak spadek naprężeń, naprężenia pozorne, aktywność sejsmiczna, moment sejsmiczny, przemieszczenie w ognisku, promień ogniska. Przykładowo duże spadki naprężeń będą świadczyły, że aktualnie wtłaczamy w gorszym fragmencie zbiornika. W połączeniu z tomografią pasywną również wykorzystującą do obliczeń naturalne „darmowe" zjawiska sejsmiczne, metoda sejsmologiczna daje dużo szersze i bardziej wiarygodne badania masywu skalnego i samego procesu zatłaczania do niego CO_2.

Możliwości zastosowania tomografii pasywnej do diagnostyki zmian w strukturach geologicznych w czasie procesu składowania CO_2

Wykorzystując naturalne zjawiska dynamiczne wywoływane tworzeniem się nowych szczelin podczas procesu zatłaczania CO_2 zarejestrowane przez przestrzenną sieć sejsmologiczną, można wykonywać obliczenia pola prędkości fal sejsmicznych metodą tzw. tomografii pasywnej. Metoda ta polega na ocenie i analizie pola prędkości fali podłużnej w przesuwającym się oknie czasowym. Technika taka pozwala na

śledzenie zmian pola prędkości i korelowanie ich ze zmianami zachodzącymi w rejonie zatłaczania CO_2 oraz w nadkładzie. Może to pozwolić również na śledzenie migracji i geometrii zatłoczonego CO_2, o ile obrazy tomograficzne liczone będą w kolejnych oknach czasowych ukazując zmiany w czasie (tomografia pasywna 4D). Metoda wymaga oczywiście zainstalowania stałej sieci sejsmologicznej w rejonie zbiornika i zastosowania odpowiednich programów do tomografii pasywnej w wersji z krzywoliniowym promieniem. Opracowywanie kolejnych obrazów tomograficznych mogłoby się odbywać z dużą częstotliwością, nie wymagałoby dużych nakładów finansowych i byłoby zdecydowanie tańsze od sejsmiki 3D i 4D. Niewątpliwie zastosowanie tomografii pasywnej byłoby dużym przełomem w monitorowaniu procesu zatłaczania CO_2, zarówno pod względem jakości wyników jak i obniżenia kosztów. Warunkiem zastosowania tej metody jest jednak występowanie zjawisk sejsmicznych w trakcie zatłaczania. Eksploatacja węglowodorów jak równie hydroszczelinowanie skał wskazują, że należy spodziewać się występowania aktywności sejsmicznej dla tych procesów (Baria i inni 2006). Również zatłaczanie CO_2 powinno wywoływać powstawanie efektów dynamicznych związanych z spękaniem masywu skalnego podczas tego procesu. Niezależnie od naturalnych zjawisk dynamicznych stanowiących źródła fal sejsmicznych do tomografii pasywnej, można wspomóc się wytwarzaniem ich przy pomocy źródeł sztucznych (wibratory lub strzelania MW - podobnie jak to się robi w sejsmice prospekcyjnej). Przewagą systemu sejsmologicznego zamontowanego na stałe jest w takim przypadku przestrzenne rozmieszczenie czujników drgań (lepsza dokładność i wiarygodność odwzorowania pola prędkości) oraz niższe koszty. Tomografia pasywna wydaje się w tej chwili jedna z najbardziej obiecujących metod śledzenia spękań w masywie skalnym oraz śledzenia rozwoju chmury zatłaczanego CO_2 oraz wykrywania dróg migracji CO_2.

Opis sieci sejsmologicznej dla struktury Budziszewice-Zaosie

W kolektory struktury Budziszewice-Zaosie planuje się wtłaczać czterema otworami 1.8 mln ton CO_2 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 drgań 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 trójskładnikowych czujników drgań w otworze monitorującym 1' (**Fig. 1.1.18_4**). Pięć czujników należałoby 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 płytkich otworach (30-50m). Połączone wspólnym czasem (GPS) geofony w otworze monitorującym oraz geofony przypowierzchniowe, pozwolą na pseudo-ciagłą obserwację mikrosejsmologiczną podczas zatłaczania CO2, wykonywania 4D obrazów tomograficznych (w przypadku znaczącej aktywności sejsmicznej - metodą tomografii pasywnej, a w przypadku słabej aktywności sejsmicznej - metodą tomografii aktywnej (wykonanie strzelań ładunkami MW lub metodą wibracji). Z pomiarami mikrosejsmologicznymi oraz pasywną tomografią w zaproponowanej geometrii sieci geofonowej, można 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_2. Ze względu na długoletnie wtłaczanie CO_2 do zbiornika Budziszewice-Zaosie (planowane 25 lat) i obowiązek monitorowania po zamknięciu składowiska przez kolejne 20-30 lat, rozwiązanie z geofonami zainstalowanymi na stałe wydaje się być najlepsze i najtańsze.

Etap II

Proponuje się zainstalować w czterech otworach monitorujących po 12 trójskładnikowych czujników drgań. Odległości miedzy 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 duo 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.

Fig. **1.1.18_4** Widok sondy geofonowej do otworów SLIMWAVETM produkcji firmy SERCEL

Przykładowy sprzęt (parametry sprzętu) opisane są na bazie produktów firmy SERCEL, która prowadzi wiele projektów monitorowania sejsmiczności podczas zatłaczania mediów do skał.

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 ¼ 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 (drgania) o wybranym poziomie amplitudowym, a próbkowanie sygnału jest skorelowane z czasem bezwzględnym z GPS. Na **Fig.1.1.18_4** przedstawiono widok sond SLIMWAVETM - 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 trójskładnikowa firmy GeoSig (takie sondy pracują w Górnośląskiej Regionalnej Sieci Sejsmologicznej GIG). Sygnał z przypisanym czasem bezwzględnym GPS przesyłany jest przez modem komórkowy do aparatury rejestrującej wstrząsy.

W efekcie naturalnej sejsmiczności podczas procesu zatłaczania CO_2 oraz ewentualnie sztucznych źródeł drgań ładunkami MW lub metodą wibracyjną, 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 pękania skały kolektora podczas zatłaczania CO_2, uzyskania obrazów pola prędkości z tomografii pasywne lub aktywnej 3D i 4D (przekroje pionowe i na wybranych horyzontach w poziomie w celu śledzenia rozwoju chmury CO_2), jak równie 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.

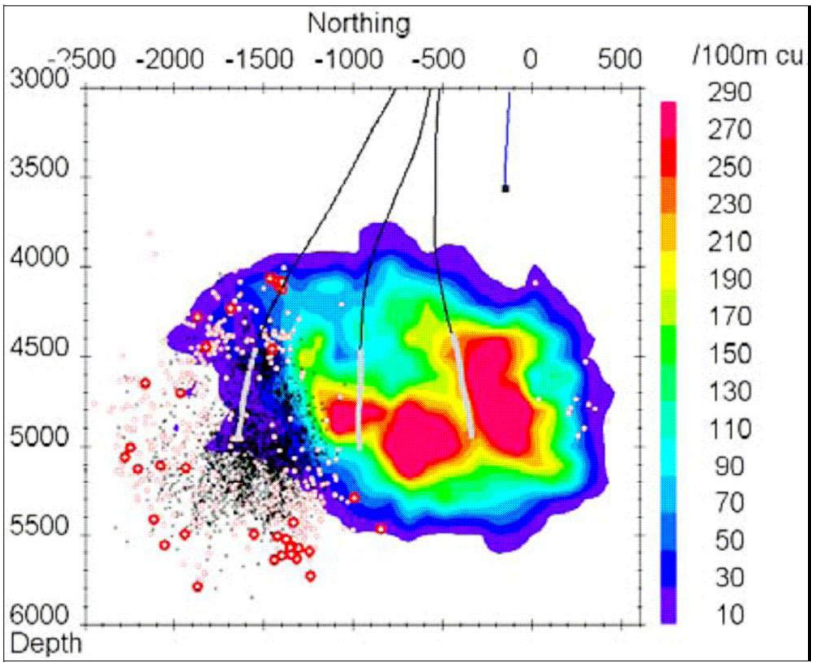


Fig.1.1.18_5 Przykład lokalizacji zjawisk sejsmicznych podczas wiercenia studni w celach geotermalnych (Baria i in. 2006)

Na **Fig.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_2, o ile jest zarejestrowana przez odpowiednią sieć geofonów zainstalowanych na stałe.

Należy mocno podkreślić, że żadne inne rozwiązanie sprzętowe ani założenie stałej sieci geofonów w otworach i przy powierzchni, nie zapewni możliwości ciągłego monitorowania zjawisk sejsmicznych podczas zatłaczania CO_2 oraz nie pozwoli na wykonywanie pasywnej tomografii. Przy niskiej porowatości zbiorników w Polsce, z bardzo dużym prawdopodobieństwem należy oczekiwać aktywności sejsmicznej podczas zatłaczania CO_2, co może znacznie poprawić jakość wyników monitorowania rozprzestrzeniania się plamy CO_2, a równocześnie obniżyć koszty 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_2. Stacjonarna sieć sejsmologiczna jest w stanie rejestrować zjawiska sejsmiczne związane z pękaniem skał o niskiej porowatości w trakcie wtłaczania CO_2. Metoda ta pozwala na lokalizację pęknięć, a tym samym na śledzenie chmury wtłaczanego CO_2 oraz położenia i kierunku ewentualnych dróg przecieku.

Wykorzystując naturalne zjawiska dynamiczne wywoływane tworzeniem się nowych szczelin podczas procesu zatłaczania CO_2 zarejestrowane przez przestrzenną sieć sejsmologiczną, można również wykonywać obliczenia pola prędkości fal sejsmicznych metoda tzw. tomografii pasywnej (prześwietlenie masywu skalnego). Technika taka pozwala na śledzenie zmian pola prędkości i korelowanie ich ze zmianami zachodzącymi w rejonie zatłaczania CO_2 oraz w nadkładzie.

Sieć sejsmologiczna może być równie wykorzystana do monitorowania sejsmiczności niezwiązanej z procesem zatłaczania CO_2. W strefach naturalnej aktywności sejsmicznej są to trzęsienia Ziemi natomiast w strefach prowadzenia działalności górniczej są to wstrząsy górotworu indukowane procesem eksploatacji oraz warunkami lokalnej tektoniki. Korzyścią zastosowania tej metody byłoby równie ograniczenie ilości drogich pomiarów sejsmicznych 2D, 3D i 4D.

Monitoring mikrobiologiczny i stężenia CO2 w powietrzu podglebowym (IGSMiE PAN)

(Barbara Uliasz-Misiak, Radosław Tarkowski, Sylwester Marek, Lidia Dziewińska)

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 - przewiduje się że analogiczne prace będą też 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 doświadczenia i wyniki badań wykonanych przez Zakład Geotechnologii IGSMiE PAN w ramach prac statutowych i projektów badawczych (Tarkowski i in., 2008a,b; www.co2sink.org), jak również na podstawie dostępnej literatury.

Program monitoringu powierzchniowego CO2 dla składowiska

Jednym z elementów monitoringu geologicznego składowania dwutlenku węgla są badania powierzchniowe. W ich zakres wchodzą 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_2 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 wskazywał 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 włączając w to 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 składowania 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_2 w pobliżu otworu zatłaczającego,
- sezonowe powierzchniowe badania geochemiczne zawartości CO_2 na terenie składowiska w obszarze I,
- badania geochemiczne rozkładu stężeń CO_2 do głębokości 5 m w wybranych punktach,
- ciągłe pomiary zawartości CO_2 w powietrzu podglebowym w zastabilizowanych punktach pomiarowych.

Na etapie monitorowania poziomu odniesienia badania te mają na celu ustalenie tła zawartości CO_2 w powietrzu podglebowym oraz jego zmian sezonowych i rozkładu głębokościowego dla składowiska z obszaru I. Posłużą 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. Miąższość utworów zbiornikowych jest zmienna -największe miąższości obserwujemy na skrzydłach antykliny (67 m - Buków l 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. Miąższość formacji ciechocińskiej 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, przykrywając płaszczem o zmiennej miąższości, od kilku do kilkudziesięciu metrów, starsze piętra wodonośne mezozoiku zapadające pod niewielkim kątem w kierunku NW. Warstwę wodonośną budują piaski i żwiry, zalegające w różnym położeniu w stosunku do glin zwałowych (na glinach, między glinami, pod glinami) zlodowacenia środkowopolskiego. 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^3/h. (Wójcicki (red.), 2009).

Metodyka pomiarów zawartości CO_2 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 zatłaczającego (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. Część 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_2 będą rozmieszczone w siatce

podstawowej 200 x 200 m. Obszar składowiska, na którym wykonywane będą pomiary koncentracji CO_2 w powietrzu glebowym jest zlokalizowany w okolicach Ujazdu, Niewiadowa i Józefowa i ma powierzchnię około 15 km^2. Na obszarze tym przewidziano 358 podstawowych punktów pomiarowych (Fig. **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 składowiska przewidziano 59 punktów pomiarowych do badań sezonowych (**Fig.1.1.18_7**). Rozkład zawartości CO_2 w powietrzu glebowym proponuje się badać dokładniej w pobliżu otworu zatłaczającego. Punkty będą lokalizowane w odległości 25 m; przewiduje się, że punktów tych będzie 80 (**Fig.1.1.18_8**). Punkty, w których będzie prowadzony ciągły pomiar zawartości dwutlenku węgla w powietrzu glebowym zostaną zlokalizowane w pobliżu otworu zatłaczającego i obserwacyjnych. Dokładna lokalizacja tych punktów będzie możliwa po sporządzeniu planu zagospodarowania otoczenia poszczególnych otworów.

Powierzchniowe pomiary geochemiczne (zdjęcie zawartości CO_2 oraz zmiany sezonowe) będą prowadzone na głębokości do 1 m w punktach pomiarowych przewidzianych dla poszczególnych typów badań. Zawartość CO_2 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 (**Fig.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 l, 2, 3, 4 m. Oznaczenie stężenia będzie wykonywane detektorem X-am 7000 firmy Drager. Miernik ten jest wyposażony w sensor CO_2 działający na zasadzie absorpcji promieniowania podczerwonego techniką NDIR (*Non-dispersive Infrared*) o zakresie pomiarowym 0-100% obj. gazu.

Instalacja ciągłego pomiaru zawartości i rejestracji dwutlenku węgla w powietrzu glebowym będzie składała się z przetworników (liczba zostanie ustalona na etapie projektowania prac), źródła zasilania, skanera pomiarowego oraz komputera. Przetworniki umieszczone będą w rurach PCV o średnicy 100 mm; na głębokości 110 cm, w dolnej części będą one sperforowane: zasilane napięciem 24 V DC, z zasilacza napięcia stałego.

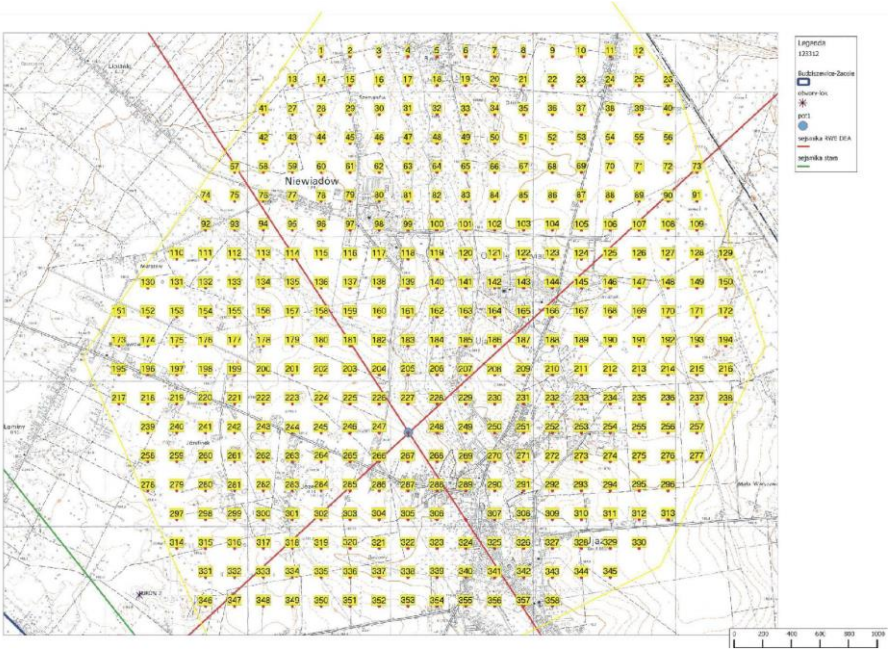


Fig.1.1.18_6 Lokalizacja punktów pomiarowych zawartości dwutlenku węgla w powietrzu podglebowym na składowisku na obszarze I

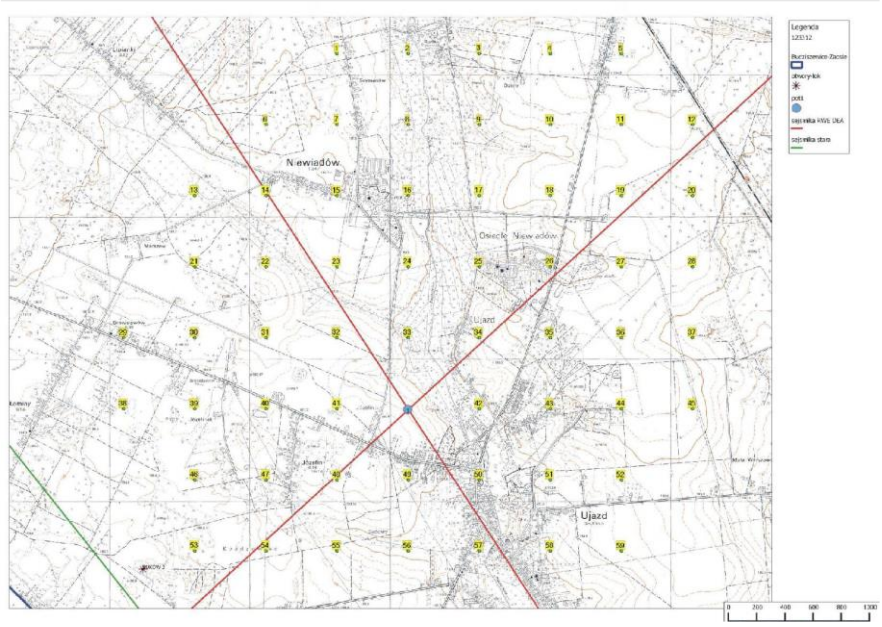


Fig.1.1.18_7 Lokalizacja punktów pomiarów sezonowych zawartości dwutlenku węgla w powietrzu podglebowym na składowisku na obszarze I

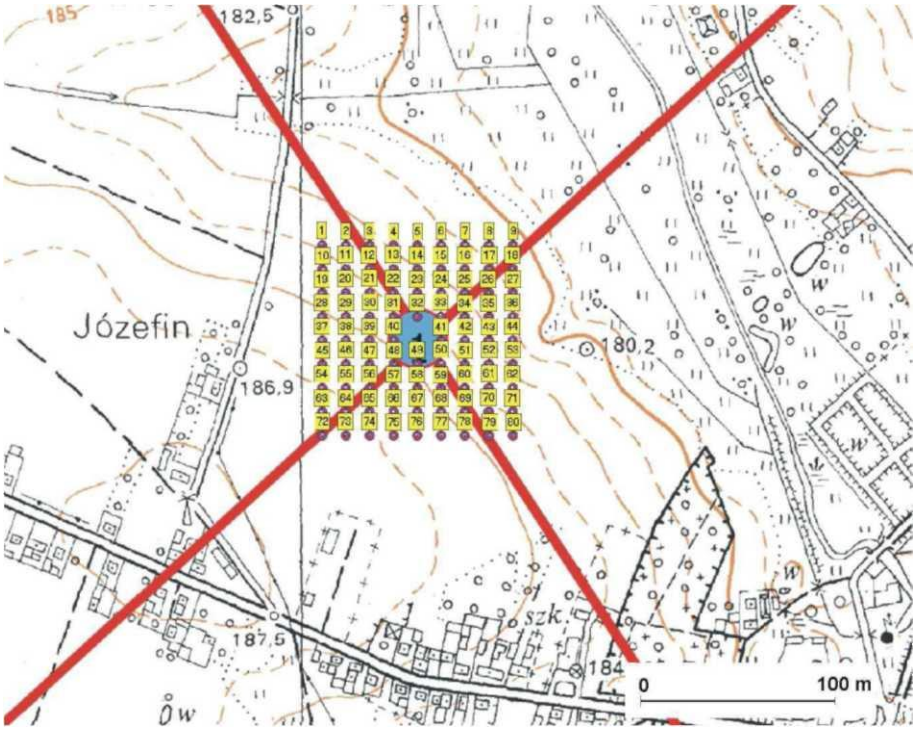


Fig. 1.1.18_8 Lokalizacja punktów pomiarowych zawartości dwutlenku węgla w powietrzu podglebowym wokół otworu zatłaczającego

Skaner pomiarowy, zlokalizowany w oddzielnej skrzynce pomiarowej, połączony będzie kablami sygnałowymi z przetwornikami CO_2 ułożonymi 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.

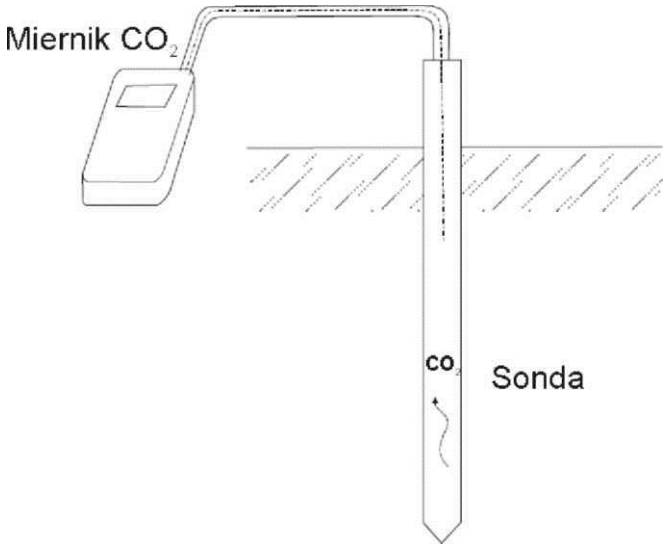


Fig. **1.1.18_9** Schemat pomiarów zawartości dwutlenku węgla w powietrzu podglebowym

Harmonogram pomiarów stężenia CO_2 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**):

- szczegółowe zdjęcie 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 stężeń CO_2 do głębokości 5 m w wybranych punktach - 2 razy w roku (sezon ciepły i chłodny),
- ciągłe pomiary zawartości CO_2 w powietrzu glebowym w zastabilizowanych punktach pomiarowych.

W trakcie eksploatacji składowiska CO_2 obszaru I proponuje się wykonanie następujących badań geochemicznych zawartości dwutlenku węgla:

- szczegółowe zdjęcie 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,
- ciągłe pomiary zawartości CO_2 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),
- ciągłe pomiary zawartości CO_2 w powietrzu podglebowym w zastabilizowanych punktach pomiarowych.

Fig.1.1.18_10 System pomiaru strumienia CO_2 urządzeniem LI-8100 (http://www.licor. com/ env/)

Metodyka pomiarów strumienia CO_2

Pomiary naturalnego strumienia dwutlenku węgla prowadzi się przy wykorzystaniu zamkniętej komory. Strumień dwutlenku węgla mierzy się przy wykorzystaniu systemu pomiarowego złożonego z jednostki pomiarowej i jednej lub kilku komór pomiarowych oraz komputera (palmtopa) rejestrującego wyniki. System ten oprócz pomiarów strumienia dwutlenku węgla 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 węgla jednorazowych i długoterminowych (**Fig.1.1.18_10**). Zawierają 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 węgla może być również wykonany w oparciu o miernik wielogazowy z czujnikami na podczerwień (**Fig.1.1.18_11**).

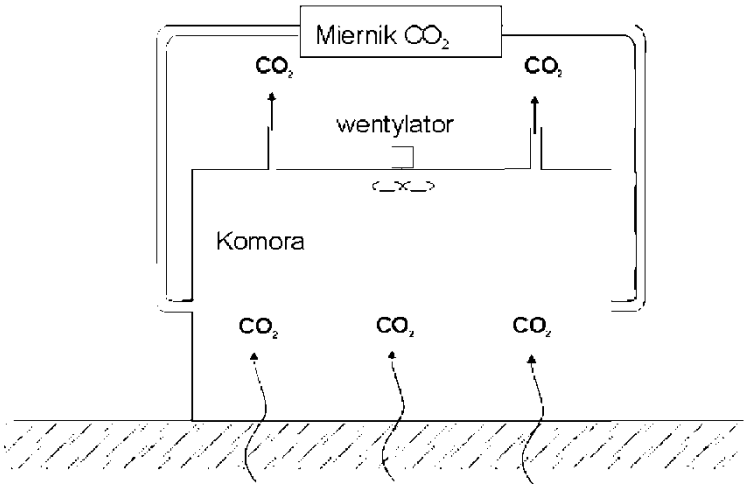


Fig.1.1.18_11 Schemat komory do pomiaru strumienia dwutlenku węgla (Żak i in., 2002)

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

Planowane punkty pomiarowe strumienia CO_2 będą rozmieszczone w siatce podstawowej o rozmiarach około 400 x 400 m (**Fig.1.1.18_12**). Przy otworze zatłaczającym 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. **Fig. 1.1.18_8**).

W każdym punkcie pomiary strumienia CO_2 powinny być wykonywane przez około 10 minut przy wykorzystaniu systemu automatycznego pomiaru LI-8100. Wokół otworów można również prowadzić ciągły pomiar strumienia dwutlenku węgla przy wykorzystaniu systemu firmy LI-COR Inc. Lokalizację punktów pomiarowych powinno się ustalić w terenie za pomocą urządzeń nawigacji satelitarnej GPS. Część punktów pomiarowych ze względu na występowanie trwałej nawierzchni, przeszkód terenowych może być przesunięte o niewielką odległość w stosunku do planowanej.

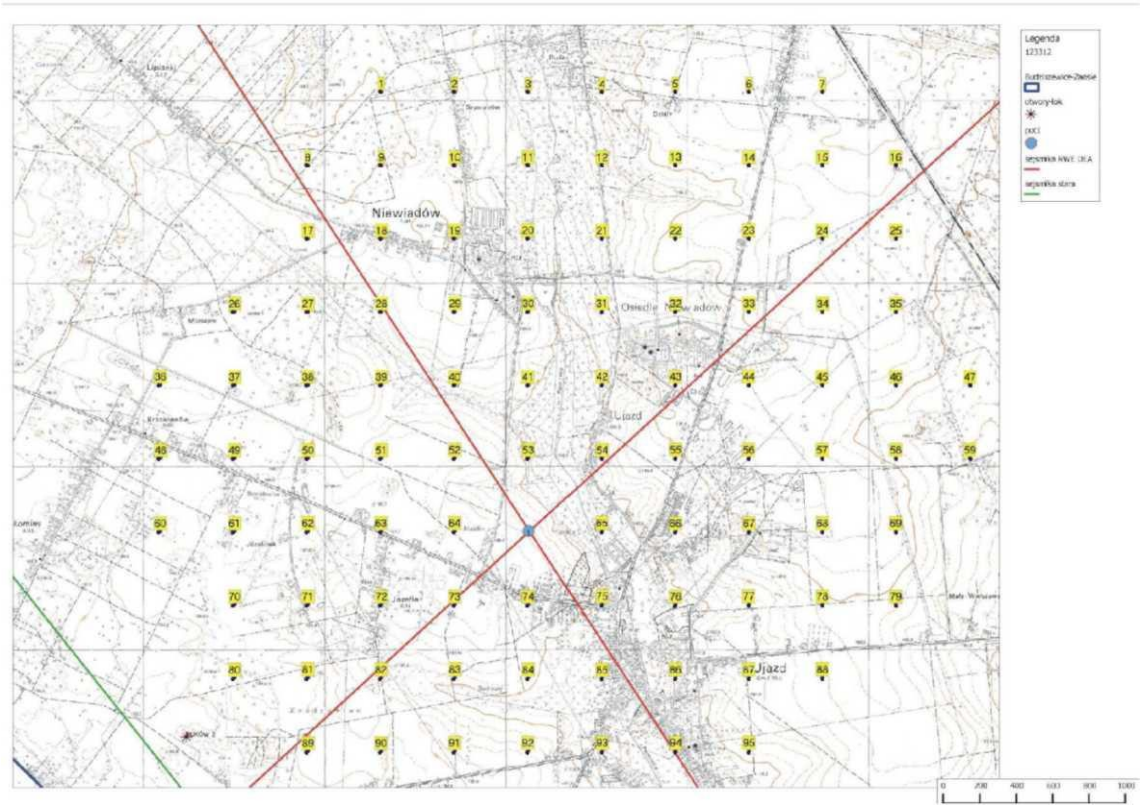


Fig.1.1.18_13 Lokalizacja punktów pomiarowych strumienia powierzchniowego dwutlenku węgla w powietrzu podglebowym i poboru próbek do badań biomonitoringu na składowisku

Harmonogram pomiarów strumienia CO_2

Pomiar strumienia dwutlenku węgla 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 węgla (Tab. **1.1.18_1**):

- badania tła strumienia dwutlenku węgla w siatce podstawowej na terenie składowiska - 4 razy w roku,
- badania tła strumienia dwutlenku węgla w pobliżu otworu zatłaczającego - 4 razy w roku,
- ciągłe pomiary strumienia dwutlenku węgla w pobliżu otworów.

W trakcie eksploatacji składowiska obszaru I proponuje się wykonanie następujących badań strumienia dwutlenku węgla:

- badania strumienia dwutlenku węgla w siatce podstawowej na terenie składowiska - 2 razy w roku (sezon ciepły i zimny),
- badania strumienia dwutlenku węgla w pobliżu otworu zatłaczającego - 4 razy w roku,

- ciągłe pomiary strumienia dwutlenku węgla w pobliżu otworów.

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

- badania tła strumienia dwutlenku węgla w pobliżu otworu zatłaczającego - 4 razy w roku,
- ciągłe pomiary strumienia dwutlenku węgla w pobliżu otworów.

Program biomonitoringu dla składowiska w obszarze l (rejon Bełchatowa)

Biomonitoring oparty będzie na badaniu zmian ilościowych wskaźnikowych mikroorganizmów i procesów życiowych będących wynikiem zmiany podaży dwutlenku węgla w środowisku glebowym wywołanej wyciekiem tego gazu z podziemnego składowiska.

Próby gruntowe pobierane z terenu składowiska CO_2 stanowią materiał do badań mikrobiologicznych wykonywanych w ramach prac monitoringowych. Przy poborze próbek należy uwzględnić odpowiednią lokalizację punktów i głębokość poboru oraz zachowania jałowości 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, dostępności poszczególnych punktów poboru próbek), lokalizacji otworu zatłaczającego, geologii struktury, w tym prawdopodobnego przebiegu uskoków.

W celu uzyskania pełnej informacji o mikroflorze występującej na danym terenie, w środowisku gruntowym, próbki powinno się pobierać ze stałej głębokości (60-80 cm). Zróżnicowanie mikroflory w zależności od głębokości bytowania jest znaczne, gdyż 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.

Tab.1.1.18_1 Harmonogram pomiarów zawartości CO2 w powietrzu podglebowym, strumienia i biomonitoringu na składowisku na obszarze I

Metoda badań		**Poziom odniesienia**	**Eksploatacja składowiska**	**Po zamknięciu składowiska**
Pomiar koncentracji CO_2	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	badania w siatce podstawowej	4 razy w roku	2 razy w roku	-

CO_2	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 1 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 prowadzić przez 2 lata lub do momentu rozpoczęcia eksploatacji składowiska dwutlenku węgla.

Monitoring mikrobiologiczny w czasie eksploatacji składowiska dwutlenku węgla i po jej zakończeniu prowadzić się będzie poprzez badania zmian ilościowych bakterii i procesów wskaźnikowych na obszarze składowiska. Badania mikroorganizmów wskaźnikowych należy prowadzić czterokrotnie w ciągu roku przez cały czas trwania zatłaczania dwutlenku węgla.

Pobór próbek będzie wykonany na obszarze całego składowiska w siatce o rozmiarach około 400 x 400 m (por. **Fig.1.1.18_13**). Próbki pobierane będą z głębokości 80 cm p.p.t. za pomocą świdra ręcznego 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)

(Halina Jędrzejowska-Tyczkowska, Irena Irlik)

Sejsmika 4D zrodziła się na gruncie potrzeb przemysłu naftowego. Poniższą informację opracowano na podstawie wykładu i materiałów kursu pt. „4D Reservoir Management" przedstawionych przez Johna R. Waggonera - konsultanta do spraw złożowych firmy Schlumberger z Houston w Teksasie (Waggoner, 2009).

Sejsmika 4D w wielu potężnych kampaniach naftowych stała się integralną częścią zagospodarowania i monitorowania eksploatacji złoża, szczególnie na Morzu Północnym, gdzie umożliwiła po wielokroć przekroczyć oczekiwania i wyzwania ekonomiczne stawiane zarówno geofizykom, jak i inżynierom złożowym. Idea sejsmiki 4D jest niezwykle prosta - wykonać dwa (lub więcej) razy pomiary sejsmiki 3D w tym samym miejscu; obserwować różnice zapisów i interpretować je w sensie zmienności położenia płynów złożowych, nasycenia i poziomu wody podścielającej; również korzystać z porównania wyników w otworach.

Przygotowanie do prostego pozornie pomiaru wymaga:

- określenia charakterystyki złoża; zrozumienia problemów ujawnionych na podstawie symulacji złożowej (ciśnienia i nasycenia);
- 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 „zmiana zapisu - zmiana właściwości zbiornikowych" (**Fig.1.1.18_14**).

Wybrane elementy technologii „sejsmika 4D" w aspekcie potrzeb podziemnego magazynowania dwutlenku węgla

Charakteryzując technologię sejsmiki 4D właściwie można napisać, że jest to po prostu sejsmika powierzchniowa 2D lub 3D. Jednakże celem, który zawsze determinuje jej zastosowanie jest obserwacja zmienności określonych właściwości ośrodka geologicznego lub wybranych parametrów.

Skala obserwowanej zmienności zależy oczywiście od rodzaju zjawiska, które zachodzi w ośrodku geologicznym. Rozpatrywanie sejsmiki 4D jako technologii monitoringu w podziemnych magazynach CO_2 musi być właśnie ukierunkowana na możliwości śledzenia zmienności zachowania się CO_2 zatłoczonego do składowiska.

W podtekście każdego celu cząstkowego 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.

Efektem 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 (głębokościowym) zmienić się muszą podstawowe parametry ośrodka geologicznego wpływające na tzw. twardość akustyczną (iloraz gęstości i prędkości propagacji fali sprężystej).

Bardzo obrazowo te zagadnienia przedstawił Rob Staples (i współautorzy), który z ramienia Europen Association of Geoscientist and Engeneers wygłosił w Krakowie, w październiku 2009 roku, wykład zatytułowany „An Introduction to Time-Lapse (4D) Seismic Monitoring" (Staples, 2009).

Poniżej przytoczono wybrane obrazy ze wzmiankowanej prezentacji, które objaśniają główny nurt metodyczny sejsmiki 4D (**Fig.1.1.18_14**) i podkreślają te elementy technologii, które mogą być zaimplementowane wprost do monitoringu podziemnych magazynów CO_2.

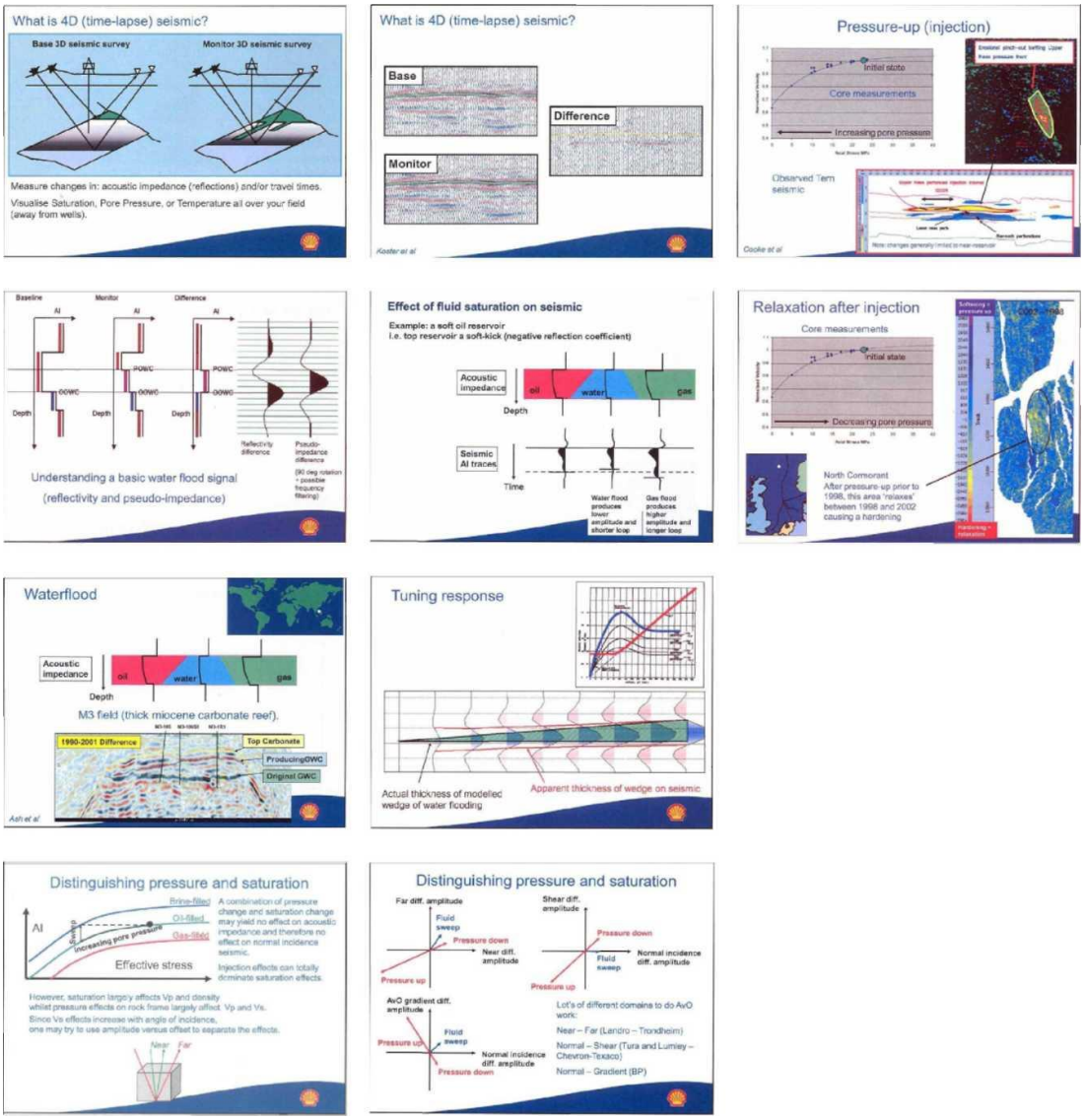


Fig.1.1.18_14 Idea sejsmiki 4D i jej zastosowania do monitoringu geologicznego składowania CO_2 (Staples, 2009); wiąże się to ze śledzeniem zmian impedancji akustycznej ośrodka porowego oraz prędkości podłużnych i poprzecznych fal sejsmicznych (wielkości te obrazują m.in. nasycenie i ciśnienie panujące w kolektorze)

Charakterystyka obiektów geologicznych z uwagi na efektywność monitoringu z zastosowaniem technologii sejsmiki 4D

Przedstawiony powyżej przegląd zadań wchodzących w skład „sejsmiki 4D" pokazuje, że jest to technologia co najmniej tak samo kosztochłonna jak standardowa sejsmiki 3D (w warunkach polskich średni projekt sejsmiki 3D - akwizycja-przetwarzanie-interpretacja - kosztuje kilkanaście milionów złotych, a więc to koszt porównywalny z wybudowaniem 20,40 domów jednorodzinnych).

Dlatego decyzja o uruchomieniu projektu sejsmiki 4D musi być poprzedzona dwoma ważnymi etapami:

1. Oceną technicznego ryzyka projektu (Formularz D.E. Lumley'a; Lumley et al., 1997),
2. Studium wykonalności.

Do chwili obecnej w Polsce nie przeprowadzono żadnego eksperymentu sejsmiki 4D, dlatego doświadczenia polskie są bardziej niż umiarkowane (Jędrzejowska-Tyczkowska H., i inni, 2004) i nie wykroczyły poza eksperymentalne studium wykonalności dla złoża BMB.

Odnośnie oceny ryzyka technicznego w skali międzynarodowej przyjęło się wykorzystywać tzw. Formularze Lumley'a (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 złożowych 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

- głębokości (preferowany płytki)
- ciśnienia w nakładzie (preferowane niskie)
- ciśnienia porowego (preferowane wysokie)
- temperatury (preferowana wysoka)
- miąższości (preferowana duża)

skały kolektorskiej

- modułu sprężystości (preferowany niski) skały nienasyconej
- gęstości skały nienasyconej (preferowany niski)

- porowatości

płynów nasycających

ropa - 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)

zmienności płynów w czasie (4D fluids)

- zmiana nasycenia (preferowana wysoka)
- różnica stopnia sprężenia (preferowana wysoka)

danych sejsmicznych

- częstotliwości dominującej (preferowana wysoka)
- średniej rozdzielczości (uwidocznienie warstwy cienkiej - 1/4 długości fali)
- jakości obrazu (w skali 1 do 5, najlepiej 5; stosunek sygnału do zakłócenia)
- powtarzalności (w skali 1 do 5, najlepiej 5)
- manifestacji kontaktu płynów w obrazie pola falowego (w skali 1 do 5, najlepiej 5)
- prognozowane zróżnicowanie hodografu (jako krotność kroku próbkowania > 4)
- prognozowane zróżnicowanie impedancji (w procentach > 4%)

Poniżej w tabeli **1.1.18_2** przytoczono dane do ewaluacji przydatności obiektów do efektywnej aplikacji sejsmiki 4D.

Tab.1.1.18_2 Eksperymentalne dane przyjmowane do kwalifikacji obiektów planowanych objęciem 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 - **3C w rejonie EC Bełchatów, typowanym jako składowisko dwutlenku węgla CO_2.**

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, gdyż 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 zadań o tak wygórowanych wskaźnikach technicznych, jak bezpieczne i bezterminowe monitorowanie składowisk CO_2 pomiar bazowy i kolejne monitorujące należy wykonać w metodyce sejsmiki 3D z możliwie gęstą siatką profili (np. DLL = DXL = 50 m).

Efektem końcowym musi być model prędkościowo-głębokościowy, a więc inwersja sejsmiczna będzie jedną z najważniejszych procedur badawczych. Bardzo wskazane byłoby wykonanie badań technologią 3C, szczególnie użyteczną, gdy płynem nasycającym jest gaz CO_2 (prawie dwukrotnie cięższy od powietrza). Ważnym elementem w programie monitoringu powinny być pomiary weryfikujące PPS (VSP - Vertical Seismic Profiline) w wersji Walk Away lub Azymuthal.

Krótka charakterystyka 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**).

Tab.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	N I E	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 hydrogeolo-giczna obszaru i zagadnień ochrony przyrody	X			

Istotne znaczenie posiadają parametry metodyczne akwizycji; dla sejsmiki 2D i 3D są nieco różne: Sejsmika 2D - krotność nominalna profilowania np. 60

- ilość kanałów aktywnych np. 240
- rozstaw np. środkowy
- odległość pomiędzy punktami odbioru np. D PO = 12.5 m
- odległość pomiędzy punktami wzbudzenia np. D PO = 25 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^2

- powierzchnia celu geologicznego np. 75 m^2
- krotność profilowania np. 24
- schemat obserwacji np. typowy prostokątny
- rozstaw czynny np. środkowy, 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 zdjęcia
- powierzchnia celu geolog. / powierzchnia op np. 0.75.

W typowych projektach sejsmicznych zazwyczaj wykonuje się prace eksperymentalne dla potwierdzenia słuszności zaproponowanej metodyki, oraz często dodatkowe badania np. strefy małych prędkości.

Ważnym 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 uszczegółowienie informacji o budowie ośrodka geologicznego.

Nie są to jednakże informacje dostateczne, aby przedstawić projekt badań sejsmicznych dla sejsmiki 4D, czy też dla wiarygodnych symulacji złożowych. W tych ostatnich zadaniach bardzo ważnym elementem posiadania możliwie dokładnego modelu geologicznego, który stanowi podstawę „studium wykonalności".

Gdzie i kiedy możemy powiedzieć, że realizacja projektu sejsmiki 4D przyniosła pozytywne efekty? Tam i wtedy, gdy pomierzone w zadeklarowanych odstępach czasowych pole sprężyste wykazuje zróżnicowane, dostateczne dla scharakteryzowania wywołujących je przyczyn.

Szacunki i prognozy jakościowe nie są wystarczające, aby wiarygodnie opisać proces zachodzący w ośrodku.

Oceny ilościowe różnych, 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, jaką metodyką, jaką aparaturą i przy aplikacji jakich parametrów - oczywiście dla określonego obiektu i procesu -jesteśmy w stanie te zmiany zarejestrować, zaobserwować i zinterpretować.

Dla realizacji tego celu niezbędne jest wysoko 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 doświadczeń 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 sekwestracja w konkretnych warunkach geologicznych;
- wyniki przetwarzania tych danych z uwzględnieniem standardów wysokiej rozdzielczości;
- przestrzenny model prędkości dla obszaru objętego monitorowaniem w domenie czasu i głębokości;
- przestrzenny model geologiczny (strukturalny i litofacjalną) dla obszaru objętego monitorowaniem;
- krzywe profilowania akustycznego oraz gęstościowego wykonane sondami o powtarzalnej kalibracji;
- wyniki badań laboratoryjnych na próbach skalnych, a przede wszystkim: porowatość, przepuszczalność, nasycenie, ciśnienie, gęstość, prędkość propagacji fal P i S.

Jak wspomniano już wcześniej, fundamentalną procedurą, która decyduje o poprawności przejścia z domeny czasu, w jakiej rejestrowane są dane sejsmiczne, do domeny głębokości, w jakiej odtwarzany jest model geologiczny jest tzw. inwersja sejsmiczna (Jędrzejowska-Tyczkowska H., 2009), stanowić 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 (Jędrzejowska-Tyczkowska H., 2003; Shanor G., et al., 2002).

Reasumując, wykonanie monitoringu z wykorzystaniem sejsmiki 4D musi zawierać następujące etapy (**Tab.1.1.18_4**):

Tab.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 kończący 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 zatłaczania CO_2 zostaną wykonane możliwie jak najszybciej i będą poligonem doświadczalnym dla przejścia do konkretnych działań w skali przemysłowej, potwierdzająca gotowość kadry naukowej i inżynieryjnej do realizacji zadań sekwestracji.

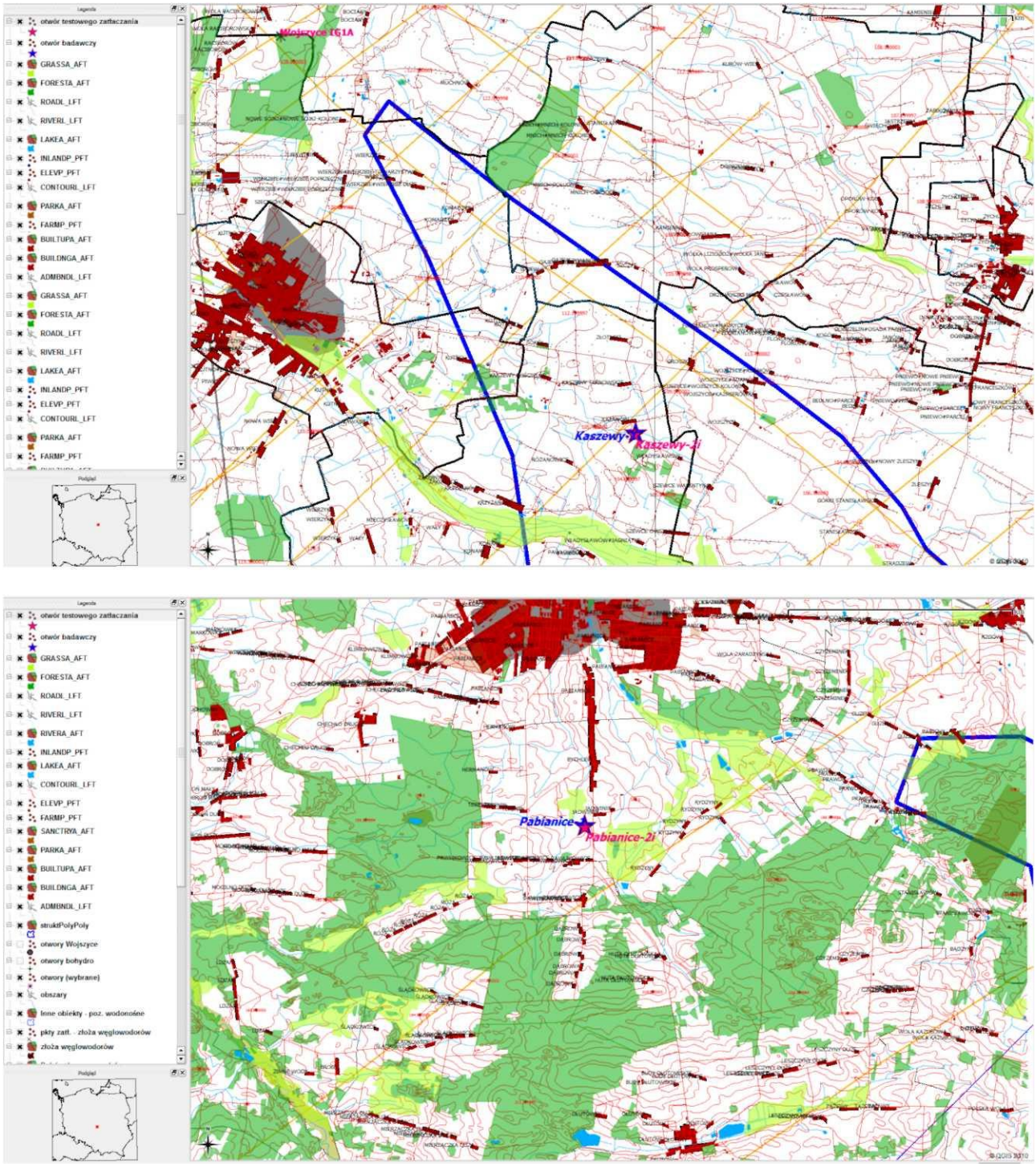


Fig.1.1.18_15 Lokalizacja otworów badawczych i planowanych do testowego (pilotowe) zatłaczania dla struktur rezerwowych Wojszyce (rejon Kutna, gmina Krzyżanów) i Lutomiersk-Tuszyn (rejon Pabianic, gmina Pabianice-wiejska)

Plany monitoringu testowego zatłaczania CO2 na jednej ze struktur rezerwowych (AGH & PIG-PIB)

(Stanisław Nagy)

(Adam Wójcicki)

W ramach tego zadania opracowano dwa projekty prac geologicznych (Modliński i in., 2009a,b) na wiercenia pilotowych (testowych) otworów zatłaczających (**Fig.1.1.18_16**) dla dwóch struktur rezerwowych (**Fig.1.1.18_15**), w sąsiedztwie otworów badawczych realizowanych już na zlecenie PGE Bełchatów (Nowak i in., 2009a,b). Jest to inicjatywa Ministerstwa Środowiska mająca na celu stworzenie polskiego odpowiednika „laboratorium" polowego w Ketzin, w ramach której zostanie wybrana jedna z tych dwóch lokalizacji, dla której zostanie zatłoczone około 20 tysięcy ton dwutlenku węgla i wykonane kompleksowe badania odnośnie detekcji, monitoringu i zachowania się dwutlenku 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 zakres głębokości) najbardziej zbliżony do tej jaką mamy na strukturze Budziszewice-Zaosie.

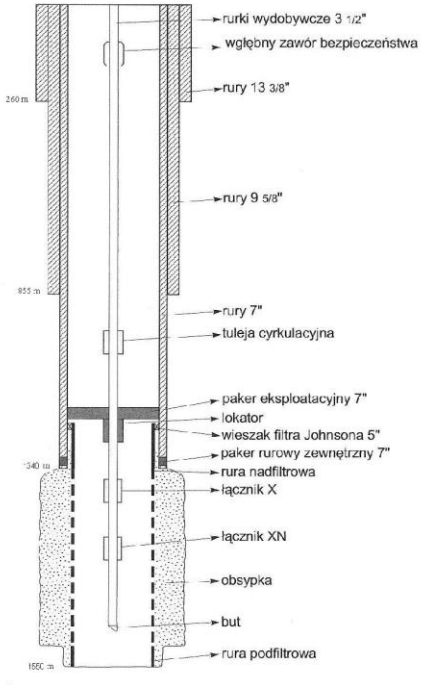


Fig.1.1.18_16 Schemat otworu do zatłaczania CO_2

Zakres i cel prac

- Określenie ciśnienia maksymalnego - na początku zatłaczania,
- Zatłoczenie markerów (np. gazowych, SF6),
- Testowanie metod geofizycznych: VSP, tomograficznych (cross well tomography) i innych - pokazujących zmiany nasycenia wokół odwiertu zatłaczania oraz zasięg zatłaczanego CO_2: tomografia otworowa, X-well tomography), sejsmika pasywna, VSPa,
- Przygotowania do technologii monitoringu wgłębnego,
- Określenie na podstawie danych z wiercenia własności przepuszczalności pionowych, poziomych (absolutnych) oraz fazowych (w laboratorium). Określenie ciśnienia progowego ("treshold pressure") - na podstawie rdzeni z nadkładu,
- Określenie ciśnienia "treshold pressure" w trakcie testu in situ,
- Określenie indeksu chłonności określenie przewodności (kh),
- Potwierdzenie szczelności poprzez test pulsacyjno-interferencyjny w badanym otworze,
- Sprawdzenie szczelności płaszcza cementowego otworów badawczych,
- Określenie wstępne ściśliwości ośrodka (c x phi x h),
- Wykonanie kompletu badan geochemicznych,
- Przygotowanie i wdrożenie pierwszego systemu monitoringu geofizycznego,
- Przygotowanie i sprawdzenie innych procedur związanych z bezpieczeństwem składowania CO_2,
- Przygotowanie odpowiedniego raportu badawczego dla Ministerstwa Środowiska i Wyższego Urzędu Górniczego,
- Przygotowanie innych publikacji dot. pilotowego zatłaczania.

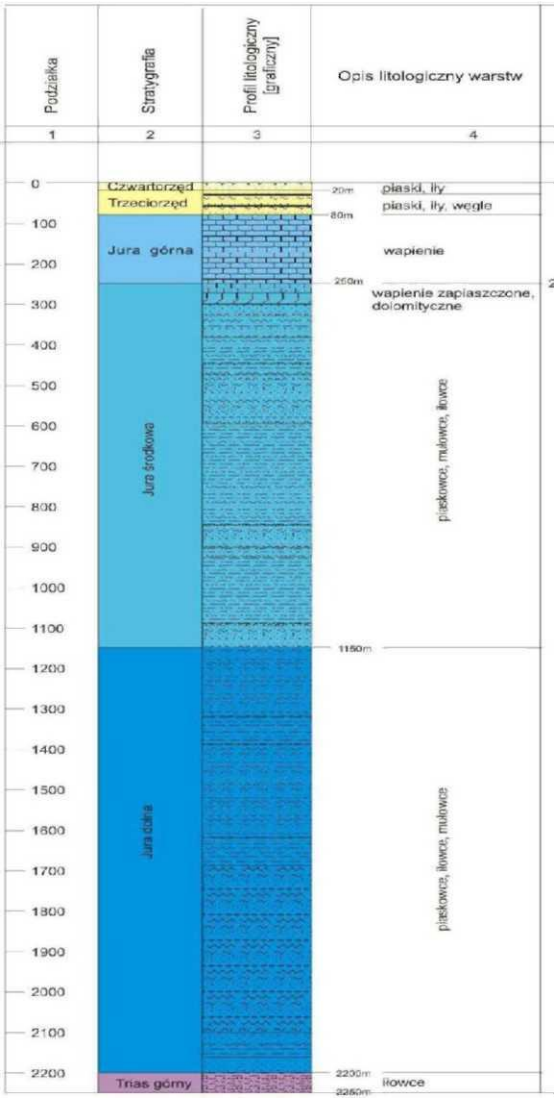


Fig.1.1.18_17 Profil otworu Kaszewy 2i (Modliński i in., 2009a); wybrano do zatłaczania kolektor górnego pliensbachu (formacja drzewicka) na głębokości 1620-1690 m a uszczelnienie stanowią utwory dolnego toarku (formacja ciechocińska) na głębokości 1390-1620 m

Monitoring procesu zatłaczania

Wprowadzenie

Miejsce do składowania CO_2 musi się cechować odpowiednio dobrymi parametrami zbiornikowymi oraz posiadać wystarczającą izolację hydrauliczną skał stropowych i spągowych oraz posiadać wystarczającą izolację skał w strefach brzeżnych przyszłego zbiornika, celem uniemożliwienia ucieczki CO_2. Szczelność zależy od struktury geologicznej zbiornika jego własności petrofizycznych oraz od rodzaju płynu zatłaczanego (czy CO_2 jest w postaci gazowej czy w postaci krytycznej) oraz rozkładu ciśnienia w trakcie zatłaczania. Ryzyko utraty szczelności jest trudne do oceny ze względu na złożoną strukturę ośrodka geologicznego niemożliwą do pełnego rozpoznania, skomplikowane procesy fizyczne zachodzące w zbiorniku, nieliniowe zmiany w górotworze. Dlatego do badania szczelności zbiornika CO_2 najlepiej używać metod pozwalających kontrolować rozprzestrzenianie się gazu w strukturze geologicznej. Do osiągnięcia tego celu bardzo pomocnymi mogą być 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 prędkości fal sejsmicznych i ich tłumienie, gęstość ośrodka i jego własności elektryczne.

Monitoring sejsmiczny

Zmiany własności sprężystych wywołane zatłoczeniem dwutlenku węgla dają wyraźny efekt sejsmiczny. Doświadczenie uzyskane dotychczas na złożu norweskim Sleipner oraz badania modelowe wykazały że najlepszymi metodami wykorzystania pomiarów sejsmicznych jest badanie zmienności amplitudy (AVO) z odległością 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. Nasycenie warstwy dwutlenkiem węgla powoduje, że czas przejścia przez tą warstwę wzrasta a więc obserwujemy opóźnienie refleksów sejsmicznych pochodzących z poziomów niższych niż nasycona warstwa w porównaniu z czasami zarejestrowanymi w ośrodku nie nasyconym CO_2.

Z uwagi na projektowane ilości zatłaczanego CO_2 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 zatłaczaniem może być bliski błędowi pomiaru, zwłaszcza w pierwszym etapie testowego zatłaczania. Jeżeli jednak możemy go pomierzyć, to ten sposób detekcji CO_2 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 zatłaczaniem (tła)
- 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 naprężeń w ośrodku, o złożonym rozkładzie. Dotyczy to zarówno lokalnych rozkładów naprężeń wokół por jakie powstają w rejonach dużego gradientu ciśnień jak również regionalnych rozkładów w nadkładzie gdzie powstają naprężenia wynikające przesuwającego się frontu zatłaczania. Jeżeli 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:

- można badać intensywność procesów zachodzących w ośrodku badając aktywność (ilość zdarzeń w jednostce czasu) sejsmoakustyczną.
- lokalizacja hipocentrum możliwa gdy prowadzimy rejestracją przy pomocy sieci czujników pozwala wyznaczyć rejony w których naprężenia są szczególnie intensywne.
- jeżeli rejestracja dotyczy fal poprzecznych to można określić kierunki spękań wykorzystując fakt, że ten rodzaj fali ulega rozszczepieniu i dzięki temu zjawisku istnieje możliwość takiej interpretacji zarejestrowanych fal sejsmicznych aby można było wyznaczyć kierunki spękań.

Wykorzystanie sejsmiki pasywnej (czyli inaczej mikrosejsmologii) jest przewidywane w trakcie procesu zatłaczania i monitorowania.

Szczegółowy zakres przedsięwzięć związanych z umiejscowieniem sond (nadajników/anten) , częstotliwość pomiarów, położenie poziome i pionowe - będzie przedmiotem odrębnego projektu technicznego.

Monitoring elektromagnetyczny i VSP 3C

Przewiduje się wykorzystanie międzyotworowego monitoringu elektromagnetycznego i VSP 3C z wykorzystaniem sond geofizycznych.

Szczegółowy zakres przedsięwzięć związanych z umiejscowieniem sond (nadajników/anten) w otworach, częstotliwość pomiarów, położenie pionowe - będzie przedmiotem odrębnego projektu technicznego.

Monitoring geochemiczny gruntu i wód gruntowych wokół otworu zatłaczającego

Faza przed zatłaczaniem - określenie tła.

Obszar badań około 5000 m^2 , tzn. W promieniu około 40 metrów wokół otworu:

- pomiary zawartości CO_2, radonu, helu, węglowodorów, O_2, $H_2 + N_2$ w powietrzu glebowym w siatce 10x10 m - 200 pkt. pomiarowych

- wykonanie 18 otworów małośrednicowych wokół planowanego otworu zatłaczającego
- pomiary zawartości CO_2, radonu, helu w małośrednicowych otworach wykonanych wokół planowanego otworu zatłaczającego - 2 strefy (łącznie 18 otworów)
- pobór próbek powietrza glebowego
- badania próbek powietrza glebowego w laboratorium - metodami chromatograficznymi oraz badania izotopowe węgla i tlenu w CO_2
- wykonanie piezometrów - 4 otwory do max 20 m - 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_2)
- znaczniki gazów zatłoczone razem z CO_2 do otworu - mierzone w odwiercie obserwacyjnym

  Faza zatłaczania

  Bieżące pomiary CO_2 w powietrzu glebowym wykonywane w trakcie pompowania CO_2 do otworu

  Faza po zatłoczeniu - monitoring

- pomiary zawartości CO_2, radonu, helu, węglowodorów, O_2, $H_2 + N_2$ w powietrzu glebowym w siatce 10x10 m - 200 pkt. pomiarowych
- pomiary zawartości CO_2, radonu, helu w mało średnicowych otworach wykonanych wokół planowanego otworu - 2 strefy (łącznie 18 otworów)
- pobór i badania próbek powietrza glebowego w laboratorium - metodami chromatograficznymi oraz badania izotopowe węgla i tlenu w CO_2
- pobór próbek wód podziemnych w określonych okolicznych stu-dniach, w wykonanych piezometrach
- badania wód podziemnych (określenie zawartości jonów głównych, pH, alkaliczności, izotopy stałe, gazy łącznie z węglowodorami, CO_2).

Biomonitoring

Przewiduje się badania koncentracji CO_2 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 szczegółowy zakres prac zostanie podany w odrębnym projekcie technicznym. Prace zostaną wykonane w formie:

- monitoringu zerowego przed zatłaczaniem (tła)

- pomiarów po zakończeniu kolejnych etapów zatłaczania.

Prace geodezyjne

Dokładna lokalizacja płytkich otworów małośrednicowych i piezometrów oraz punktów poboru próbek gleby/gruntu zostanie określona za pomocą GPS. Współrzędne punktów grawimetrycznych zostaną określone za pomocą GPS i niwelacji klasycznej.

Obiekt solankowy w rejonie GZW

Zgodnie z wnioskami z prac przeprowadzonych w ramach zadania **1.1.17** definitywne określenie możliwości bezpiecznego geologicznego składowania w obiekcie Skoczów-Czechowice wymaga dokładnego rozpoznania kompleksu składowania. Do tego celu niezbędne jest zgodnie z zasadami sztuki wykonanie przed zatłaczaniem (najpierw testowym, ale lokalizację otworu do testowego zatłaczania w projekcie demonstracyjnym wybiera się z myślą o jego przyszłym wykorzystaniu do zatłaczania w pełnej skali) monitoringu zerowego (Chadwick et al., 2008). Z kolei prace wykonane w ramach monitoringu zerowego powtarza się z różną częstotliwością, w zależności od metody i etapu projektu demonstracyjnego, w trakcie zatłaczania 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*).

W ramach niniejszego zadania opracowano plan monitoringu geofizycznego powierzchniowego metodami niesejsmicznymi (PBG; grawimetria, metody elektromagnetyczne orz metoda elektrooporowa); projekt wiercenia i wyposażenia otworów do testowego zatłaczania CO2 dla lokalizacji Iskrzyczyn (AGH we współpracy z PIG-PIB), plan monitoringu sejsmologicznego (GIG) dla wybranej lokalizacji zatłaczania. Natomiast założenia dla wykorzystania najbardziej zaawansowanych metod monitoringu sejsmicznego, w tym sejsmiki 4D (INiG) zostały przedstawione w podrozdziale **1.1.18** dotyczącym struktur naftowych (złoże ropy Nosówka i rejon GZW łącznie), z uwagi na fakt że w obu przypadkach mamy do czynienia z podobnymi warunkami geologicznymi w obrębie tej samej jednostki - brzeżnej strefy Karpat i Zapadliska Przedkarpackiego.

Dodatkowo PIG-PIB i AGH opracowały pilotowy projektu prac geologiczny na badanie chłonności utworów jury dla struktury będącej alternatywą dla obiektu Skoczów-Czechowice (otwór badawczy/monitoringowy, otwór zatłaczający, monitoring powierzchniowy i otworowy przed, w trakcie i po zakończeniu zatłaczania), tzn. dla struktury Budziszewice, lokalizacja Glinnik, zamieszczony na CD, którego podstawowe założenia przedstawiono na końcu niniejszego podrozdziału.

Program monitoringu (grawimetrycznego, elektromagnetycznego i elektrooporowego) stanu początkowego oraz w trakcie i po zakończeniu zatłaczania CO_2 dla obiektu Skoczów-Czechowice (PBG)

(Marek Wojdyła, Zdzisław Żuk, Grzegorz Pacanowski, Cezary Ostrowski, Tomasz Bąk)

Monitoring metodą grawimetryczną

Z przeprowadzonego oszacowania zdolności geologicznego składowania dwutlenku węgla (Wójcicki, 2005; Christensen, 2007) wynika, że największy potencjał umożliwiający sekwestrację dwutlenku węgla z dużych zakładów przemysłowych posiadają głębokie solankowe poziomy wodonośne. Dla stwierdzenie ich przydatności do długotrwałego uwięzienia dwutlenku węgla niezbędne jest dokładne rozpoznanie, a następnie, ze względu na w dużej mierze pionierski charakter geologicznej sekwestracji CO_2, rozważny wybór właściwego obiektu. Zapotrzebowanie na takie naturalne podziemne magazyny dotyczy w szczególności województwa śląskiego i nieznacznie mu ustępującego pod względem emisji CO_2, województwa łódzkiego. To ostatnie osiąga 35 milionów ton wyemitowanego CO_2/rok(licząc tylko zakłady wydalające powyżej 100 tys. ton CO_2/rok). Dzieje się tak za sprawą największych emitentów dwutlenku węgla w naszym kraju, do których należą elektrownie i elektrociepłownie, huty, duże zakłady przemysłu chemicznego i inne. W tej sytuacji koniecznością jest rozpoznanie możliwości podziemnego składowania CO_2 w strukturach geologicznych, m.in. pomiędzy Cieszynem, Skoczowem i Czechowicami. Na tym obszarze w odpowiednim do składowania CO_2 przedziale głębokości, ośrodek skalny zbudowany jest z warstw dębowieckich stanowiących spągową część miocenu, przeważnie zalegających bezpośrednio na karbonie lub osadach starszego miocenu. Warstwy dębowieckie zbudowane z piaskowców i zlepieńców, uszczelnione są nadkładem iłowcowo-mułowcowym formacji skawińskiej o miąższości setek metrów. Perspektywiczny do zatłaczania CO_2 może być również poziom solankowy serii węglanowej dolnego karbonu oraz górnego i środkowego dewonu, a także dewonu dolnego i kambru. Ten ostatni został oceniony przez geologów, jako najmniej interesujący i nie będzie przedmiotem dalszych analiz. Pogłębienie znajomości budowy i własności dwóch pierwszych obiektów geologicznego m.in. na podstawie nowoczesnego zdjęcia grawimetrycznego pozwoli określić stopień przydatności tych struktur do zatłaczania i składowania dwutlenku węgla.

Dotychczasowe badania grawimetryczne w omawianym rejonie pochodzą sprzed kilkudziesięciu lat. Zgromadzone wówczas materiały znajdują się w *banku danych grawimetrycznych*. Wprawdzie służyły one do opracowywania map grawimetrycznych i modelowań gęstościowych 2D, ale należy pamiętać, że dokładność wyników interpretacji jest pochodną jakości materiałów źródłowych, które często nie odpowiadają stawianym obecnie wymogom. Dotyczy to stosowanego wcześniej podkładu topograficznego, braku poprawki topograficznej, używania przyrządów o małej dokładności, prostych metod interpretacji. Z konieczności istniejące dane służyły dotychczas do różnego rodzaju analiz zaburzeń pola siły ciężkości. Na podstawie tych materiałów (Reczek, 1973; Reczek, 1978) opracowana została i do tej pory obowiązuje podstawowa mapa grawimetryczna anomalii siły ciężkości w redukcji Bouguera. Przy jej konstruowaniu przyjęto m.in. niestosowane od szeregu lat wartości siły ciężkości w systemie poczdamskim, wartości pola normalnego wg algorytmu Helmerta i współrzędne niestosowanego od lat układu Borowa Góra.

CEL I ZAKRES BADAŃ

Zadaniem prac będzie uszczegółowienie obrazu grawimetrycznego wywołanego budową strukturalną rejonu Cieszyna – Skoczowa - Czechowic. Prace grawimetryczne są częścią szerokiego przedsięwzięcia, którego cel sprowadza się do dokładniejszego rozpoznania kompleksów geologicznych do głębokości około 2000 m czyli po spąg dewonu środkowego, co w połączeniu z wynikami projektowanych prac geologicznych oraz badań innymi metodami geofizycznymi, przybliży rozwiązanie problemów związanych z przewidywaną geologiczną sekwestracją CO_2.

Zadania stawiane przed grawimetrią w zakresie prac terenowych obejmują:

- wykonanie zdjęcia o wysokiej dokładności pomiarów polowych na stanowiskach pomiarowych oddalonych od siebie o 150-250 m, przy użyciu przyrządów pomiarowych najnowszej generacji, lub

- stosowanie systemu punktów profilowych przy wzajemnych odległościach co 200 m wzdłuż linii planowanych pomiarów sejsmicznych, oraz systemu punktów rozproszonych pomiędzy profilami i w ich otoczeniu – punkty rozproszone przy odległościach względem siebie jak poprzednio 150-250 m.

W obu przypadkach zagęszczenie stanowisk pomiarowych wyniesie około 25 pkt/1 km^2.

W dalszych etapach prac prowadzonych w ramach monitoringu grawimetrycznego, należy zwiększyć ilość stanowisk pomiarowych do 200-400/1 km^2 w rejonach otworów służących do zatłaczania składowanego medium.

W ramach przetwarzania danych polowych i prac dokumentujących opracowane zostaną:

- katalog anomalii siły ciężkości w redukcji P. Bouguera,

- mapa anomalii Bouguera – podstawowa mapa grawimetryczna,

- ewentualnie inne mapy anomalii grawimetrycznych według zapotrzebowania.

Interpretacja materiałów grawimetrycznych dostarczy nowych informacji o budowie strukturalnej oraz tektonice kompleksów: przypowierzchniowego, mioceńskiego, karbońsko-dewońskiego oraz ich podłoża, w rejonie planowanego składowania CO_2.

W ramach monitoringu grawimetrycznego planowane są cykliczne pomiary w odstępach kilkuletnich. Umożliwią one rozpoznanie dynamiki zmian zachodzących w rozkładzie masy utworów wokół składowisk dwutlenku węgla i w ich nadkładzie. Przedmiotem analizy będą różnicowe anomalie siły ciężkości w redukcji Bouguera (potocznie nazywane anomaliami pomierzonymi). Projekt powinien zakładać przeprowadzanie pomiarów monitorujących przez cały okres eksploatacji składowiska CO_2 oraz po zakończeniu, a wówczas proponowane są prace w takim samym zakresie, przy zachowaniu metodyki, lokalizacji i ilości pomiarów jak w ramach monitoring stanu początkowego. Pierwszy monitoring w trakcie eksploatacji powinien zostać przeprowadzony po 2 latach od rozpoczęcia zatłaczania, a potem co 3-4 lata. Po zakończeniu zatłaczania należy wykonywać ten sam zakres pomiarów co 5 lat.

Projektowane zdjęcie grawimetryczne obejmie obszar o powierzchni około 288 km^2 (16 km x 18 km). Przy średnim zagęszczeniu punktów pomiarowych wynoszącym 25 pkt/1 km^2, łącznie planowane jest założenie i wykonanie pomiarów na 7200 punktach grawimetrycznych.

Obszar prac rozciąga się od okolic Dębowa na wschodzie po Jaworze i Międzyrzec na zachodzie oraz od okolic Strumienia oraz Czechowic–Dziedzic na północy po Cieszyn na południu.

Według podziału map topograficznych w skali 1:50 000 układu 1992 obszar projektowanych prac obejmuje niżej wyszczególnione arkusze.

Tab. 1.1.18_5 Arkusze obszarów projektowanych prac

Lp.	Oznaczenie arkusza mapy
1.	M-34-74-B
2.	M-34-74-C
3.	M-34-74-D
4.	M-34-75-C
5.	M-34-75-A

Polowe prace geodezyjne

- założenie 7200 grawimetrycznych punktów pomiarowych: rozproszonych przy odległościach między punktami 150-250 m, oraz profilowych wzdłuż linii sejsmicznych przy kroku pomiarowym 200 m,

- określenie wysokości *h* dla 7200 punktów pomiarowych (niwelacja) z powtórzeniem pomiarów na ok. 5 % stanowisk. Średni błąd kwadratowy niwelacji nie powinien przekroczyć ±0,05 m. Niwelację należy dowiązać 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 5º (dla określenia poprawki topograficznej),

- lokalizacja punktów pomiarowych wg mapy topograficznej w skali 1:25 000 lub 1:10 000.

Pomiary grawimetryczne

- uzupełnienie istniejącej sieci grawimetrycznej o 3-4 punkty podstawowe przez wykonanie pomiarów 6-9 przęseł łączących te punkty z punktami osnowy grawimetrycznej. Możliwe też jest założenie mniejszej lub większej ilości punktów sieci grawimetrycznej. O uzupełnieniu (lub jedynie uaktualnieniu) sieci punktów podstawowych zadecyduje kierujący pracami polowymi po przeprowadzeniu wizji terenowej,

- wykonanie 7900 pomiarów siły ciężkości na 7200 stanowisk pomiarowych,

- wykonanie 500 nawiązawczych pomiarów siły ciężkości na stanowiskach bazowych (podstawowych), w tym także pomiary przęseł sieci podstawowej,

- 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 ±0,025 mGal.

Prace obliczeniowe i techniczne

- określenie dla każdego stanowiska pomiarowego współrzędnych *x* i *y* w układzie 1992 na podstawie pomiarów GPS,

- obliczenie dla wszystkich punktów pomiarowych wysokości *h* i wartości przyspieszenia siły ciężkości *g*,

- opracowanie modelu rzeźby terenu i obliczenie poprawki topograficznej w strefach do 20 km dla każdego punktu grawimetrycznego,

- obliczenie dla 7200 punktów pomiarowych wartości anomalii siły ciężkości w redukcji Bouguera dla stałej i zmiennej gęstości utworów warstwy redukowanej,

- zestawienie katalogu punktów pomiarowych zawierającego:

- współrzędne *x* i *y* w układzie 1992 [km],

- wartości przyspieszenia siły ciężkości *g* [mGal] w systemie IGSN 71,

- wysokości *h* punktów [m] dla poziomu odniesienia Kronsztadt,

- wartości anomalii w redukcji Bouguera [mGal] dla stałych i zmiennej gęstości utworów warstwy redukowanej oraz dla elipsoidy GRS 80,

- wartości sumaryczne poprawki topograficznej siły ciężkości [mGal],

- sporządzenie operatu pomiarowego.

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

Zestawienie materiałów z prac terenowych i obliczeniowych

Dane grawimetryczne z pomiarów terenowych i prac obliczeniowych dla każdego punktu pomiarowego zestawione będą, jak wspomniano wyżej w postaci katalogu, stanowiącego bardzo istotną część dokumentacji z wykonanych prac. Punkty pomiarowe, którym dwukrotnie wyznaczono współrzędne, wysokość lub przyspieszenie siły ciężkości, będą posiadały w katalogu uśrednione wartości tych parametrów.

Materiały dokumentujące wykonanie pomiarów grawimetrycznych i związanych z nimi robót geodezyjnych oraz prac obliczeniowych zestawione będą w postaci operatu pomiarowego i złożone w archiwum wykonawcy prac. W skład operatu wejdą między innymi:

- mapy dokumentacyjne (topograficzne) w skali 1:25 000 (lub 1:10 000),

- dzienniki niwelacyjne,

- dzienniki pomiarów grawimetrycznych.

PRACE GRAWIMETRYCZNE W ASPEKCIE zapewnienia bezpieczeństwa powszechnego, bezpieczeństwa pracy i ochrony środowiska

Grawimetria należy do metod przyjaznych środowisku. Wykonanie pomiaru grawimetrycznego sprowadza się do dotarcia na zaplanowane miejsce i zarejestrowania przyspieszenia ziemskiego bez najmniejszej ingerencji w środowisko. W związku z tym wykluczone jest, aby projektowane badania w jakikolwiek sposób mogły wpłynąć niekorzystnie na grunty rolne, leśne lub szatę roślinną na terenie przewidywanych prac. Uwaga ta dotyczy również powietrza atmosferycznego jak i środowiska gruntowo-wodnego.

INTERPRETACJA DANYCH GRAWIMETRYCZNYCH

Do opracowania i wykreślenia map grawimetrycznych zastosowane będzie profesjonalne oprogramowanie: program SURFER firmy Golden Software Inc. oraz programy z pakietu OASIS montaj firmy Geosoft Inc. Wszystkie procedury w ramach sporządzania map wykonywane będą po zapisaniu danych początkowych w postaci siatek wyinterpolowanych wartości anomalii. W przypadku anomalii Bouguera zostaną utworzone, w zależności od potrzeb różne siatki interpolacyjne (siatki kwadratów). Mapy anomalii Bouguera będą opracowane na podstawie wartości anomalii wyliczonych dla gęstości stałej i/lub gęstości zmiennej (wg uzgodnień).

W ramach prac interpretacyjnych uzasadnione jest opracowanie następujących map grawimetrycznych:

- anomalii rezydualnych na podstawie filtracji częstotliwościowej lub według klasycznej metody Griffina dla zadanych głębokości planowanego rozpoznania,

- anomalii regionalnych przy zastosowaniu filtracji częstotliwościowej lub metody Griffina dla zobrazowania efektu grawitacyjnego pochodzącego od podłoża,

- gradientu poziomego i dekonwolucji Eulera dla rozpoznania elementów tektoniki i granic ciał wywołujących anomalie.

Wymienione wyżej mapy zostaną sporządzone po transformacjach rozkładu anomalii Bouguera. Metody przekształcania pomierzonego pola grawitacyjnego oraz parametry transformacji zostaną wybrane po analizie danych geologiczno-wiertniczych i ukierunkowane na rozpoznanie budowy strukturalnej pomiędzy Cieszynem – Skoczowem i Czechowicami w założonym interwale głębokości.

Uzyskane dane grawimetryczne powinny być dostosowane do późniejszej kompleksowej interpretacji geofizycznej ukierunkowanej na dalsze rozpoznanie litologii oraz struktury i tektoniki rejonu badań.

Zmiany czasowe anomalii Bouguera

Okresowe pomiary grawimetryczne w cyklu kilkuletnim, wykonywane w ramach tzw. monitoringu grawimetrycznego doprowadzą do uzyskania anomalii Bouguera (w tych samych punktach) dla kolejnych serii pomiarowych. Różnice anomalii pomiędzy seriami (tzw. anomalie różnicowe) będą obrazowały zmiany gęstości objętościowej zachodzące w utworach skalnych zalegających pod analizowanym profilem czy rejonem badań. Analizie poddane będą różnice wartości pomiędzy daną serią i pierwszą, a także pomiędzy kolejnymi seriami, co pozwoli ocenić dynamikę zmian rozkładu masy utworów skalnych w poszczególnych interwałach czasowych (Fajklewicz, 2007).

Forma udokumentowania wyników

Opracowanie końcowe będzie zwierało:

- część tekstową, w tym:

- opis techniki i metodyki prac pomiarowych,

- zakres wykonanych prac,

- opis metodyki przetwarzania danych i interpretacji,

- omówienie wyników i ich analizę,

- część graficzną w postaci opracowanych map grawimetrycznych - skala 1:50 000 (lub inna),

- część dokumentacyjną zapisaną na CD lub DVD, zawierającą:

- katalogi danych grawimetrycznych,

- podstawową mapę anomalii Bouguera.

Wszystkie zmiany zakresu prac interpretacyjnych i formy załączników będą uzgadniane na poszczególnych etapach prac z przedstawicielem Zamawiającego.

HARMONOGRAM ORAZ KOSZTORYS PRAC

Czas realizacji planowanych prac (w pierwszej serii i każdej następnej objętej monitoringiem) wyniesie 9-10 miesięcy. Poszczególne etapy wykonane będą w następujących terminach:

- przeprowadzenie pomiarów terenowych – 6 miesięcy,

- przetwarzanie danych – 1-2 miesiące,

- opracowanie i analiza wyników, sporządzenie dokumentacji – 2-3 miesiące.

Koszt jednostkowy wykonania pomiarów i opracowania danych dla jednego punktu pomiarowego wyniesie 160 zł netto. Dla 7200 punktów łączny koszt to 1,15 mln zł.

UWAGI KOŃCOWE

Zleceniodawcy przysługuje prawo wprowadzania zmian do projektu, łącznie ze zmianą metodyki prac, w zależności od uzyskiwanych wyników, a także prawo przerwania prac terenowych, jeśli nie gwarantują uzyskania technicznie poprawnych rezultatów, pozwalających rozwiązać postawione zadanie.

Odpowiedzialność za właściwe i ekonomiczne wykorzystanie środków technicznych przeznaczonych na prace ponosi wykonawca.

W przypadku konieczności wprowadzenia zmian metodycznych w stosunku do określonych w projekcie lub też zmiany zakresu prac w wyniku nieprzewidzianych trudności terenowych, obowiązkiem wykonawcy jest wystąpić z odpowiednio umotywowanym wnioskiem do Zleceniodawcy o ich zmianę. Zmiany o których mowa, muszą być zaakceptowane przez Zleceniodawcę.

Monitoring metodą elektromagnetyczną

Celem projektowanych prac elektromagnetycznych jest monitoring składowiska przed rozpoczęciem składowania CO_2, w czasie eksploatacji składowiska i po jej zakończeniu. Prace elektromagnetyczne będą zatem koncentrowały się na rozpoznaniu budowy geologiczno-strukturalnej rejonu projektowanych prac, pod kątem zbadania własności geoelektrycznych piaskowców i zlepieńców warstw dębowieckich (potencjalny kolektor) i nadległego uszczelnienia w postaci iłowców i mułowców - warstw skawińskich, jak również rozpoznania tektoniki, a tym samym wskazania kierunku rozwoju stref zaburzonych tektonicznie, spękanych i przepuszczalnych, które mogłyby być potencjalną drogą ucieczki CO_2. Wspomniane skały zbiornikowe i uszczelniające zalegają na głębokości średnio 800 metrów a ich miąższości i wzajemne kontrasty oporności wskazują na metody geoelektryczne jako predestynowane w pierwszej kolejności do ich rozpoznania.

Prace geoelektryczne wykonane zostaną metodą magnetotelluryczną MT/AMT (w paśmie magnetotellurycznym – MT i audiomagnetotellurycznym – AMT), w wariancie ze sztucznym źródłem pola elektromagnetycznego CSAMT (Controlled Source Audiofrequency Magnetotelluric), oraz metodą procesów przejściowych TDEM (Time - Domain Electromagnetic). Wykorzystana zostanie aparatura geoelektryczna serii system2000.net produkcji kanadyjskiej firmy Phoenix Geophysics Ltd. Projekt prac obejmuje wykonanie prac pomiarowych wraz z przetwarzaniem i interpretacją danych wzdłuż 8 profili o łącznej długości około 110 km.

Badania MT/AMT polegają w ogólnym ujęciu na rejestracji składowych naturalnego lub sztucznego pola elektromagnetycznego na powierzchni Ziemi i obliczeniu na ich podstawie rozkładu oporności w ośrodku geologicznym a następnie interpretacji tego rozkładu tj. powiązaniu wydzielonych kompleksów geoelektrycznych z kompleksami geologicznymi. Wspólną cechą wyróżniającą grupę metod magnetotellurycznych jest charakterystyczna konfiguracja pola źródłowego. W założeniu jest to płaska fala elektromagnetyczna padająca z góry prostopadle do powierzchni Ziemi. Metody audiomagnetotelluryczna (AMT) i magnetotelluryczna (MT) wykorzystują źródła naturalne, czyli rezonansowe drgania jonosfery wzbudzone przez zmienne natężenie wiatru słonecznego oraz odległe wyładowania atmosferyczne w strefie okołorównikowej. W paśmie AMT i MT pojawiają się zakresy częstotliwości, w których energia pola naturalnego jest niska. Takie zakresy częstotliwości nazwane w magnetotelluryce „martwymi pasmami" (*ang. dead band*), często utrudniają uzyskanie wysokiej jakości wyników i zwiększają koszty akwizycji danych. Próbę rozwiązania problemu „martwych pasm" podjęto wprowadzając sztuczne źródło pola magnetotellurycznego (metoda CSAMT), którego parametry mogą być łatwo kontrolowane. W przypadku metody CSAMT wykorzystuje się sztucznie wygenerowane pole elekromagnetyczne o wyższych częstotliwościach (0,1 – 10000 Hz). Sztuczne pole elektromagnetyczne wzbudzane jest w ośrodku geologicznym galwanicznie za pomocą uziemionego dipola prądowego (nadawczego), przez który podawany jest prąd zmienny o określonej częstotliwości i kształcie sygnału elementarnego. Amplituda składowych wzbudzonego pola elektromagnetycznego zależna jest od częstotliwości i odległości dipola prądowego od dipola pomiarowego.

Metoda procesów przejściowych TDEM (zwana też TEM – Transient Electromagnetic) podobnie jak CSAMT wykorzystuje sztucznie wygenerowane pole elektromagnetyczne. Penetrację ośrodka geologicznego umożliwia wykorzystanie zjawiska indukcji elektromagnetycznej. Zmienne w czasie pole magnetyczne jest wytwarzane na powierzchni ziemi przy użyciu pętli (loop), czyli przewodnika odpowiednio ukształtowanego umieszczonego na powierzchni ziemi. Pole elektromagnetyczne źródeł impulsowych w tzw. strefie bliskiej

nie zależy od odległości nadajnik odbiornik, dlatego pomiary może realizować pętla odbiorcza w pętli nadawczej, co daje przewagę w metodyce pomiarowej w stosunku do innych metod np.: elektrooporowej czy CSAMT. Interwał głębokościowy interpretacji wyników pomiarów wynosi tutaj najczęściej od dziesiątków do ok. 1000 metrów (i więcej) i zależy m. in. od rozmiaru pętli nadawczej, mocy nadajnika i rozkładu oporności w ośrodku geologicznym.

Etapy analizy zarejestrowanych danych we wszystkich metodach są analogiczne. Przedmiotem interpretacji geofizycznej jest zmienność oporności w ośrodku geologicznym i powiązanie tej zmienności ze zmianami litologicznymi.

Zakres oraz cel prac

Podstawową metodą wykorzystaną do kartowania warstw dębowieckich będzie metoda audiomagnetotelluryczna ze sztucznym źródłem (CSAMT). Planuje się wykonanie pomiarów CSAMT metodą profilowań ciągłych wzdłuż ośmiu linii pomiarowych o łącznej długości 110 km (**Fig. 1.1.18_19**). Metoda CSAMT pozwala z znacznym stopniu redukować wpływ zakłóceń EM które mogą stanowić przeszkodę dla wykonania ciągłych prac innymi metodami geoelektrycznymi. Zatem, dodatkowo w celu kalibracji uzyskanych wyników dla strefy głębokiej planuje się wykonanie sondowań MT/AMT oraz TDEM wzdłuż profili z zachowaniem kroku pomiarowego średnio 1,5 km w miejscach, w których poziom zakłóceń elektromagnetycznych będzie wystarczająco niski dla uzyskania odpowiedniej jakości danych pomiarowych. Terenowe prace magnetotelluryczne obejmą wykonanie 50 sondowań metodą MT/AMT wzdłuż 8 profili również wykonanie sondowań parametrycznych MT/AMT w pobliżu czterech otworów wytypowanych do zatłaczania CO_2.

Charakterystyka dotychczasowych prac elektromagnetycznych w rejonie badań

W obszarze projektowanych prac nie wykonywano dotychczas głębokich badań elektromagnetycznych ww. metodami. Na południe od obszaru prac zlokalizowanych jest kilka sondowań magnetotellurycznych wykonanych pod koniec ubiegłego wieku 16-bitową aparatura MT-1 w ramach regionalnego zdjęcia magnetotellurycznego (krok pomiarowy około trzy kilometry).

Wpływ prac na środowisko naturalne i obiekty budowlane

Metodyka pomiarów magnetotellurycznych nie wymaga prac ziemnych (typu wykopy, wiercenia) czy prac strzałowych, dzięki czemu problem ochrony środowiska naturalnego przy ich realizacji w zasadzie nie występuje. Najistotniejsze elementy środowiska geologicznego: warunki hydrogeologiczne i struktura warstwy przypowierzchniowej w trakcie oraz po zakończeniu pomiarów pozostają nienaruszone. Oddziaływanie projektowanych prac magnetotellurycznych dotyczyć będzie tylko:

- zmian powierzchni terenu: niewielkie szkody mogą powstać jedynie w uprawach rolnych przy instalowaniu układów pomiarowych polegającym na rozwinięciu kabli o długości 75 m (długość pojedynczego dipola) i uziemieniu elektrod oraz zakopaniu sond magnetycznych w płytkich dołkach, które są lokalizowane na nieużytkach lub polach uprawnych aktualnie niewykorzystanych. Szkody tego typu są usuwane na bieżąco

poprzez przywrócenie stanu pierwotnego miejsc uziemień. Dojazdy do projektowanych profili realizowane będą z wykorzystaniem istniejącej sieci dróg, co umożliwia ograniczenie szkód w uprawach rolniczych i leśnych.

- zanieczyszczenia powietrza spalinami: samochody będą powodowały krótkotrwałe zanieczyszczenie spalinami, ale nie większe niż przy normalnym ruchu kołowym na drogach dojazdowych. Wynika to ze specyfiki prac polowych, rozwinięcie i zwinięcie układu pomiarowego wymaga tylko dojazdu i dowiezienia sprzętu i ludzi.

- zagrożenia hałasem emitowanym w minimalnym stopniu przez pracujące silniki samochodowe.

Badania metodą CSAMT na profilach pomiarowych nie odbiegają swoją metodyką a zatem i wpływem na środowisko naturalne od pomiarów MT/AMT. Natomiast istotne różnice istnieją w trakcie wykonywania badań w miejscu lokalizacji tzw. układu prądowego. Układ prądowy, będący źródłem fali elektromagnetycznej zbudowany jest z dipola o długości do kilku kilometrów. Są to dwie grupy elektrod stalowych połączonych kablem do zlokalizowanego w środku tego układu transmitera prądu TXU-30. Transmiter zasilany jest generatorem prądotwórczym o mocy ok. 40 kW. Należy więc zasygnalizować, iż w trakcie cyklu pomiarowego trwającego ok. 1 godziny może występować zagrożenie hałasem spowodowane pracą generatora (ok. 70 dB). Planuje się wykonywanie 2-3 cykli pomiarowych dziennie. Metodyka pomiarów CSAMT pozwala jednak na lokalizowanie układu prądowego (TXU-30 + generator) w miejscach gdzie ich praca nie będzie uciążliwa dla środowiska naturalnego, tj. ludzi i zwierząt.

W przypadku metody procesów przejściowych (TDEM) układ pomiarowy zarówno nadajnik jak i odbiornik tworzą kable ułożone bezpośrednio na powierzchni ziemi. Praca generatora i transmitera może powodować ewentualne, minimalne zagrożenie hałasem, jest ono tożsame jak w przypadku metody CSAMT.

Podsumowując należy stwierdzić, iż planowane prace elektromagnetyczne oddziaływać będą na wszystkie elementy środowiska w stopniu nikłym, w sposób krótkotrwały i przejściowy.

Technika oraz metodyka prac geoelektrycznych (EM)

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.

W pracach terenowych wykorzystane zostaną:

- odbiorniki typu V8-6R,

- odbiorniki typu RXU-3ER,

- odbiornik typu MTU-A,

- cewki magnetyczne typu AMTC-30, MTC-50 i MTC-50A,

- antena odbiorcza MTEM-AL,

- transmiter TXU-3,

- inne podzespoły aparatury (kable, GPS, prądnice etc.).

Pomiary terenowe metodą kontrolowanego źródła (CSAMT)

Podstawowy układ pomiarowy zastosowany przy pomiarze metodą CSAMT (**Fig. 1.1.18_20**) dla odbiornika sygnału składać się będzie z 3 dipoli elektrycznych Ex ułożonych w linii profilu, oraz czujnika magnetycznego zlokalizowanego w pobliżu środka linii dipoli elektrycznych. Długość dipoli wynosić będzie 50 m. Źródłem fali elektromagnetycznej będzie układ nadawczy zbudowany z dwóch grup elektrod stalowych. Długość dipola prądowego zależna będzie od przyjętej metodyki prac i wynosić może do kilku kilometrów. Grupy elektrod podłączone będą do transmitera (nadajnika). Transmiter zasilany będzie prądnicą. Przebiegi czasowe zapisywane będą na karcie pamięci zainstalowanej w sterowniku nadajnika podłączonym do transmitera.

Czas rejestracji oraz częstotliwości próbkowania pola elektromagnetycznego na pojedynczym punkcie pomiarowym zostanie ustalony zostanie w trakcie prac polowych. Synchronizacja sygnału pomiędzy układem prądowym i pomiarowym odbywać się będzie z użyciem urządzeń GPS.

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

Sondowania punktowe – profilowe i parametryczne (MT/AMT)

Schemat układu pomiarowego dla metody sondowań magnetotellurycznych w paśmie magnetotellurycznym – MT i audiomagnetotellurycznym – AMT przedstawiono na **Fig. 1.1.18_21**. Krok pomiarowy punktów podstawowych (5-cio składnikowych: Ex, Ey, Hx, Hy i Hz) wynosił będzie, w zależności od warunków topograficznych 1 do 2 kilometrów (średnio 1,5km).

Prace terenowe będą polegały 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 – 10000 Hz. Czas rejestracji dla omawianych badań, na jednym punkcie pomiarowym wynosić będzie wynosił ok. 36 - 42 godzin, w zależności od warunków pomiarowych (poziomu zakłóceń).

Podstawowy układ pomiarowy sondowań MT/AMT składał się będzie z odbiornika V8-R6, co pozwoli na równoczesną rejestrację naturalnego pola EM przy pomocy dwóch par wzajemnie prostopadłych dipoli elektrycznych E_x, E_y, oraz trzech czujników magnetycznych typu AMTC-30 (pasmo AMT) i MTC-50(A) (pasmo MT) do pomiaru składowych odpowiednio H_x, H_y, H_z, lokalizowanych w pobliżu środka dipoli elektrycznych. Dipole elektryczne zbudowane będą z kabla ekranowanego typu CX-75 i pary uziemień w postaci elektrod niepolaryzujących. 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 metodą 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 podłączoną do niego pętlą odbiorczą MTEM-AL (**Fig. 1.1.18_18**).

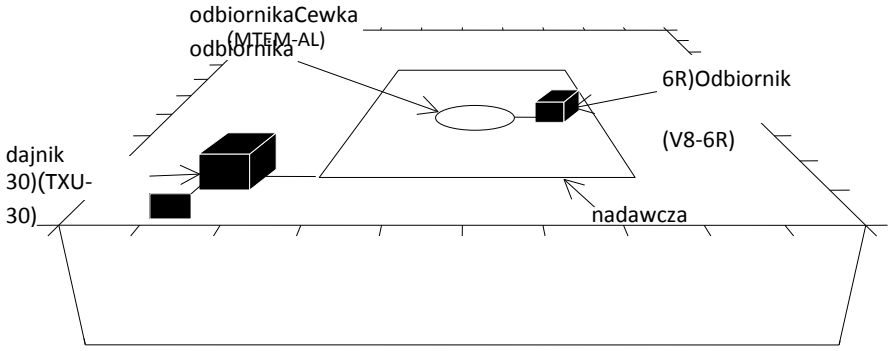


Fig. 1.1.18_18 Typowy układ pomiarowy dla metody TDEM

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 kilometra, 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 odbywać się będzie w dwóch etapach. Etap pierwszy to tzw. pre-processing obejmujący także kontrolę jakości i wykonywany będzie bezpośrednio w trakcie prac polowych. W etapie drugim, właściwym, 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 sondowań MT/AMT możliwe będzie także modelowanie 3D pozwalające na przestrzenną analizę zmienności oporności w ośrodku geologicznym.

Harmonogram oraz kosztorys prac elektromagnetycznych

W przypadku prac CSAMT planuje się wykonanie ośmiu profili o zmiennych azymutach i łącznej długości około 110 km. Krok pomiarowy (długość dipola Ex) dla prac CSAMT wynosić będzie 50 m. W sumie wykonane zostanie 2200 pojedynczych sondowań CSAMT. Czas wykonania prac terenowych nie powinien przekroczyć 3 miesięcy. Przetwarzanie i interpretacja wyników – 2 miesiące po zakończeniu prac polowych. Łączny koszt prac CSAMT szacuje się na kwotę 980 000,00 PLN (słownie dziewięćset osiemdziesiąt tysięcy złotych 00/100)

Ostateczny koszt prac wykonywanych metoda magnetotelluryczną (MT/AMT) oraz procesów przejściowych (TDEM) można oszacować dopiero po szczegółowej wizji terenowej, gdyż lokalizacja punktów pomiarowych w obszarze o tak wysokim poziomie urbanizacji powinna być przeprowadzona ze szczególna ostrożnością. Niemniej jednak, zakładając zgodnie z powyższym projektem wykonanie 50 głębokich sondowań MT/AMT oraz sondowań TDEM należy przyjąć: czas wykonanie (akwizycja danych, przetwarzanie i interpretacja) – 4 miesiące, koszt wykonania całości prac: 650 000,oo PLN (sześćset pięćdziesiąt tysięcy 00/100).

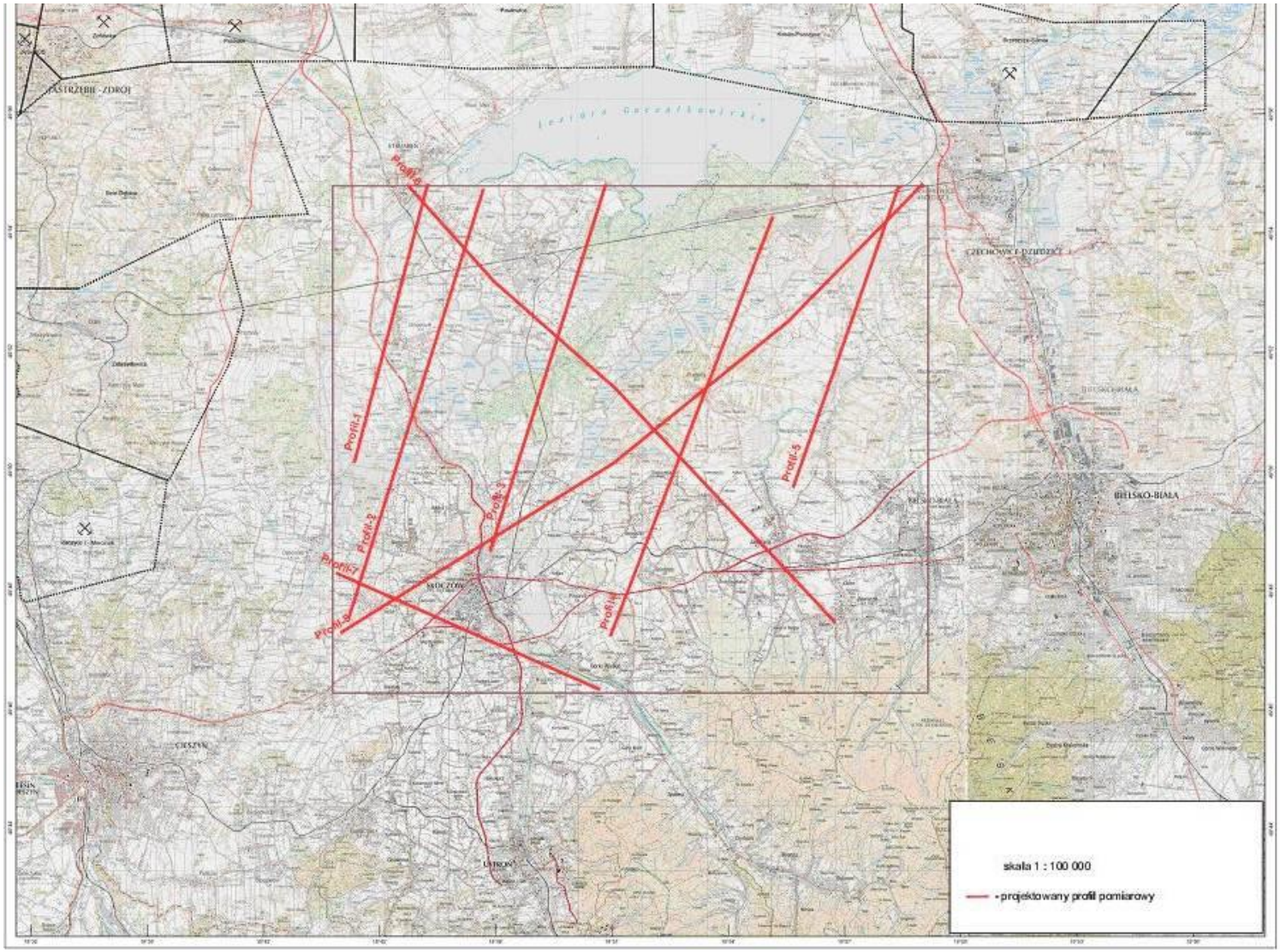


Fig. 1.1.18_19 Lokalizacja projektowanych profili pomiarowych na tle mapy topograficznej

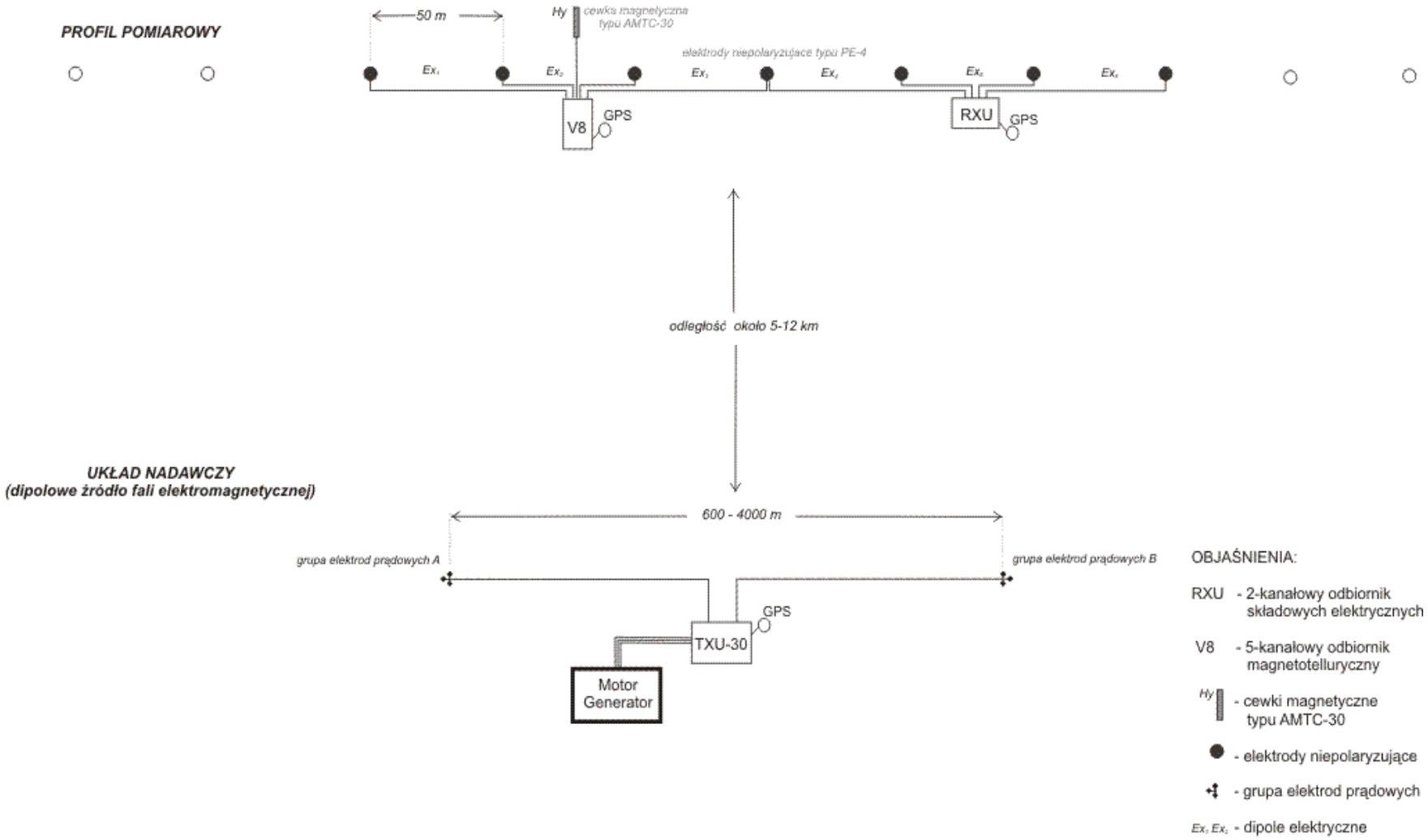


Fig. 1.1.18_20 Schemat układu pomiarowego sondowań CSAMT

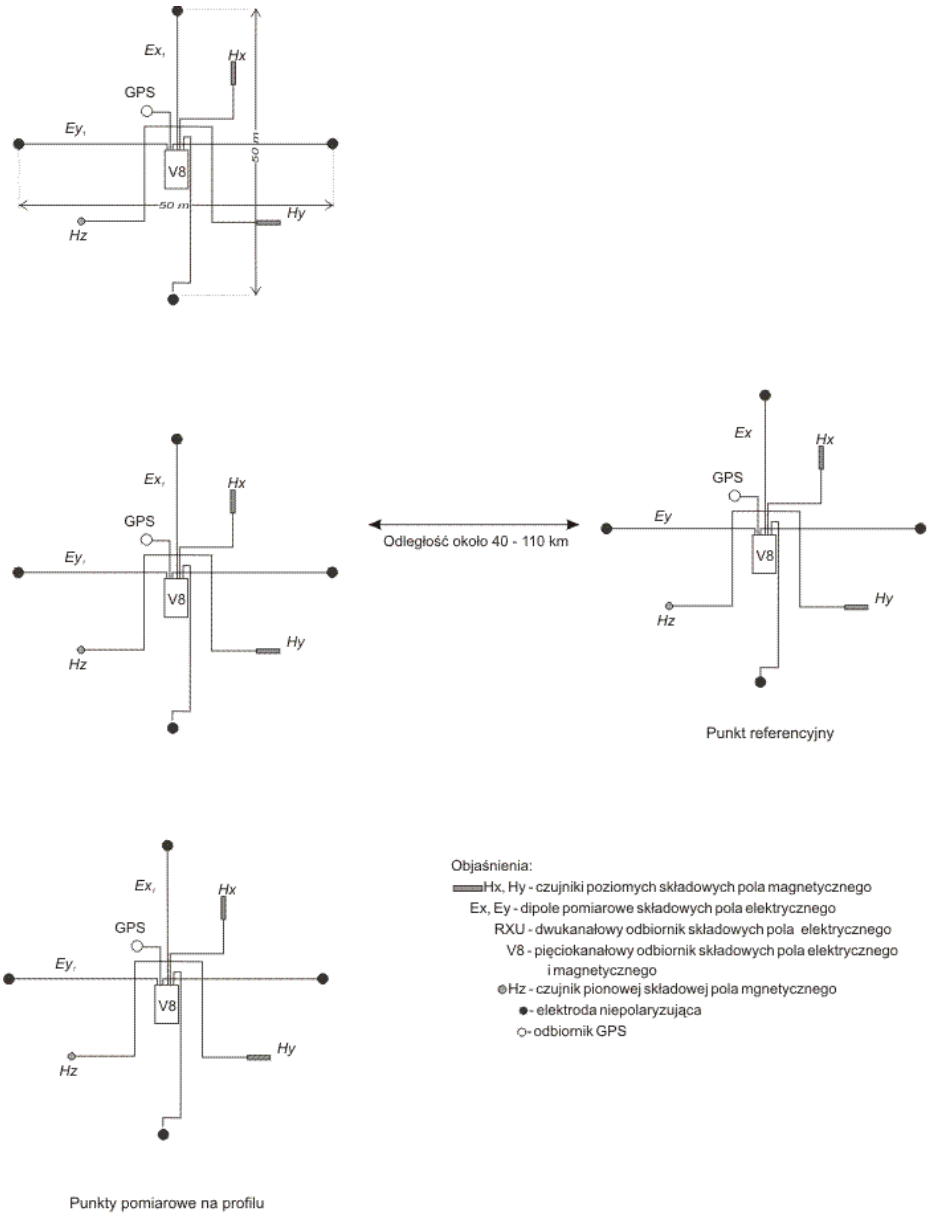


Fig. 1.1.18_21 Schemat układu pomiarowego sondowań AMT/MT

Monitoring metodą elektrooporową

Przedmiotem projektu będą nowatorskie w Polsce badania niezbędne do opracowania i wdrożenia usługi, bezpiecznego i skutecznego rozpoznania skutków ewentualnej migracji dwutlenku węgla w utworach czwartorzędowych.

Prace zrealizowane zostaną za pomocą bezinwazyjnych metod geofizycznych, opartych o dwie metody geoelektryczne, tj. metodę pionowych sondowań geoelektrycznych (SGE) i tomografii elektrooporowej (ERT).

Zakres rzeczowy prac badawczych wykonanych w ramach projektu obejmuje:

- inwentaryzację danych archiwalnych i opracowanie kryteriów wyboru polowych stanowisk badawczych na potrzeby zaprojektowania badań polowych;

- zaprojektowanie i wykonanie badań polowych w postaci pionowych sondowań elektrooporowych i tomografii elektrooporowej w promieniu 500 m od planowanego otworu;

- optymalizację processingu wyników badań geofizycznych;

- opracowanie szczegółowego przestrzennego modelu ośrodka geologicznego w otoczeniu otworu w granicy utworów czwartorzędowych

- określenie związków pomiędzy parametrami geofizycznymi a własnościami gruntu i wód gruntowych, oraz określenie ewentualnie dróg migracji dwutlenku węgla w utworach nieprzepuszczalnych;

- określenie miejsc do ewentualnego monitoringu.

CEL BADAŃ

Z uwagi na wymogi bezpieczeństwa, w rejonie podziemnego zbiornika dwutlenku węgla należy rozważyć występowanie przypowierzchniowych dróg migracji i wtórnych kolektorów gazu.

W przypadku zaistnienia płytkiej migracji dwutlenku węgla, stanowiłyby one drogi migracji pomiędzy wtórnymi kolektorami, a także umożliwiały migrację do powierzchni ziemi.

Dlatego zasadne jest rozpoznanie płytkiej budowy geologicznej, ze szczególnym uwzględnieniem występowania dolinnych rozcięć erozyjnych (współczesnych i kopalnych) oraz występowania warstw izolujących.

Badania płytkiej budowy geologicznej pozwolą na prawidłowe rozmieszczenie składowych systemu monitoringu.

Projekt zakłada przeprowadzanie pomiarów monitorujących przez cały okres eksploatacji składowiska CO2 oraz po zakończeniu w takim samym zakresie prac, przy zachowaniu metodyki, lokalizacji i ilości pomiarów

jak monitoring stanu początkowego. Pierwszy monitoring w trakcie eksploatacji powinien zostać przeprowadzony po 2 latach od rozpoczęcia zatłaczania, a potem co 3 lat. Po zakończeniu zatłaczania należy wykonywać ten sam zakres pomiarów co 5 lat.

OPIS METODY

Metody geofizyczne-geoelektryczne bazują na zjawisku rozchodzenia się prądu elektrycznego w środowisku gruntowo-wodnym.

Dla niniejszego przedsięwzięcia proponuje się wykonać badania w wariancie tomografii elektrooporowej (ERT), oraz pionowych sondowań geoelektrycznych (SGE).

Obydwie metody należą do grupy metod geoelektrycznych wykorzystujących zróżnicowanie przewodności/oporu elektrycznego ośrodka geologicznego. Są to metody powszechnie stosowane w rozpoznaniu utworów czwartorzędowych.

W zmianach wartości oporu elektrycznego odzwierciedlają się dwa najistotniejsze czynniki geologiczne: zróżnicowanie litologii i tektonika.

Utwory geologiczne o dużej zawartości materiału ilastego (np. gliny, iły, margle), charakteryzują się wyraźnie obniżonymi wartościami oporów elektrycznych, w stosunku do utworów piaszczystych.

Zastosowanie metod geofizycznych – elektrooporowych umożliwi rozpoznanie przestrzenne ośrodka geologicznego, w szczególności wydzielenie wysokooporowych utworów piaszczystych, piaszczysto żwirowych, należących do utworów przepuszczalnych i utworów niskooporowych (gliniastych, ilastych) zaliczanych do utworów nieprzepuszczalnych. Wiedza o przestrzennym położeniu tych utworów określi ew. drogi migracji dwutlenku węgla do powierzchni ziemi.

Badania elektrooporowe

Badania elektrooporowe w wersji SGE są najczęściej stosowaną metodą geofizyczną w zagadnieniach związanych z problematyką rozpoznania osadów czwartorzędowych. Pozwalają na wydzielenie głębokości zalegania oraz określenie oporności właściwej kompleksów litologicznych. Korelacja wyinterpretowanych kompleksów elektrooporowych z opornościami typowymi dla poszczególnych typów litologicznych pozwala na interpretację geologiczną wyników badań.

Metoda sondowań geoelektrycznych-elektrooporowych (SGE) polega na wykorzystaniu zjawiska przepływu stałego prądu elektrycznego przez ośrodek geologiczny, które umożliwia określenie zróżnicowania oporu elektrycznego różnych typów litologicznych skał, składających się na warstwy ośrodka geologicznego, z uwzględnieniem warunków ich występowania.

Sondowania SGE obejmują pomiary oporności elektrycznej ośrodka przy zastosowaniu zmiennych długości (rozstawów) układu pomiarowego. Bezpośrednimi wielkościami podlegającymi pomiarom są: natężenie prądu „I” w obwodzie zasilającym „AB”, spadek napięcia „V” w obwodzie pomiarowym „MN”.

Na podstawie analitycznych związków między zmierzonym oporem pozornym a wartościami oporu rzeczywistego i miąższościami poszczególnych warstw istnieje możliwość określenia budowy geologicznej.

Sondowania najczęściej wykonuje się w czteroelektrodowym symetrycznym układzie Schlumbergera.

Maksymalne rozstawy elektrod zasilających należy dobrać tak, aby uzyskać zasięg głębokościowy gwarantujący sięgnięcie do spągu utworów czwartorzędowych.

Przyjmuje się, iż głębokość (zasięg głębokościowy metody) w przybliżeniu można opisać zależnością H=AB/6. Przez AB rozumiemy maksymalny rozstaw elektrod zasilających.

Tomografia elektrooporowa

Tomografia elektrooporowa, jest jedną z młodszych metod geoelektrycznych, powstałych niejako poprzez połączenie sondowań i profilowań geoelektrycznych.

W tomografii elektrooporowej pomiary mogą odbywać się na całej długości profilu w jednym procesie kontrolowanym przez aparaturę pomiarową. Wszystkie elektrody rozmieszczane są przed rozpoczęciem pomiarów wzdłuż całego badanego odcinka w stałych odległościach względem siebie. W trakcie pomiarów system mikroprocesorowy sukcesywnie uaktywnia odpowiednie grupy elektrod zgodnie z wybranym przez operatora układem pomiarowym. W efekcie wyniki profilowania rejestrowane są wzdłuż rozstawu pomiarowego ze szczegółowością odpowiadającą odległości rozmieszczonych elektrod.

Metoda ERT posiada wysoką szczegółowość pomiarów, pozwalającą na quasi ciągłe śledzenie zmian oporności lub przewodności elektrycznej badanego ośrodka, posiada też możliwość swobodnego wyboru i przełączania schematów układów pomiarowych bez konieczności zmiany położenia elektrod w istniejącej linii profilowania spośród układów najczęściej stosowanych w badaniach elektrooporowych. Pomiar oporności wzdłuż rozstawu pomiarowego odbywa się automatycznie pod kontrolą oprogramowania firmowego zapisanego w pamięci aparatury.

Zasięg głębokościowy metody tomografii elektrooporowej jest pochodną długości stosowanych rozstawów pomiarowych oraz w pewnym stopniu topografii terenu. Przyjmuje się, iż zasięg głębokościowy metody jest wynosi ok. 1/5 długości rozstawu.

W badaniach elektrooporowych wykonanych na potrzeby niniejszego przedsięwzięcia rozstaw elektrod powinien wynosić od 5 do 10 m wzdłuż linii profilu.

ZAŁOŻENIA METODYCZNE PROJEKTOWANYCH BADAŃ.

Projektowane badania obejmują prace terenowe oraz analizę wyników i ich interpretację geologiczną:

W przypadku prac terenowych przewiduje się wykonanie dla każdego z wyznaczonych do zatłaczania otworów następujący zakres prac:

1) W rejonie każdego otworu zatłaczającego przewiduje się wykonanie badań metodą pionowych sondowań elektrooporowych, w regularnej siatce, o oczku (odległości pomiędzy poszczególnymi

sondowaniami) siatki 100m. Badania takie powinny objąć w przybliżeniu teren o kształcie kwadratu równobocznego o boku 1000 m, którego środek wyznaczy planowany otwór. Maksymalny rozstaw elektrod AB powinien umożliwić śledzenie stropu utworów podczwartorzędowych.

2) W rejonie każdego otworu zatłaczającego przewiduje się wykonanie badań metodą tomografii elektrooporowej. Przewiduje się wykonanie 10 równoległych profili o długości 1000 m, odległych od siebie o 100 m. Badania takie powinny objąć 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.

Na podstawie wykonanych pomiarów powinien zostać stworzony model przestrzenny uwzględniający występowanie potencjalnych wtórnych kolektorów i dróg migracji w pobliżu otworów zatłaczających oraz w ich otoczeniu w miejscach występowania potencjalnych dróg płytkiej migracji.

Geofizyczne metody elektrooporowe, z uwagi na głębokość wymaganej prospekcji, oraz jednoznaczność rozróżniania skał porowatych od nieprzepuszczalnych doskonale nadają się do przeprowadzenia proponowanych badań.

Badania geofizyczne powinny zostać powiązane z wykorzystaniem niezbędnych otworów piezometrycznych, potrzebnych do kalibracji i weryfikacji geofizyki

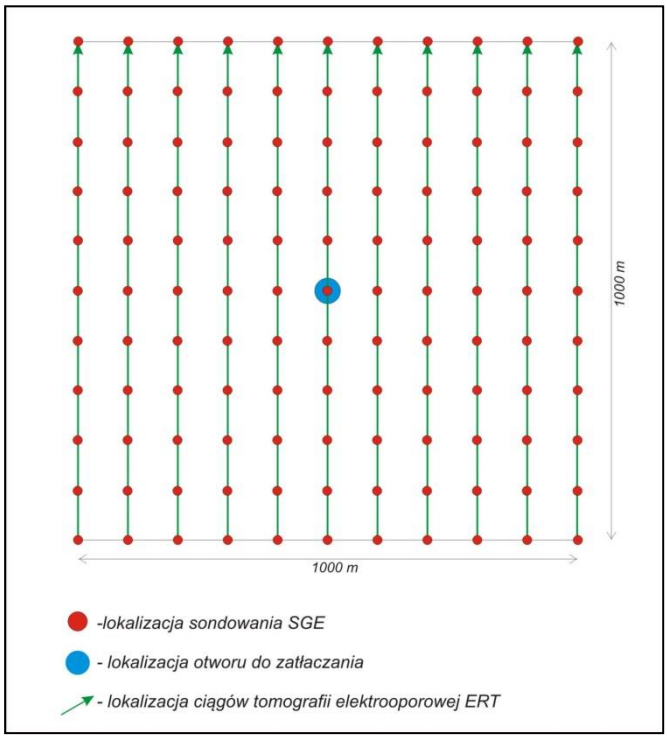


Fig. 1.1.18_22 Schemat badań geofizycznych przy otworach zatłaczających

PRACE DOKUMENTACYJNE

Proponowane prace dokumentacyjne będą składać się z trzech etapów: przygotowawczego, akwizycji danych oraz etapu interpretacji pomiarów i interpretacji geologicznej.

Etap przygotowawczy

Na podstawie map topograficznych zostanie wyznaczona siatka pomiarowa obejmująca, w zależności od przyjętego wariantu prac, rejon otworów zatłaczających lub cały obszar składowiska z zagęszczeniem siatki pomiarowej w rejonach otworów zatłaczających.

W sąsiedztwie otworów zatłaczających (kwadrat o boku 1 km ze środkiem w miejscu otworu zatłaczającego) siatka pomiarowa zostanie wyznaczona co 100 m i profilami pomiarowymi tomografii elektrooporowej również co 100 m. Założona siatka zostanie przeanalizowana i zmodyfikowana pod kątem możliwości wykonania pomiarów. Na podstawie materiałów topograficznych zostaną wyliczone współrzędne topograficzne punktów pomiarowych, które posłużą do lokalizacji w terenie z użyciem odbiorników GPS.

Akwizycja danych

Pomiary SGE zostaną wykonane w miejscach zaplanowanych przy pomocy standardowej procedury sondowań geoelektrycznych, symetrycznym układem Schlumbergera, o maksymalnym rozstawie linii zasilającej AB do 320 m, zapewniającym zasięg głębokościowy nie mniejszym niż 50 m., z użyciem stałoprądowej cyfrowej aparatury typu AGD-04 zasilanej akumulatorami z przetwornicą prądu stałego i typowym osprzętem pomiarowym, na który składają się elektrody uziemiające, oraz kable pomiarowe i podłączeniowe.

W metodzie tomografii elektrooporowej wykorzystana zostanie aparatura ARES produkcji czeskiej firmy GF Instruments. Pomiary wykonane zostaną w układzie elektrod wg. schematu Schlumbergera. Wytyczone profile pomierzone zostaną z odstępem elektrod wzdłuż linii profilu wynoszącym 5 m. W pomiarach zasięg głębokościowy rozpoznania oporności ośrodka wyniesie do 70-80 m głębokości względem powierzchni terenu. W metodzie tomografii elektrooporowej pomiar oporności wzdłuż rozstawu pomiarowego odbywa się automatycznie pod kontrolą oprogramowania firmowego zapisanego w pamięci aparatury.

Interpretacja

Interpretacja uzyskanych rezultatów, krzywych pomiarowych SGE wykonana zostanie metodą modelowania matematycznego z wykorzystaniem specjalistycznego oprogramowania komputerowego IPI2win. W rezultacie interpretacji określone zostaną granice warstw różniących się opornością elektryczną i wartości tej oporności w poszczególnych, wydzielonych warstwach.

Do przetwarzania danych tomografii elektrooporowej wykorzystany będzie program Res2Dinv firmy Geotomo Software. Wyniki pomiarów metodą tomografii elektrooporowej, standardowo przedstawiane są w postaci przekrojów izoliniowych, obrazujących zmiany oporności w badanym ośrodku w układzie 2D: odległość wzdłuż linii profilowania i głębokość względem powierzchni badań.

Na podstawie prac archiwalnych i otworów geologicznych, określone zostaną szacunkowe przedziały oporności odpowiadające kompleksom litologicznym. Przyporządkowanie to będzie podstawą do interpretacji geologicznej rezultatów badań SGE i ERT.

Na podstawie danych geofizycznych zaproponowany zostanie przestrzenny model płytkiej budowy geologicznej, zaprezentowany jako seria przekrojów geofizycznych z interpretacją geologiczną, oraz jako baza danych GIS.

HARMONOGRAM ORAZ KOSZTORYS PRAC

Rozpoznanie budowy geologicznej przy otworach zatłaczających:

- SGE w siatce co 100 m (121 SGE), w sumie ilość otworów zatłaczających x 121 SGE, 500 zł za sondowanie – ilość otw. x 121 x 500,

- Ilość otworów zatłaczających, profile ERT co 100 m (11 km ERT), w sumie ilość otworów zatłaczających x 11 km ERT, 8000 zł za 1 kmb profilu.

Proponowane prace geoelektryczne w tym systemie badań przy czterech otworach zatłaczających wyniosły by ok. 594 000 zł.

Przewidywany okres prac terenowych ok. 2 miesiące, interpretacja danych pomiarowych 2 miesiące, opracowanie dokumentacji 1 miesiąc – łącznie 5 miesięcy.

Cena obejmuje stworzenie przestrzennego modelu płytkiej budowy geologicznej.

Projekt wiercenia i wyposażenia otworów ISKRZYCZYN 1 i ISKRZYCZYN 2i (PIG-PIB & AGH)

(Adam Wójcicki, Janusz Jureczka)

(Stanisław Nagy, Andrzej Gonet)

Cel wiercenia, lokalizacja i planowana głębokość otworu Iskrzyczyn 1 i Iskrzyczyn 2i

Cel – otwór badawczy Iskrzyczyn 1 i otwór Iskrzyczyn 2i do zatłaczania dwutlenku węgla.

Lokalizacja wiercenia otworu Iskrzyczyn 1: X(N)=221134; Y(E)=817408 (Układ 1965).

Projektowana głębokość – 1450 m ± 10% (przystropowa część karbonu górnego).

Otwór Iskrzyczyn 2i planowany jest w promieniu 50 m od otworu Iskrzyczyn 1 i o głębokości 1170m ± 10%.

Na całej długości wierconych otworów dopuszcza się maksymalny kąt odchylenia od osi pionowej 1° przy czym maksymalny przyrost kąta odchylenia nie powinien przekraczać 1°/30 m. W czasie wiercenia należy wykonywać punktowo pomiary kąta odchylenia i azymutu inklinometrem wrzutowym co ok. 100 m oraz przed każdym wyciąganiem przewodu. Uwaga! W celu pomiaru azymutu należy w zestawie przewodu wiertniczego umieścić obciążnik niemagnetyczny. Profil otworów oraz zwiercalność skał zostały podane w **Tab. 1.1.18_6.**

Tab. 1.1.18_6 Przewidywany profil stratygraficzno-litologiczny otworu wraz z kategorią zwiercalności skał

Głębokość	Stratygrafia	Kategoria zwiercalności
0 – 6 m	czwartorzęd – mułki i gliny	kat. 1-2
- 650 m	kreda + paleogen (nasunięcie karpackie) – łupki i mułowce margliste, rzadziej piaskowce, podrzędnie wapienie	kat. 3-4
- 1020 m	miocen, formacja skawińska – mułowce margliste, rzadziej iłowce; cienkie przewarstwienia piaskowców	kat. 3-4
- 1160 m	miocen, warstwy dębowieckie – piaskowce i zlepieńce różnoziarniste	kat. 3-4
- 1380 m	miocen, warstwy zamarskie – olistolity i olistostromy fliszu karpackiego (łupki, mułowce, margle, brekcje) z przewarstwieniami zlepieńców i żwirowców, w stropie możliwe głazowisko	kat. 3-4(5)

- 1390 m	miocen, warstwy kłodnickie - brekcja skał	kat. 3-4(5)
- 1450 m	karbon górny (utwory węglonośne) - seria paraliczna: mułowce, piaskowce, iłowce, pojedyncze cienkie warstwy węgla i łupku węglowego	kat. 3-4

Zarurowanie i cementowanie otworu

Podstawowe dane dotyczące zarurowania i zacementowania otworów podano w **Tabeli 1.1.18_7.**

Tab. 1.1.18_7 Zarurowanie i cementowanie otworów

Średnica rur	**Średnica [mm]**	**Głębokość**	**Cementowanie**
13 3/8''	438	0-12 m	Cementowane do wierzchu
9 5/8''	311	0-655 m	Cementowane do wierzchu
7''	216	0-1040 m	Cementowane do wierzchu +paker zewnętrzny
liner 4 ½	149	940-1450 m (otwór badawczy) 940-1170m (otwór iniekcyjny)	

Wszystkie horyzonty wodonośne powyżej powinny być zamknięte przed zakończeniem wiercenia. Proces cementowania powinien być przeprowadzony w sposób uniemożliwiający przepływ CO_2 poza rurami do izolowanych horyzontów, zarówno po rozpoczęciu wiercenia jak i w długim okresie po zakończeniu zatłaczania.

Przewidywane występowanie horyzontów

W utworach czwartorzędu oraz kredy + paleogenu (nasunięcie karpackie) przewiduje się występowanie wód gruntowych oraz horyzontów nasyconych wodami słodkimi.

W utworach miocenu (formacja skawińska, warstwy dębowieckie, zamarskie) przewiduje się występowanie horyzontów nasyconych wodami słonawymi i solankami.

Nie wyklucza się występowania horyzontów nasyconych w ilościach śladowych węglowodorami (warstwy dębowieckie) oraz spągowa część formacji skawińskiej na kontakcie z warstwami dębowieckimi).

Przewidywane występowanie gazów toksycznych

W profilu projektowanego otworu nie przewiduje się występowania gazów toksycznych.

Przewidywane gradienty ciśnienia złożowego w profilu projektowanego otworu

W projektowanym profilu otworu przewiduje się występowania gradientów ciśnienia złożowego w zakresie: 0,09-0,10 MPa/10 m.

Przewidywane gradienty ciśnienia szczelinowania w profilu projektowanego otworu

W profilu otworu przewiduje się następujących występowanie gradientów ciśnienia szczelinowania:

w interwale 0-120 m - 0,170-0,200 MPa/10 m.

w interwale 120-1450 m - 0,180-0,240 MPa/10 m.

Przewidywane właściwości zbiornikowe oraz gradienty ciśnień złożowych i szczelinowania warstw chłonnych w profilu otworu przedstawiono w **Tabeli 1.1.18_8.**

Tab. 1.1.18_8 Przewidywane właściwości zbiornikowe oraz gradienty ciśnień złożowych i szczelinowania warstw chłonnych

Poziom zbiornikowy	Porowatość (%)[średnia]	Przepuszczalność (mD)[średnia]	Gradient ciśnienia	
			Złożowego (MPa/10m)	Szczelinowania (MPa/10m)
miocen – warstwy dębowieckie	**0 – 28 [10]**	**0 – 415 [39]**	**0,09 – 0,10**	**0,18 – 0,22**
miocen – warstwy zamarskie	0 - 20	0 - 200	0,09 – 0,10	0,18 – 0,22

Przewidywane trudności w czasie wiercenia

W trakcie przewiercania klastycznych utworów czwartorzędu i stropowej części nasunięcia karpackiego (kreda+paleogen) przewiduje się możliwość obsypywania, kawernowania i zaciskania ściany otworu.

W trakcie przewiercania klastycznych utworów nasunięcia karpackiego (kreda+paleogen) oraz miocenu (formacja skawińska, warstwy dębowieckie) przewiduje się możliwość zaników płuczki w poziomach piaskowcowych o dobrych parametrach zbiornikowych.

W przypadku przewiercania niżej zalegających klastycznych utworów miocenu wykształconych jako głazowiska (strop warstw zamarskich) lub brekcje/zwietrzelina (warstwy kłodnickie) przewiduje się możliwość obsypywania, kawernowania i zaciskania ściany otworu oraz możliwość zaników płuczki w poziomach piaskowcowych o dobrych parametrach zbiornikowych.

Projektowane pobieranie prób okruchowych

Projektuje się w obu otworach pobierać próbki okruchowe w interwałach nierdzeniowanych co 10 m, a od głębokości 500 m co 5 m.

W zakresie głębokości ok. 655-1450 m, w przypadku niemożności pobrania rdzenia w jakimkolwiek odcinku, należy pobierać próby okruchowe z tych odcinków co 3 m. Z każdej głębokości należy pobrać: próbkę 500 g, nieprzemytą i wysuszoną.

W całym profilu otworu należy pobierać co 30 m 2 próbki po 100 g, przemyte i wysuszone do badań geochemicznych. Próby okruchowe powinny być przechowywane w odpowiednio przygotowanych skrzynkach. Skrzynki powinny być opisane czytelnie i trwale na boku, wierzchu i szczycie. Każda skrzynka powinna zawierać nazwę otworu oraz interwał, z którego pobrano próby okruchowe. Zarówno na wiertni jak i podczas transportu, skrzynki muszą być przykryte wieczkami.

Projektowane rdzeniowanie

W otworze **Iskrzyczyn 1**projektuje się rdzeniowanie w następujący sposób interwałów:

Rdzeniowanie ciągłe:

- poziom uszczelniający (formacja skawińska),

- poziom zbiornikowy główny (warstwy dębowieckie),

- poziom zbiornikowy drugorzędny (warstwy zamarskie),

- warstwy kłodnickie,

- karbon górny – seria para liczna.

Rdzenie powinny być układane do znormalizowanych (o długości 1 m) pojedynczych lub podwójnych skrzynek, przestrzegając ułożenia rdzenia „góra-dół”. Skrzynki powinny być opisane czytelnie i trwale na boku, wierzchu i szczycie. Opis powinien zawierać numer i nazwę otworu, numer kolejny skrzynki, numer marszu, głębokość (od-do). Rdzeń kruchy, niewypełniający skrzynki, należy unieruchomić przegródkami o

opisanych głębokościach. Zarówno na wiertni jak i podczas transportu, skrzynki muszą być przykryte wieczkami.

Uwaga: Przewiduje się możliwość zmiany zakresu rdzeniowania w zależności od faktycznie przewiercanego profilu geologicznego i facjalnego rozwoju warstw oraz bieżących ustaleń z osobami nadzoru prac geologicznych i autorami projektu. Prawdopodobnie w otworze iniekcyjnym odcinki rdzeniowania będą znacznie ograniczone.

W otworze **Iskrzyczyn 2i** nie przewiduje się rdzeniowania.

Przekazanie i przechowywanie rdzeni wiertniczych oraz prób okruchowych

Rdzenie wiertnicze oraz próby okruchowe powinny zostać zabezpieczone i przekazane odpowiedniemu organowi administracji geologicznej zgodnie z:

- art. 45. Prawa geologicznego i górniczego z 4 lutego 1994 r.

- art. 1. Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 19 grudnia 2001 r. w sprawie sposobu i zakresu wykonywania obowiązku udostępniania i przekazywania informacji oraz próbek organom administracji geologicznej przez wykonawcę prac geologicznych

- art. 2, 3, 4, 6 Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 19 grudnia 2001 r. w sprawie gromadzenia i udostępniania próbek i dokumentacji geologicznych.

Po zakończeniu wiercenia skrzynki z pozyskanym rdzeniem wiertniczym oraz próbami okruchowymi zostaną przewiezione do magazynu rdzeni Państwowego Instytutu Geologicznego lub innego wskazanego przez Ministra Środowiska.

Zakres badań laboratoryjnych:

- Powierzchniowe zdjęcia gazowe oraz monitoring środowiska naturalnego w strefie odwiertu przed rozpoczęciem i po ukończeniu wiercenia,

- Badania własności fizycznych i chemicznych próbek rdzeni,

- Analizy mikrofaunistyczne, w utworach karbonu również makroflorystyczne, miosporowe oraz makrofunistyczne,

- Analizy petrograficzne,

- Analizy wód złożowych,

- Analizy płuczki i płynów porównawczych,

- Badanie parametrów zaczynu i kamienia cementowego.

- Analizy petrograficzne, analizy geochemiczne, analizy mikrofaustyczne, inne badania rdzeni i kamienia cementowego poddanego oddziaływaniu CO2 powinny zostać wykonane po pobraniu rdzeni; analizy wód złożowych powinny zostać wykonane bezzwłocznnie po oczyszczeniu odwiertu zgodnie z wytycznymi zawartymi w pracy „Zasady i metodyka dokumentowania zasobów wód termalnych i energii, 1997".

Zakres badań geofizycznych

ODC. I - w interwale 0-655 m przed zapuszczeniem kolumny rur 9 5/8"

profilowanie średnicy – XYC

profilowanie krzywizny - DEV

profilowanie oporności

profilowanie akustyczne - BSC

profilowanie gęstości - CDL

profilowanie gamma - GR

profilowanie porowatości neutronowej - CNT

profilowania - DIL + LL3 + PS

obliczenie objętości otworu pod rury 13 3/8"

ODC. II - w interwale 655-1040 m przed zapuszczeniem kolumny rur 7"

profilowanie średnicy - XYC

profilowanie krzywizny - DEV

profilowanie oporności - DLL + PS, MSFL

profilowanie gęstości - CDL

profilowanie gamma - GR

profilowanie porowatości neutronowej - CNT

cementomierz akustyczny w rurach 9 5/8" - RBT

obliczenie objętości otworu pod rury 7"

ODC. III - w interwale 1030 -1450 m (1170m dla otworu iniekcyjnego) przy głębokości końcowej otworu

profilowanie gamma spektrometryczne - SCR

profilowanie średnicy profilowanie krzywizny - DEV

profilowanie akustyczne - BCS

profilowanie gęstości profilowanie gamma - GR

profilowanie - DLL + PS, HRAI + PS

profilowanie porowatości neutronowej - CNT

profilowanie temperatury - BHTP

cementomierz akustyczny w rurach 7''

profilowanie gamma - GR

opcjonalnie: profilowanie neutron -gamma spektrometryczne SGR

opcjonalnie: rezonans magnetyczny MRL

opcjonalnie: dipolowa sonda akustyczna z orientacją przestrzenną

opcjonalnie: skaner opornościowy ultradźwiękowy XRMI

opcjonalnie: skaner akustyczny Borehole Telev.

próbniki (typu RTF lub MFT) (dla określenia zmienności poziomej i pionowej przepuszczalności, ciśnienia złożowego oraz poboru próbek wody złożowej m.in. do badań RSA).

Po osiągnięciu głębokości końcowej i wykonaniu końcowych pomiarów geofizycznych przewiduje się opcjonalnie wykonanie pomiarów sejsmometrycznych „time lapse" VSP.

Końcowe średnice otworów

Końcowe średnice wierconych otworów wynosić będą 149 mm.

Przewidywane opróbowania w czasie i po ukończeniu wiercenia

Opcjonalnie przewiduje się badania mikroszczelinowania (minifrac) dla warstwy zatłaczającej CO2 i uszczelnienia

Przewiduje się badania próbnikiem typu RST – celem poboru wody do analizy RSA oraz innych analiz, określenie ciśnienia porowego i zgrubną estymację przepuszczalności pionowej i poziomej

W przypadku stwierdzenia dobrej przepuszczalności warstwy chłonnej i jej stabilnej budowy otwór nie musi być poszerzany ani filtrowany.

Udostępnione poziomy przewiduje się opróbować próbnikami złoża.

Zakres głębokościowy pracy laboratorium kontrolno - pomiarowego

Projektuje się pracę laboratorium kontrolno-pomiarowego w interwale od ok. 655 m (rozpoczęcie wiercenia) pod butem rur 9 5/8" do końcowej głębokości otworu.

Szczegółowy projekt konstrukcji otworów

Obecnie przyjmuje się, że kolektorami, do których może być zatłaczane CO2 są warstwy dębowieckie (dolny miocen) zbudowane z piaskowców i zlepieńców położonych w głębokości od 1020 m do 1160 m p.p.t. Rezerwową warstwą są piaskowce i żwirowce warstw zamarskich, które stanowią niewielką część tejże formacji.

Mając na względzie bezpieczeństwo planowanych prac i rejonu zaprojektowano otwory, których konstrukcja powinna być szczelna i wytrzymała przez bardzo długi okres czasu przy równoczesnym zapewnieniu skutecznego wtłaczania CO_2 otworem Iskrzyczyn 2i w dolnomioceński kolektor charakteryzujący się porowatością w granicach 0 – 28% i przepuszczalnością od 0 do 400 mD. Konstrukcje obu otworów są bardzo podobne i różnią się jedynie głębokością końcową.

Po przygotowaniu terenu wiertni i kolaudacji należy wykonać otwór świdrem o średnicy 17 ¼" (438 mm) i zapuścić do otworu kolumnę wstępną o średnicy 13 3/8" najlepiej do warstwy ilastej położonej na głębokości 6–12 m (czwartorzęd i strop jego podłoża). Wskazane jest ją zacementować do wierzchu i po stójce na związanie zaczynu dalsze wiercenie otworu wskazane jest realizować stosując świder o średnicy 12 ¼ " (311 mm). Po dowierceniu do głębokości 655 m tj. po przewierceniu nasunięcia karpackiego zakłada się zapuszczenie do otworu kolumny rur okładzinowych o średnicy 9 5/8" i zacementowanie jej do wierzchu.

Kolejna średnica świdra powinna wynosić 8 ½ " (216 mm) i otwór należy wiercić do osiągnięcia głębokości 1040 m (10-20 m poniżej spągu serii uszczelniającej). W ten odcinek otworu zaleca się zapuścić kolumnę rur okładzinowych 7" z pakerem zewnętrznym i uszczelnić ją na całej długości zaczynem cementowym odpornym na CO2. Do zasadniczych warstw, w które może być wtłaczany CO_2 w otworze Iskrzyczyn 2i oraz poniżej, do głębokości 1450 m ppt (seria para liczna – otwór Iskrzyczyn 1) trzeba dowiercić otwór świdrem o średnicy 5 7/8"(149 mm) i/lub aparatem rdzeniowym. Planuje się zapuścić do otworu kolumnę rur traconych szlicowanych na odcinku, którego długość zostanie ustalona po odwierceniu otworu do końcowej głębokości. Zakłada się średnicę rur 4 1/2" z minimalną zakładką 100m w rurach okładzinowych 7". Ze względu na możliwy kontakt tej kolumny rur z CO_2 zaleca się, aby była ona odporna na CO_2. To samo dotyczy zaczynu uszczelniającego. Ponadto dla poprawienia szczelności układu otwór zatłaczający – górotwór kolumna rur musi być wyposażona w paker zewnętrzny odporny na CO_2.

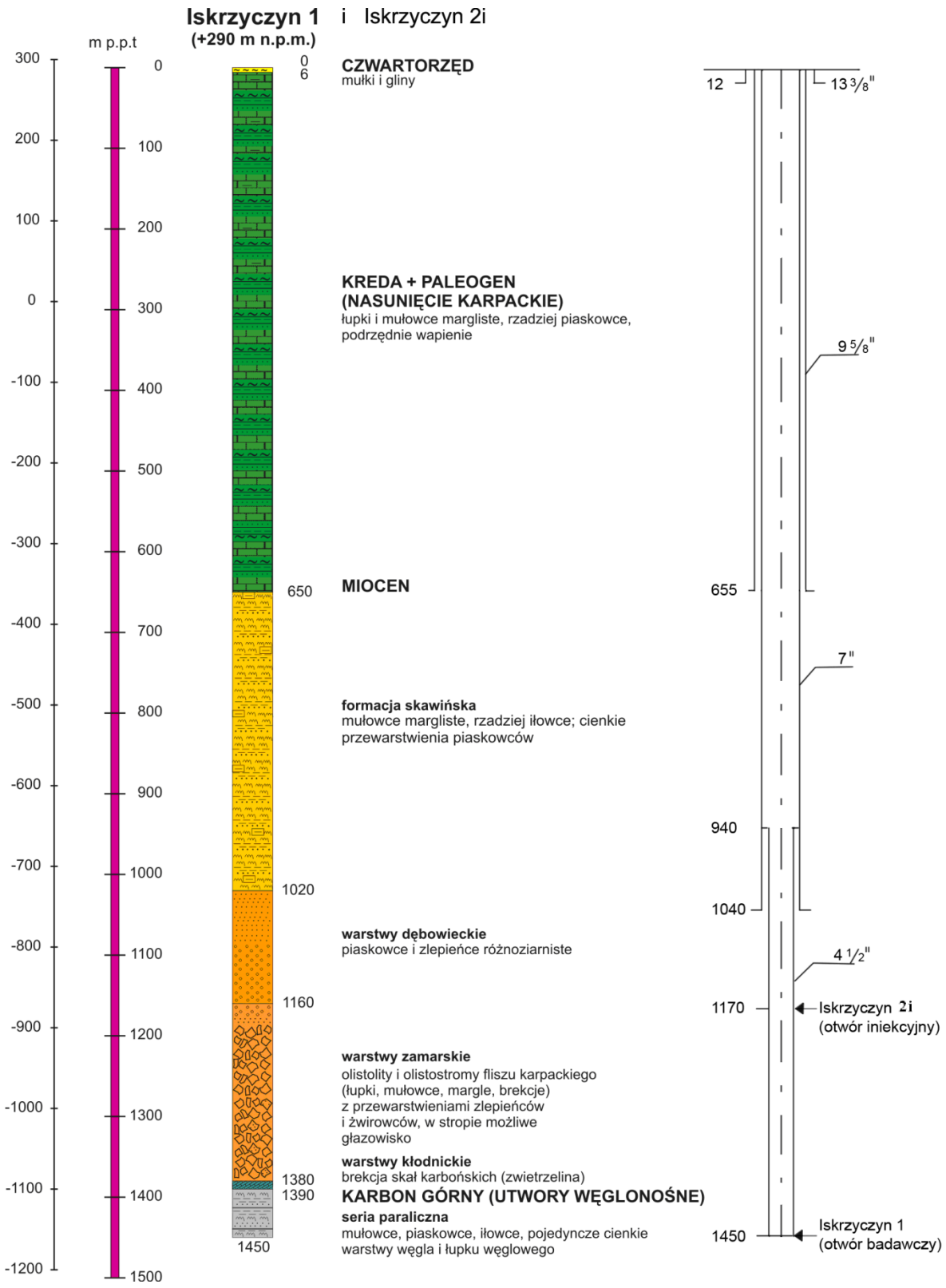


Fig. 1.1.18_23 Schemat zarurowania otworów Iskrzyczyn 1 i Iskrzyczyn 2i

Ponadto w zależności od rozpoznania górotworu otworem badawczym zasadnicze warstwy izolacyjne i chłonne mogą być rdzeniowane. Na podstawie aktualnego rozpoznania geologiczno-złożowego sugeruje się, że priorytet w zatłaczaniu CO_2 powinna mieć formacja warstw dębowieckich. Oznacza to, że otwór iniekcyjny powinien sięgać 10m poniżej spągu warstw dębowieckich gdzie planuje się umieścić rurę podfiltrową.

Schemat konstrukcji wspólny dla otworu badawczego (obserwacyjnego – Iskrzyczyn 1) oraz otworu iniekcyjnego (do zatłaczania CO2 – Iskrzyczyn 2i) przedstawiono na **Fig. 1.1.18_23.**

Do właściwego zrealizowania otworu konieczne jest odpowiednie dobranie płuczki. Stąd na podstawie rozeznania rejonu wierceń proponuje się zastosowanie płuczek o poniższych parametrach w wyróżnionych interwałach.

Podstawowe parametry płuczki:

Interwał 0 – 655 m / płuczka bentonitowa /

gęstość	1,05 – 1,15 g/cm^3
filtracja	poniżej 20 ml/0,7 MPa/30 min.
lepkość plastyczna	możliwie niska
granica płynięcia	12 -15 Pa
pH	9,0 -11,0

Interwał 655 – 1040 m płuczka polimerowo - potasowa

gęstość	1,10 - 1,20 g/cm^3
filtracja	poniżej 6 ml/0,7 MPa/30 min
lepkość	plastyczna: możliwie niska
granica płynięcia	7-14 Pa (w temperaturze 50 ^{0}C)
K^+	około 60 g/l KCL (25-30 g/l K^+)
pH	7,5-9,0

Interwał 1040 – 1450 m (1170m dla otworu iniekcyjnego) płuczka polimerowo-potasowa z blokatorami

gęstość:	1,05 - 1,10 g/cm^3
filtracja API:	do uzyskania filtracji HTHP
filtracja HTHP:	pon.10 ml/30 min. (90 ^{0}C, ciśn. różnicowe 35 at)

lepkość plastyczna: możliwie niska

K^+ około 60 g/l KCL (25-30 g/l K^+)

granica płynięcia: 9 – 11 Pa

blokator węglanowy 60-100 kg/m^3

pH: 8,5 – 10,0

Interwał 0 - 655 m płuczka bentonitowa

Receptura płuczki:

Bentopol - 50 kg/m^3

NaOH - 2 kg/m^3

CMC LV - 8 kg/m^3

Detergent W - 2 kg/m^3

$NaHCO_3$ - wg. potrzeb

Gips - wg. potrzeb

Interwał 655 – 1040 m płuczka polimerowo-potasowa

Receptura płuczki:

KCL - 60 kg/m^3

PHPA - 4 kg/m^3

NaOH - 2 kg/m^3

CMC LV - 10 kg/m^3

Skrobia - 10 kg/m^3

PAA - 3 kg/m^3

PAC - w miarę potrzeb

Detergent W - w miarę potrzeb

Biostat - w miarę potrzeb

Blokator węgl. - przy wystąpieniu zaników płuczki

CMC HV - w miarę potrzeb

$NaHCO_3$ - „

Na_2CO_3 - „

XCD - „

Defpol - w miarę potrzeb

Interwał 1040 – 1450m (1170m dla otworu iniekcyjnego) płuczka polimerowa-potasowa z blokatorami

Receptura płuczki:

KCl - 60 kg/m^3

NaOH - 2 kg/m^3

Filter-chek - 20 kg/m^3

XCD - 2 kg/m^3

PAC - 3 kg/m^3

Blokator - do uzyskania ciężaru

Blokator organiczny – wg. potrzeb

Odpieniacz - w miarę potrzeb

Biocyd - wg.potrzeb

Polimer HPHT - 3 kg/m^3

Również ważnym czynnikiem prac wiertniczych jest dobór odpowiednich zaczynów uszczelniających. Na obecnym poziomie rozpoznania problemu dla otworu Iskrzyczyn 1 proponuje się receptury zaczynów podane poniżej.

Rury 9 5/8" (0 – 655 m cdw.) Cementowanie przez przewód wiertniczy.

Przed zaczynem wtłoczyć przemywkę w ilości około 5 m^3

SKŁAD ZACZYNU CEMENTOWEGO:

Cement wiertniczy G - 100%

CaCl2 - 3%

PSP 061 - 0,3%

Gęstość zaczynu – 1,8 g/cm3 w/c – 0,5

Wytrzymałość kamienia cem. około – 10 MPa

Rury 7” (0 – 1040 m cdw.) Cementowanie jednostopniowe z użyciem dwóch klocków cementacyjnych.

Przed zaczynem wtłoczyć przemywkę w ilości około 6 m^3

SKŁAD ZACZYNU CEMENTOWEGO ODPORNEGO NA KOROZJĘ CO2:

CO2 R MIX* - 100%

KCl - 3%

PSP 031 - 0,17%

PSP 042 - 0,17%

PSP 061 - 0,4%

Gęstość zaczynu – 1,86 g/cm3 w/c – 0,5

Wytrzymałość kamienia cementowego około – 15 MPa

*) CO2 R MIX – mieszanina uszczelniająca odporna na korozję CO2

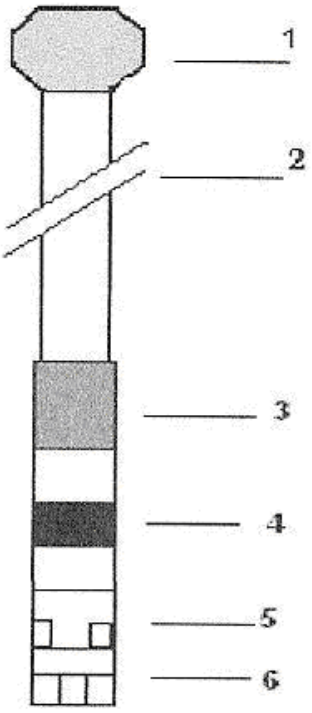


Fig. 1.1.18_24 Schemat uzbrojenia rur 7 ” w otworze do zatłaczania CO_2

Tab. 1.1.18_9 (patrz **Fig. 1.1.18_24)** Schemat uzbrojenia rur 7” w otworze do zatłaczania CO2

L.p.	Nazwa elementu	Śr. zew. mm	Śr. wew. mm	Długość m	Głębokość wierzch m	Głębokość spód m
1	Łącznik posadowy			0,40	0,00	0,40
2	Rury 7” CO2 service	177,80	157,00	1040	0,00	1040
3	Hydrauliczna tuleja cem. 7” TAM CO2 service	210,00		0,69		
4	Paker zewnętrzny 7” ECP TAM CO2 service	209,00	159,40	3,09		
5	Łącznik 7” z alum. siedzeniem pod klocek TAM	194,30		0,37		
6	But 7” z zaworem grzybkowym TAM	194,30		0,48		

Newralgicznym elementem wykonania otworu zatłaczającego CO_2 jest dobranie rur okładzinowych 7”, ich uzbrojenia i technologii uszczelnienia. Stąd niezbędnym warunkiem prowadzenia prac jest wyposażenie rur w hydrauliczną tuleję cementową, paker zewnętrzny, łącznik pod klocek i but z zaworem grzybkowym oraz podwieszenie kolumny rur na więźbie też odpornej na CO_2. Schemat powyższego uzbrojenia kolumny rur okładzinowych przedstawiono na **Fig. 1.1.18_24**.

Po wywierceniu otworów do zaplanowanych głębokości należy je przygotować do monitoringu i do zatłaczania CO2. Szczegółowe schematy uzbrojenia otworów powinny zostać ustalone po ich odwierceniu. Na obecnym etapie prac zwraca się uwagę na konieczność zamontowania filtra z sitem, pakera, tulei cyrkulacyjnej i zaworu bezpieczeństwa. Wskazane jest prowadzenie obserwacji i zatłaczania CO2 przez rury wydobywcze 3 ½” TDS CO2 o grubości ścianki 7,34 mm połączone z głowicą eksploatacyjną także odporną na CO2.

Monitoring sejsmologiczny i metodą tomografii pasywnej (GIG)

(Grzegorz Mutke, Józef Dubiński, Henryk Marcak, Adam Lurka, Krystyna Stec, Jarosław Chećko, Robert Siata, Jacek Chodacki)

Na II półrocze 2010 roku w zadaniu **1.1.18**, dla GIG przewidziano wykonanie programu monitoringu płynów złożowych w obrębie formacji zbiornikowych i uszczelniających dla obiektu w poziomach solankowych w wybranym obszarze w GZW w rejonie Cieszyn-Skoczów-Czechowice. Rejon ten został wybrany po analizie danych geologicznych, jako potencjalne miejsce składowania CO_2 w wodach zasolonych. Główny Instytut Górnictwa miał skoncentrować się w tym zadaniu na opisie ogólnych założeń i celów monitorowania w czasie eksploatacji zbiornika i po jego zamknięciu, podstaw fizycznych monitorowania geofizycznego płynów złożowych, ogólnym opisie metod monitorowania oraz szczegółowym projekcie monitorowania płynów złożowych z wykorzystaniem metody sejsmologicznej na przykładzie kolektora w warstwach dębowieckich – zbiornik Cieszyn-Skoczów-Czechowice.

CHARAKTERYSTYKA WYBRANEGO ZBIORNIKA SKŁADOWANIA CO2 W WARSTWACH SOLANKOWYCH GZW

Zbiornik Cieszyn-Skoczów-Czechowice znajduje się w południowo-zachodniej części GZW ijego bezpośrednim obrzeżeniu, a od swojej zachodniej strony przylega do granicy polsko-czeskiej.

Wybrany obszar składowania CO_2 w warstwach solankowych w rejonie kolektora warstw dębowieckich – zbiornik Cieszyn-Skoczów-Czechowice, przedstawiono na poglądowym rysunku usytuowania otworów iniekcyjnych na tle miąższości utworów dębowieckich (**Fig. 1.1.18_25**).

Przeprowadzono symulacje rozpływu dwutlenku węgla zatłoczonego do poziomów solankowych w warstwach dębowieckich oraz w zalegających poniżej warstwach zamarskich. Symulacja obejmuje zatłaczanie CO2 jednym otworem iniekcyjnym *Iskrzyczyn 1* przez okres 25 lat; ilość zatłaczanego dwutlenku węgla wynosi 450 tys. Mg CO2/rok; cały okres symulacji wraz z obserwacją zatłoczonego CO2 do górotworu wynosił 230 lat (J. Chećko – zadanie **1.1.16**).

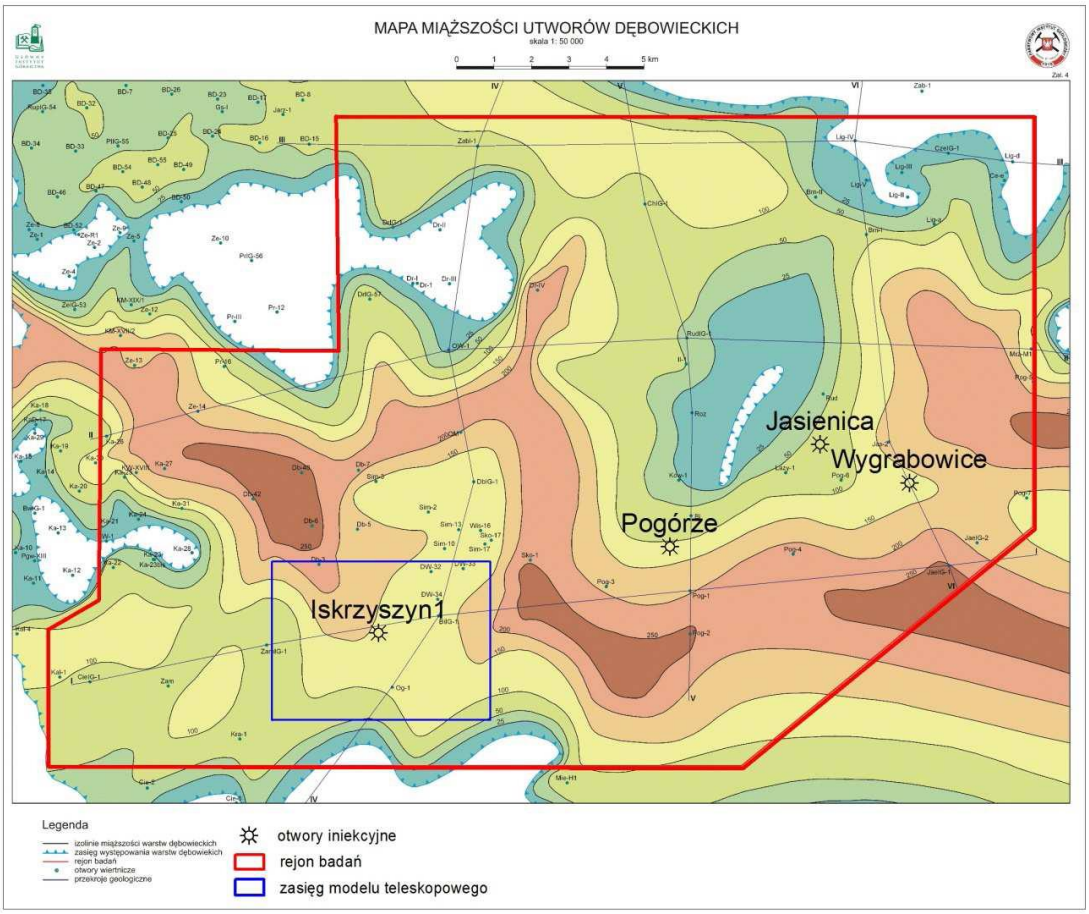


Fig. 1.1.18_25 Lokalizacja modelu na tle mapy miąższości warstw dębowieckich

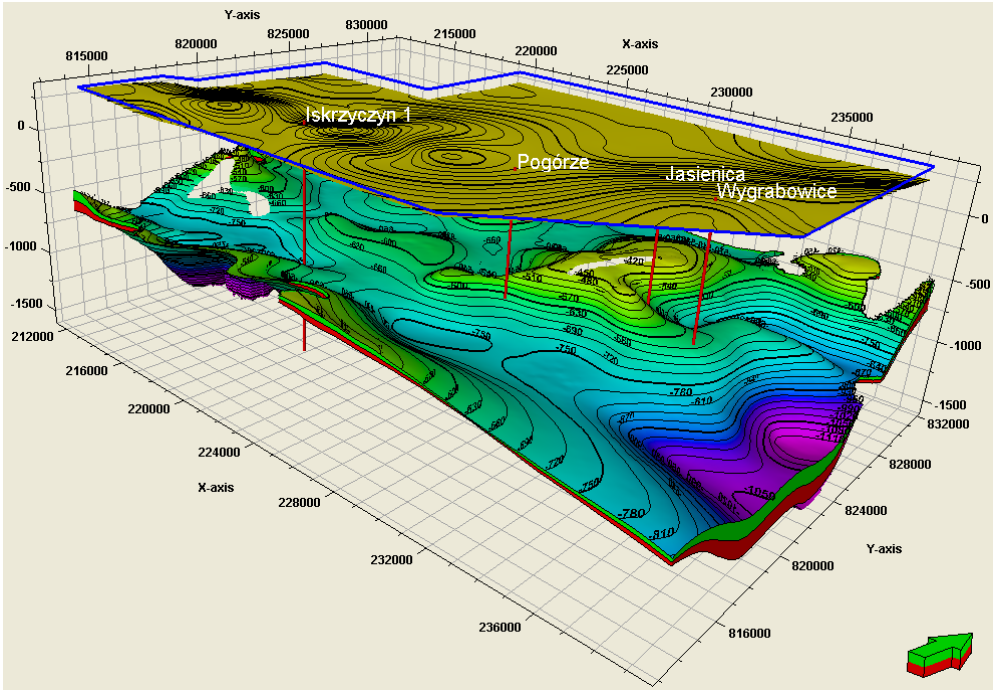


Fig. 1.1.18_26 Lokalizacja modelu w układzie 3D

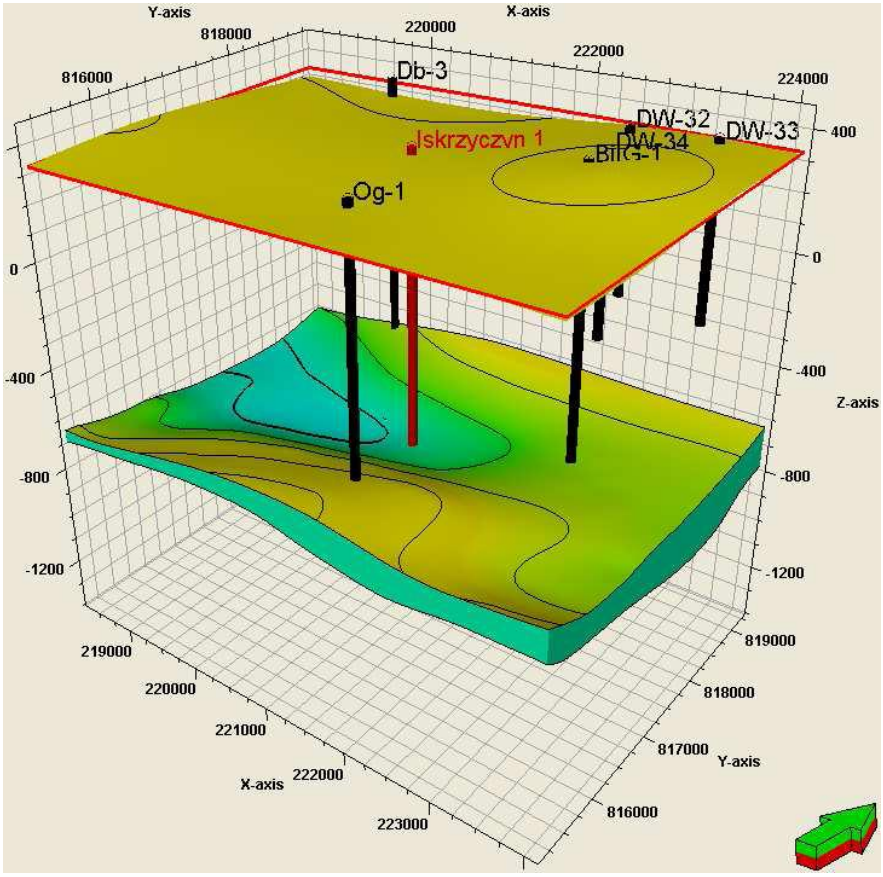


Fig. 1.1.18_27 Lokalizacja otworów wiertniczych w modelu strukturalnym

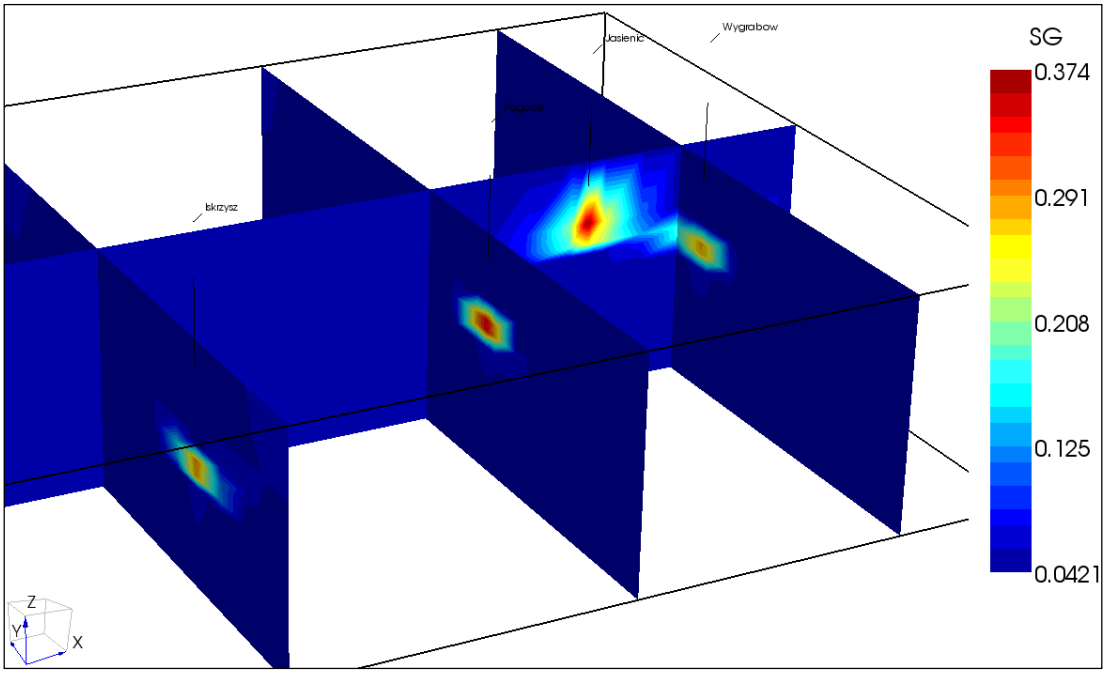


Fig. 1.1.18_28 Zasięg strefy nasycenia CO_2 w warstwach dębowieckich po 200 latach od zakończenia zatłaczania

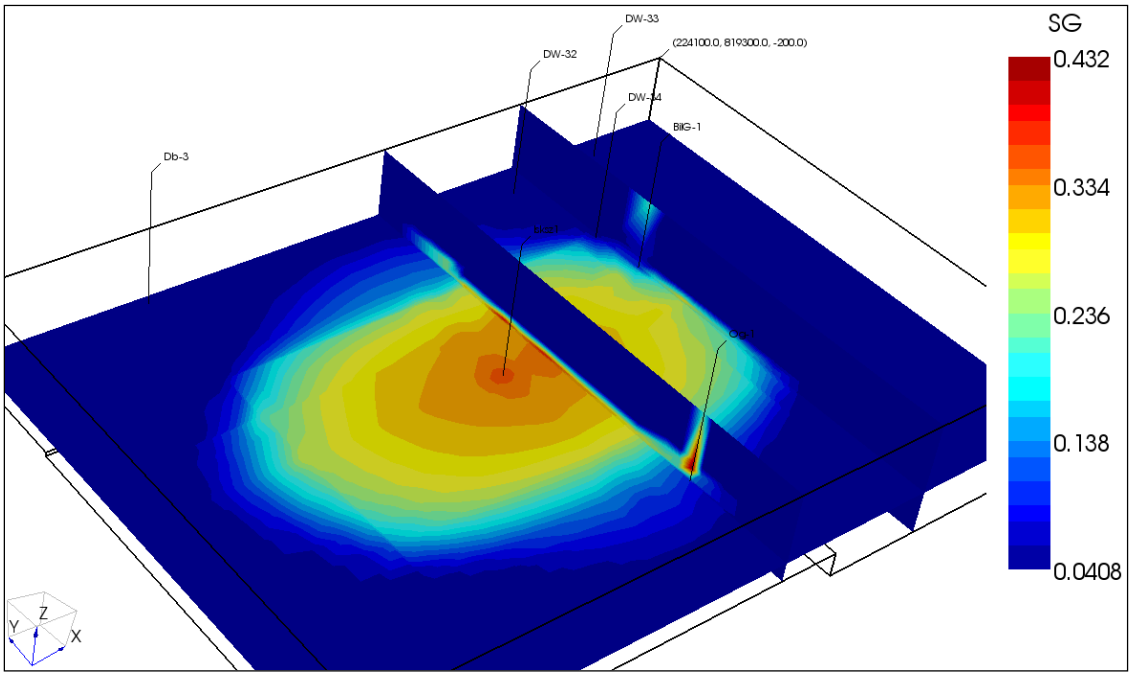


Fig. 1.1.18_29 Zmiany nasycenia CO2 w stropie zbiornika po 200 latach iniekcji

Na **Fig. 1.1.18_28** i **29** przedstawiono kolejne fazy rozpływu zatłaczanego dwutlenku węgla. Nieszczelność warstw nadkładu zaznacza się wyraźnie na rysunku 2.5, na których widoczny jest wzrost nasycenia gazem komórek warstwy nadkładu w obrębie źle zlikwidowanych otworów BIG-1 oraz Og-1.

Modelowanie dynamiczne procesu zatłaczania CO_2 do zbiornika przez otwór Iskrzyczyn 1 wskazuje, że należałoby z jednej strony monitorować metodami geofizycznymi szczelność nadkładu oraz migrację gazów w powietrzu glebowym, a z drugiej strony dynamiczne procesy wtłaczania medium do ośrodka mogą spowodować dynamiczne pękanie warstw w zbiorniku, indukując drobne zjawiska sejsmiczne.

PODSTAWY FIZYCZNE TWORZENIA SIĘ MIKROWSTRZASÓW W OŚRODKU PORO-PLASTYCZNYM

W przypadku ośrodka poro-plastycznego zmiany plastyczne powodują istotną zmianę przepuszczalności ośrodka, co jest źródłem zmian ciśnienia porowego a w konsekwencji dynamicznego rozwoju deformacji w całym ośrodku. Odkształcenia plastyczne mogą mieć taki charakter, któremu nie towarzyszy emisja sejsmoakustyczna. Bardzo często jednak takie zmiany zachodzą w ośrodku kruchym.

Na **Fig. 1.1.18_30** pokazano zmiany zachodzące w kruchej próbce skalnej, które odpowiadają twardnieniu (etap III) i mięknieniu (etap II) plastycznemu. Wynikiem tych deformacji jest mikro-pękanie, któremu towarzyszy emisja sejsmiczna, którą możemy rejestrować metodami sejsmoakustycznymi. Ten typ deformacji jest związany z tworzeniem krótkich pęknięć rozłożonych losowo w przestrzeni, w której dochodzi do deformacji i zarówno dzięki lokalizacji źródeł sygnałów sejsmoakustycznych jak również analizie spektralnej możemy go identyfikować po analizie sejsmoakustycznych danych pomiarowych.

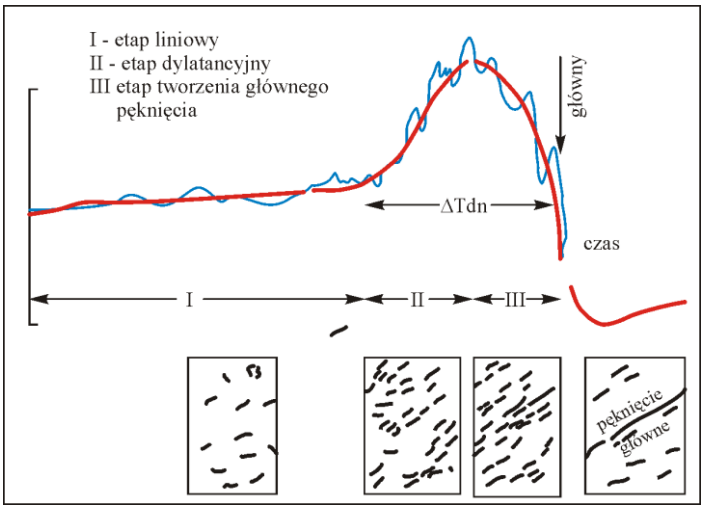


Fig. 1.1.18_30 Rozwój mikrospękań w próbce skalnej

Pękanie w ośrodku skalnym

Powstanie pęknięcia w ośrodku skalnym było badane przez licznych badaczy. Najprostszym kryterium powstania pęknięcia jest kryterium Coulomba-Mohra. Jest ono skonstruowane w układzie współrzędnych τ - naprężenie ścinające na powierzchni pęknięcia, σ_N - naprężenie normalne na tej powierzchni. Wyraża się ono wzorem:

$$\tau = c + \sigma_N tg\Phi$$

gdzie c - kohezja, $tg\,\Phi$ - tangens kąta tarcia wewnętrznego, obydwa parametry zależne od własności mechanicznych ośrodka skalnego. Na **Fig. 1.1.18_31** przedstawiono graficzną prezentację tego kryterium. Równanie kryteryjne jest tutaj prezentowane przez linię styczną do koła Mohra. Przekroczenie wartości naprężeń spowoduje powstanie pęknięcia pod kątem ϕ. Takie pęknięcie można uzyskać albo przez wzrost albo przez pomniejszenie jednego z naprężeń głównych (**Fig. 1.1.18_32**).

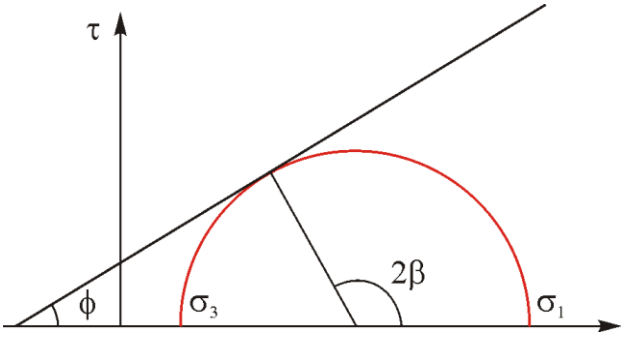


Fig. 1.1.18_31 Graficzna prezentacja kryterium Coulomba-Mohra

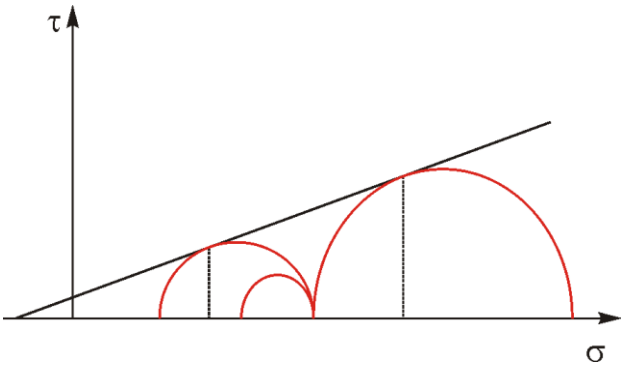


Fig. 1.1.18_32 Możliwości osiągnięcia wartości granicznej na dwa sposoby

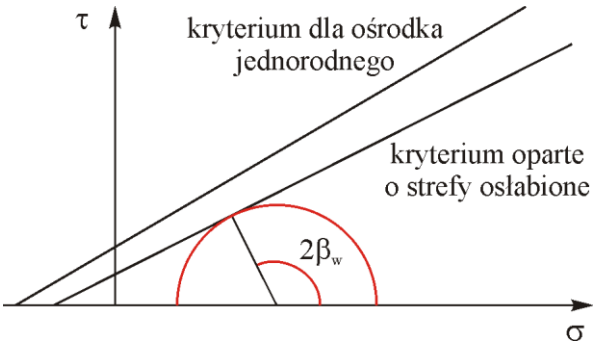


Fig. 1.1.18_33 Granica pęknięcia w jednorodnym i ośrodku spękanym

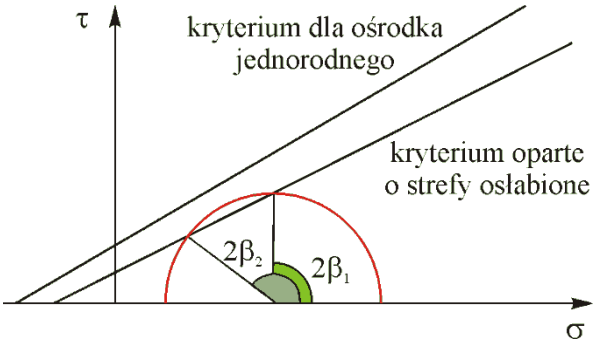


Fig. 1.1.18_34 Granica pęknięcia z płaszczyzną pęknięcia nachylonych pod kątami zawartymi pomiędzy β_1 i β_2

Dwa istotne wnioski wynikają z tych uproszczonych wzorów. Bardzo często ośrodek nie jest mechanicznie izotropowym. Jeżeli w ośrodku jest układ pęknięć pod katem ϕ to jak to pokazano na **Fig. 1.1.18_33** uruchomienie przesunięcia na pęknięciu jest zasadniczo łatwiejsze niż tworzenie nowego pęknięcia.

Nawet jeżeli kąt, pod którym nachylone jest pęknięcie w stosunku do osi głównych jest zawarty pomiędzy kątami β_1 i β_2 (**Fig. 1.1.18_34**) to również uruchomienie tych pęknięć jest znacznie łatwiejsze niż w ośrodku niespękanym.

Tworzenie pęknięć w górotworze jest opisane w ośrodku poro-plastycznym zależnością funkcyjną:

$$\tau_{\max} = f(\sigma_M)$$

gdzie

$$\sigma_M = (\sigma_I + \sigma_{II} + \sigma_{III}) - p$$

gdzie: $\sigma_I, \sigma_{II}, \sigma_{III}$ - naprężenia główne, *p* - ciśnienie porowe $\tau_{\max}$ - maksymalne naprężenie ścinające.

To równanie często wykorzystuje się w postaci uproszczonej, liniowej:

$$\tau_{\max} = A.\sigma_M$$

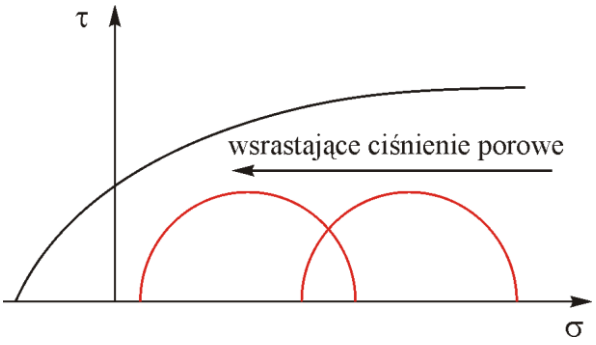


Fig. 1.1.18_35 Schemat zmian ciśnienia powodujących powstanie nieciągłości w ośrodku porosprężystym

Konsekwencją własności poro-elastycznych opisanych wyżej przedstawionymi wzorami jest sposób tworzenia nieciągłości w takim ośrodku. Możemy je przedstawić przy pomocy schematu przedstawionego na **Fig. 1.1.18_35**. Wzrost ciśnienia powoduje przesunięcie na wykresie σ, τ w kierunku w którym, może nastąpić przekroczenie linii granicznej Coulomba-Mohra.

Z praktycznego punktu widzenia oznacza to powstanie płaszczyzn swobodnych, przy czym połączenie pomiędzy dwoma stronami pęknięcia utrzymuje się dzięki układowi mostów i asperitów (wypustów, których schemat przedstawiono na **Fig. 1.1.18_36**.

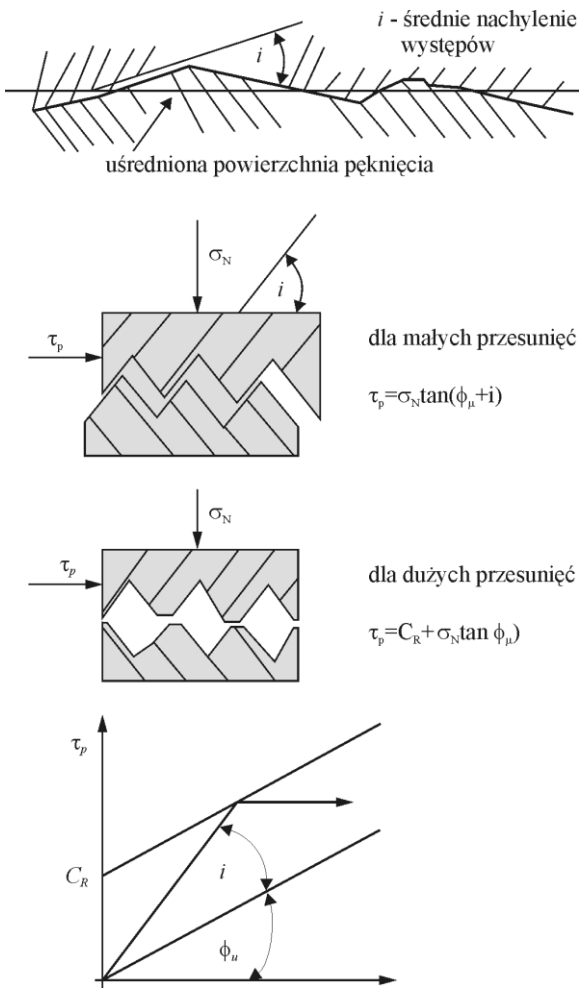


Fig. 1.1.18_36 Struktura powierzchni pęknięcia

Temu procesowi towarzyszy relaksacja energii sprężystej a więc i emisja sejsmiczna. Na ogół długości pęknięć są wówczas większe niż w przypadku plastycznego odkształcenia objętościowego i istnieje wyraźna tendencja do układania się źródeł pęknięć wzdłuż elementów linearnych. Lokalizacja takich pęknięć jest istotną informacją w ocenie ryzyka wystąpienia przecieku ze składowiska.

Jeżeli w zatłaczanym pokładzie istnieją już pęknięcia to mogą one również ulegać istotnym deformacjom niesprężystym. Na **Fig. 1.1.18_36** widać, że wytrzymałość skały pękniętej poddanej działaniu naprężeń ścinających (a więc jej przeciwdziałanie przeciw przesunięciu wzdłuż pęknięcia) zależy od jakości asperitów. Bardzo istotnym parametrem związanym z wytrzymałością ośrodka spękanego jest morfologia powierzchni pęknięcia.

Przyjmuje się, że ma ona charakter fraktalny. Ocenę jakości takiej powierzchni możemy ocenić obliczając wariograf tej powierzchni w oparciu o następujący algorytm:

$$V(r_j) = \frac{1}{N-S}\sum_{i=1}^{N-j}(z(\xi_i + r_j) - z(\xi_j))^2$$

gdzie:

z - wysokość asperitów,

N - ilość dyskretnych punktów, w których liczy się wariogram,

S jest wielkością przesunięcia w schemacie obliczeniowym.

Wprowadzenie cieczy do pęknięcia powoduje zmianę wartości z w wariografie jak to widać na **Fig. 1.1.18_36** a więc zmianę tej wariancji i wyraźne osłabienie wytrzymałości skały przeciwstawiającej się przesunięciu wzdłuż tej powierzchni. Ścinanie asperitów, które towarzyszy przesunięciu jest źródłem emisji sejsmoakustycznej. Jednocześnie różnica ciśnień, jaką widzimy np. na **Fig. 1.1.18_37** może spowodować rodzaj hydroszczelinowania w kierunku prostopadłym do powierzchni pęknięcia, podobnie jak to ma miejsce w czasie stymulowania przepływów w złożu łupkowym.

Zmiany zachodzące w ośrodku skalnym w czasie

Własności sprężysto-lepkie ośrodka skalnego powodują pełzanie skały. Jest to własność polegająca na ciągłej deformacji ośrodka skalnego w czasie przy stałym naprężeniu. Ten proces ma trzy fazy. Pierwsza faza zwana przejściową jest związana z powrotem do równowagi po okresie intensywnych zmian naprężenia. Przed utratą stabilności następuje przyspieszenie deformacji. W okresie pomiędzy tymi dwoma okresami mamy okres stabilny (**Fig. 1.1.18_37**).

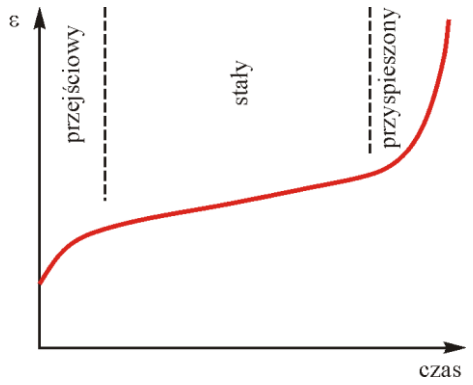


Fig. 1.1.18_37 Trzy okresy pełzania skały

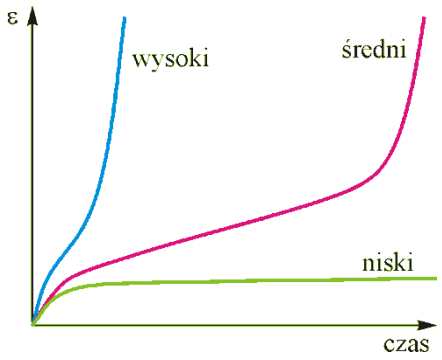


Fig. 1.1.18_38 Zmiana charakteru pełzania w zależności od przyłozonego naprężenia

Ten klasyczny podział zależy od przyłożonego naprężenia. Jeżeli jest ono duże zbliżone do wytrzymałości skały na ścinanie to może praktycznie zaniknąć okres środkowy jeżeli naprężenie jest duże lub nie pojawić się przyspieszenie deformacji jeżeli naprężenie jest stosunkowo małe - **Fig. 1.1.18_38**.

W ośrodku kruchym obydwa okresy zwiększonego pełzania powinny się charakteryzować wyraźnie zwiekszoną emisją sejsmoakustyczną. Ten sposób informowania o zmianach zachodzacych w ośrodku skalnym jest szczególnie ważny, bo nie ma właściwie skutecznych sposobów ich przewidywania.

Trzeba zwrócić uwagę na kilka istotnych własności mechanicznych porowatego ośrodka, w którym panują zarówno naprężenia zewnętrzne jak również ciśnienie porowe. Deformacja takiego ośrodka w zakresie sprężystym jest związana ze zmianą wielkości parametrów charakteryzujących ośrodek takich jak prędkości fal i ich tłumienie. Rozkłady naprężeń wywołane wtłaczaniem CO_2 do górotworu mają największe spadki na granicy stref nasyconych i dlatego rozpoznanie pola prędkości sejsmicznej może jednocześnie pozwolić na śledzenie konturu zatłaczania. Również temperatura zatłaczanego gazu ma wpływ na rozkład naprężeń i w szczególności w pobliżu pęknięć mogą się tworzyć sytuacje, w których duży gradient ciśnienia i temperatury tworzy warunki do pękania prostopadłego do nieciągłości.

Odkształcenia niesprężyste w ośrodku kruchym mają charakter plastycznych odkształceń objętościowych, tworzenia pęknięć, uruchamiania niesprężystych deformacji na istniejących pęknięciach (duże przemieszczenia wzdłuż pęknięcia) wreszcie pełzania. Wszystkie te rodzaje odkształceń w ośrodku kruchym mogą być rozróżnione na podstawie rejestracji sejsmoakustycznych, odpowiednio zinterpretowanych. Lokalizacja hipocentrów źródeł deformacji, badanie mechanizmu źródeł, badanie poprzecznych fal rozszczepionych, badanie anizotropii pola sejsmicznego i badanie zmian pola prędkości fal pozwala identyfikować mechanizm odkształceń niesprężystych i monitorować zmiany ryzyka powstania przecieku ze zbiornika CO_2.

Sejsmika pasywna

Zatłaczanie dwutlenku węgla do złoża powoduje powstanie naprężeń w ośrodku, o złożonym rozkładzie. Dotyczy to zarówno lokalnych rozkładów naprężeń wokół por jakie powstają w rejonach dużego gradientu ciśnień jak również regionalnych rozkładów w nadkładzie gdzie powstają naprężenia wynikające z przesuwającego się frontu zatłaczania. Jeżeli 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:

- można badać intensywność procesów zachodzących w ośrodku badając aktywność (ilość zdarzeń w jednostce czasu) sejsmoakustyczną. Na **Fig. 1.1.18_39** pokazano wyniki takiej rejestracji jakie uzyskano w Kanadzie w trakcie zatłaczania. Zwraca uwagę korelacja pomiędzy czasem zatłaczania i jego wielkością a aktywnością zarejestrowaną po tym procesie,

- lokalizacja hipocentrum możliwa gdy prowadzimy rejestrację przy pomocy sieci czujników pozwala wyznaczyć rejony w których naprężenia są szczególnie intensywne.

- jeżeli rejestracja dotyczy fal poprzecznych to można określić kierunki spękań wykorzystując fakt, że ten rodzaj fali ulega rozszczepieniu i dzięki temu zjawisku istnieje możliwość takiej interpretacji zarejestrowanych fal sejsmicznych aby można było wyznaczyć kierunki spękań. Rejestracja musi jednak być prowadzona w paśmie częstości dostosowanej do rozmiarów pęknięć rys. 3.10.

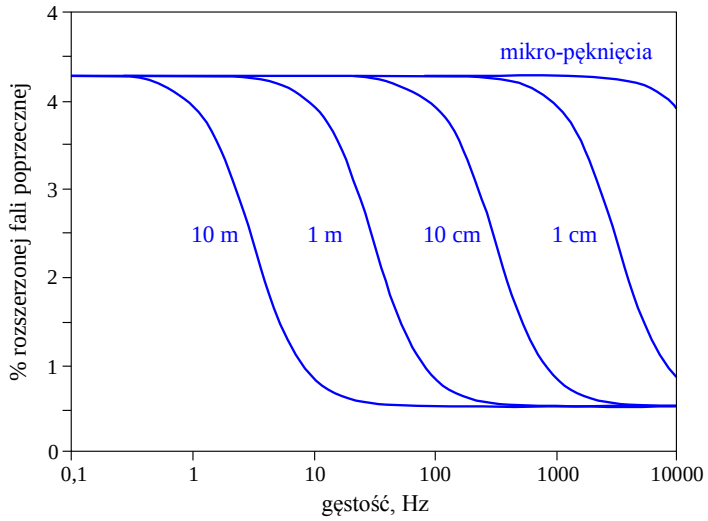


Fig. 1.1.18_39 Zakres długości pęknięć i związanych z tym częstości fali poprzecznej, które można wykorzystać w metodzie poprzecznej sejsmicznej fali rozszczepionej (shear splitting)

METODY MONITOROWANIA

Podstawowe techniki monitorowania płytkich i głębokich struktur opierają się na wykorzystaniu:

- Metody sejsmicznej;
- Metody grawimetrycznej;
- Metody elektrycznej i elektromagnetycznej;
- Metody sejsmologicznej;
- Pomiarach geochemicznych;
- Pomiarach satelitarnych i z samolotu;
- Badaniach geofizycznych w otworach.

Główne cele tych badań to: rozpoznanie kształtu i migracji chmury zatłoczonego CO_2, dróg migracji przecieków w kierunku powierzchni oraz badanie sejsmiczności indukowanej zatłaczaniem CO_2 jak również kontrola sejsmiczności naturalnej. Wymienione cele monitorowania mogą być realizowane przy pomocy większości ww. metod. Różnica polega na dokładności i możliwościach poszczególnych metod z jednej strony oraz na kosztach ich wdrożenia z drugiej strony.

W sprawozdaniu GIG w ramach zadania **1.1.18**, szczegółowo przedstawiony zostanie projekt monitorowania płynów złożowych w obrębie formacji zbiornikowych i uszczelniających w trakcie procesu wtłaczania oraz po zamknięciu składowiska, z wykorzystaniem metody sejsmologicznej i pasywnej tomografii. Pozostałe metody zostaną jedynie zasygnalizowane - zgodnie z zaleceniem koordynatora projektu zostały szczegółowo opisane przez inne instytucje.

Metoda sejsmiczna

Metoda sejsmiczna jest aktualnie najszerzej stosowaną metodą do badania kształtu i przemieszczania chmury CO_2 oraz wykrywania dróg przecieku w kierunku powierzchni. Nie nadaje się do monitorowania sejsmiczności indukowanej zatłaczaniem. Stosowana jest najczęściej w wariancie 2D, 3D oraz 4D oraz sejsmiki międzyotworowej. Dobre wyniki jej stosowania uzyskano na zbiorniku Sleipner i Weyburn. Badania wskazują jednak generalnie ze wzrostem głębokości znacznie słabnie wiarygodność wyników. Metoda sejsmiczna jest metodą bardzo pracochłonną i drogą. Wymaga stosowania ciężkiego sprzętu pomiarowego i zaangażowania dużego zespołu do pracochłonnych prac pomiarowych w terenie. Jest to jednak najczęściej obecnie stosowana metoda do badań głębokich.

Metoda grawimetryczna

Metoda grawimetryczna może badać zmiany w głębokich i płytkich strukturach skalnych jak i gęstość płynów. Metoda charakteryzuje się znacznie niższą rozdzielczością przestrzenną niż metody sejsmiczne, ale oferuje kilka wartościowych oznaczeń w stosunku do sejsmiki. Stosowana okresowo może być wykorzystana do wykrywania akumulacji CO_2 w nadkładzie, stanowiąc system wczesnego ostrzegania przed zagrożeniem. Rozpuszczony CO_2 jest niewidoczny w obrazie fal sejsmicznych. Metoda dobrze rozpoznaje grubą chmurę CO_2. Metoda grawimetryczne jest dużo tańsza od metody sejsmicznej a zarazem stanowi jej dobre uzupełnienie jak i weryfikację wyników. Zalecana jest do stosowania w okresach między drogimi pomiarami sejsmicznymi. Przed jej wykonaniem należy wykonać odpowiednie modelowania.

Badania geofizyczne w otworach

Badania geofizyki otworowej ograniczają się do badań w profilu otaczającym odwiert. Ich zaletą jest wykonywanie badań zarówno w nadkładzie jak i w zbiorniku. Dobrze nadają się do oceny CO_2 w zbiorniku w aspekcie nasycenia i ciśnienia oraz chemizmu płynów. Monitoring otworowy należy stosować, ponieważ wykorzystuje się do lokalizacji czujników istniejące otwory.

Nowym elementem monitoringu w otworach może być prześwietlanie elektromagnetyczne między otworami. Metodę taką opracowała firma Schlumberger i nazwała ją DeepLook-EM. Metoda polega na tym, że w jednym otworze umieszcza się nadajnik EM a w drugim odbiornik, poczym wykonuje się prześwietlanie (tomografia EM między otworami). Odległość między otworami może wynosić od 300m do 1000m, w zależności od lokalnych warunków geologicznych, a w szczególności czy otwory są uzbrojone. W obecnej chwili sprzętu do takich pomiarów nie można kupić, można natomiast wykonać pomiary w formie zlecenia do firmy Schlumberger.

Metody elektryczne i elektromagnetyczne

Metoda elektryczna i głęboka elektromagnetyczna mogą dać dobrą informację o potencjalnych drogach ucieczki CO_2 w nadkładzie. Metody te są stosunkowo tanie. Ich ograniczeniem w stosowaniu może być teren, w którym przebiegają przesyłowe linie energetyczne, wywołujące zakłócenia. Metody te ze względu na niskie koszty można stosować okresowo jako uzupełnienie pomiarów sejsmicznych.

Metoda sejsmologiczna

Metoda sejsmologiczna służy przede wszystkim do badania zjawisk mikrosejsmicznych wywoływanych pękaniem skał na skutek wtłaczania CO_2. 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 stałe sieć sejsmologiczną mogą być interpretowane w celu śledzenia rozprzestrzeniania się plamy CO_2 oraz potencjalnych dróg migracji w nadkładzie stanowiącym izolację. Niezależnie od zjawisk parasejsmicznych sieć sejsmologiczna

służy do monitorowania sejsmiczności naturalnej lub wstrząsów górniczych w przypadku składowania na terenach przyległych do obszarów górniczych.

Metoda ta szczegółowo została opisana w kolejnym podrozdziale dokumentacji.

ZAŁOŻENIA METODYCZNE MONITOROWANIA METODĄ SEJSMOLOGICZNĄ

Zainstalowanie stałej sieci sejsmologicznej w obszarze składowania CO_2 może dać bardzo duże korzyści monitorowania tego procesu. Można założyć dwa scenariusze podczas zatłaczania CO_2. Pierwszy odnosi się do przypadku, gdy będzie występowała aktywność sejsmiczna (głównie zbiorniki o małej przepuszczalności i wtłaczaniu CO_2 pod dużym ciśnieniem) i drugi przypadek, gdy aktywność sejsmiczna będzie bardzo niska słaba, trudna do zarejestrowania (jak przykładowo na złożu Sleipner, gdzie mamy do czynienia z dużą porowatością i stosunkowo małymi ciśnieniami).

Przypadek I – występuje aktywność sejsmiczna

W pierwszym przypadku monitorowanie przy pomocy stałej sieci sejsmologicznej może być niezmiernie korzystne. Odpowiednio rozmieszczona sieć sejsmologiczna pozwoli na lokalizację zjawisk mikrosejsmicznych związanych z tworzeniem się spękań. Oznacza to możliwość śledzenia rozprzestrzeniania się chmury CO_2 oraz monitorowania wycieków w obszarze warstwy izolacyjnej. Zastosowanie analizy parametrów ognisk spękań, takich jak spadek naprężeń w źródle, pozwoliłoby na ocenę jakości procesu zatłaczania (wzrost spadków naprężeń informowałby o trudniejszej fazie zatłaczania medium do zbiornika). Drugą bardzo istotną korzyścią monitoringu sejsmologicznego byłaby możliwość zastosowania krzywoliniowej tomografii pasywnej (tomografia oparta na naturalnych źródłach emisji fal sejsmicznych) do badania pola prędkości. Warunkiem przestrzennej interpretacji pola prędkości jest dysponowanie przestrzennym rozmieszczeniem czujników drgań. Obliczenia takie można wykonywać z dużą częstotliwością w oparciu o bazę wstrząsów zarejestrowaną automatycznie przez stacjonarny rejestrator drgań. Wydaje się, że ze względu na uwarunkowania geologiczne w naszym kraju, można oczekiwać aktywności sejsmicznej w potencjalnych miejscach składowania. Tomografia pasywna pozwoliłaby na bardzo znaczne ograniczenie ilości wykonywania drogich pomiarów sejsmicznych. Ponadto, gdy zbiornik zlokalizowany jest w pobliżu zagłębi górniczych, w których występują wstrząsy, sieć sejsmologiczna jako jedyna metoda pozwala na ich monitorowanie i ocenę ewentualnego zagrożenia. Sytuacja taka może mieć miejsce w potencjalnych miejscach wyznaczonych w obszarze Górnośląskiego Zagłębia Górniczego, LGOM oraz kopalni Bełchatów.

Przypadek II – brak aktywności sejsmicznej

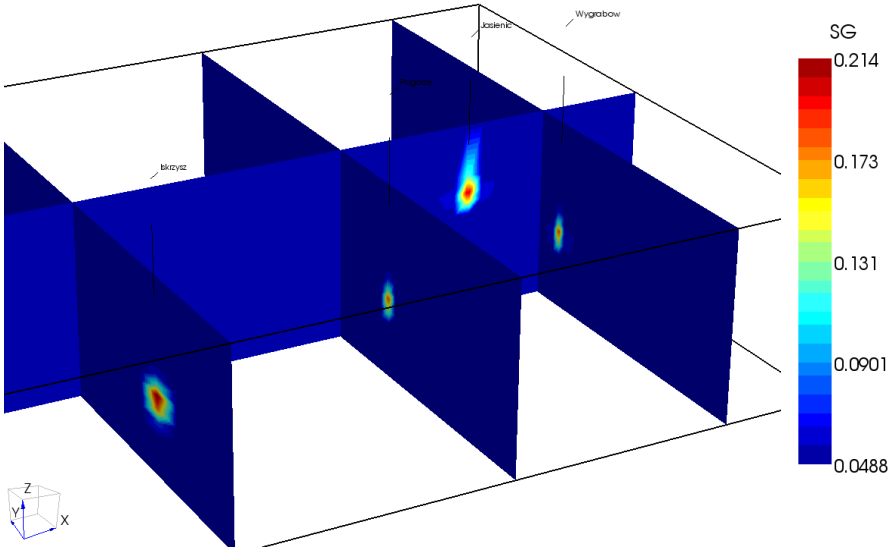
W przypadku niskiej aktywności sejsmicznej podczas zatłaczania lub jej braku przydatność metody sejsmologicznej będzie znacznie mniejsza. Sieć sejsmologiczna może być jednak wykorzystana i w tym przypadku do badania pola prędkości fal metodą tomografii. Warunkiem będzie jednak sztuczne wzbudzanie fal sejsmicznych przy pomocy ładunków MW lub dużym wibratorem, podobnie jak się to robi przy pomiarach sejsmicznych. Korzyścią jest tutaj nie angażowanie tak często grupy pomiarowej, przez co można obniżyć koszty. Zaletą proponowanego rozwiązania jest obliczanie pola prędkości metodą tomografii między czujnikami w otworach i na powierzchni, co nie jest możliwe przy zastosowaniu powierzchniowych pomiarów sejsmicznych. W efekcie można w ten sposób prowadzić monitoring warstw nadkładu.

Poligon badawczy do zatłaczania CO2

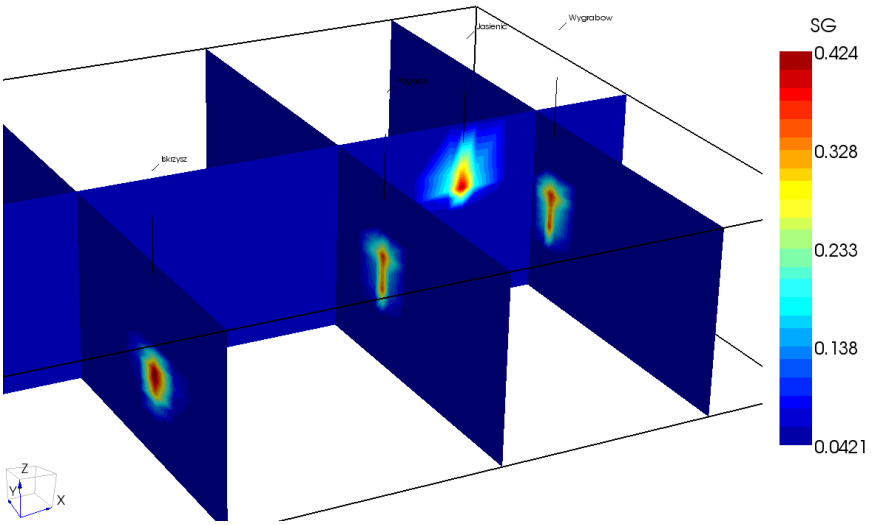
Monitorowanie sejsmologiczne może się odbywać w czterech otworach monitorujących, wywierconych w odległości kilkudziesięciu metrów od czterech otworów iniekcyjnych (*Iskrzyczyn 1, Pogórze, Wygrabowice, Jasienica*).

Na **Fig. 1.1.18_40** widoczny jest rozkład nasycenia CO2 w pierwszych 25 latach iniekcji.

początek iniekcji



po 5 latach iniekcji



po 15 latach iniekcji

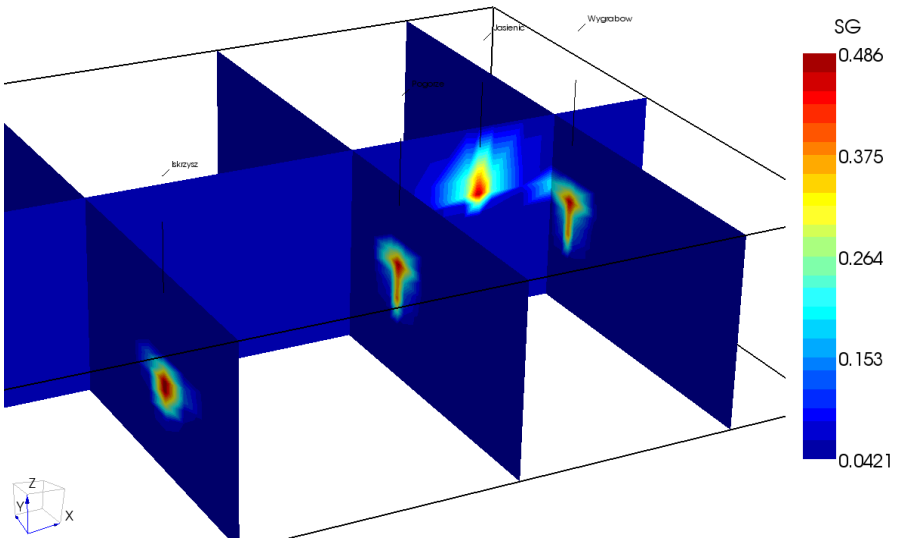


Fig. 1.1.18_40 Rozkład nasycenia CO_2 w modelu – wariant II po 25 latach iniekcji (zakończenie iniekcji)

Modelowanie dynamiczne procesu zatłaczania CO_2 do zbiornika przez otwór Iskrzyczyn 1 wskazuje, że należałoby z jednej strony monitorować metodami geofizycznymi szczelność nadkładu oraz migrację gazów w powietrzu glebowym, a z drugiej strony dynamiczne procesy wtłaczania medium do ośrodka mogą spowodować dynamiczne pękanie warstw w zbiorniku, indukując drobne zjawiska sejsmiczne.

Sieć sejsmologiczna

Budowa sieci sejsmologicznej jest jednorazowym wydatkiem na cały czas trwania procesu zatłaczania oraz na monitoring w czasie po likwidacji zbiornika (w przypadku analizowanej struktury to około 50 lat). Sieć sejsmologiczna składa się z czujników drgań, transmisji danych i rejestratora wstrząsów (**Fig. 1.1.18_41**). Drgania sejsmiczne zarejestrowane po wystąpieniu wstrząsu są automatycznie wyzwalane i rejestrowane w pamięci rejestratora. Następnie poprzez transmisję (np. łączność komórkową, linie kablową) są automatycznie przesyłane do stacji bazowej, gdzie są gromadzone w formie plików cyfrowych. Zastosowanie odbiorników GPS na każdym stanowisku pomiarowym umożliwia czasowanie odebranych sygnałów przy wspólnej podstawie czasu, co pozwala w dalszej kolejności na interpretację zjawisk sejsmicznych (lokalizacja, magnituda, spadek naprężeń, 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.

W przypadku specjalistycznych sond do pomiaru drgań i rejestracji zjawisk sejsmicznych podczas zatłaczania 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, Canada, a przede wszystkim produkty firmy SERCEL z przykładowymi projektami tej firmy:

- Hydrofrac monitoring & seismology experiment in KTB deep experimental well (9000 m, 250°c) in Germany for GFZ
- Al Noor – Phase II: one well installation of tubing conveyed geophone for hydraulic fracturing monitoring.
- MAERSK - Offshore Denmark: 16 permanent geophone systems installed with SCHLUMBERGER in a 10,000 ft horizontal drain for water injection and fracturing monitoring in the North Sea
- PEMEX – MEXICO: Hydraulic fracturing monitoring jobs from treatment wells.

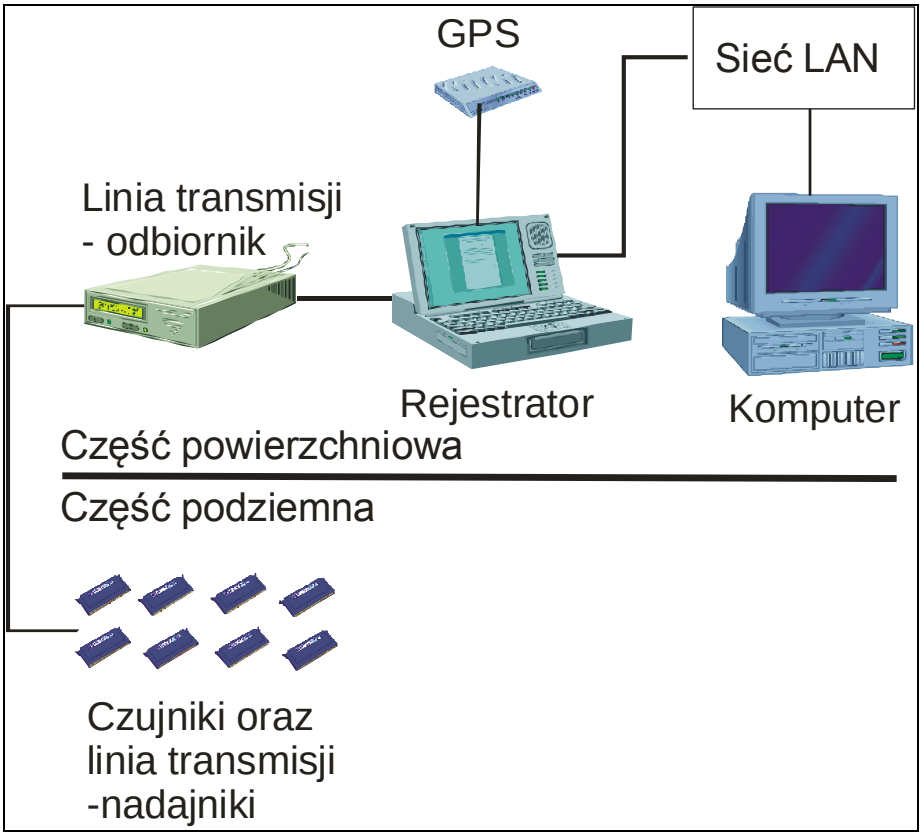


Fig. 1.1.18_41 Schemat aparatury sejsmologicznej SOS

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 na stałe umieszczone pod powierzchnią (sondy pomiarowe w płytkich otworach 20-30m, co zmniejszy szumy w porównaniu do lokalizacji czujników na powierzchni) oraz w otworach głębokich, najlepiej na głębokości zbliżonej do poziomu zatłaczania oraz na głębokościach pośrednich między powierzchnią i poziomem zatłaczania. Do tego celu można wykorzystać otwory monitorujące dla procesu zatłaczania. Warunkiem takiego rozwiązania jest jednak podjęcie decyzji o budowie przestrzennej sieci sejsmologicznej na etapie wiercenia otworów, gdyż jest to odpowiedni moment na ich zamontowanie.

Ryzyko sejsmiczne od naturalnych trzęsień ziemi i zjawisk parasejsmicznych

Sieć sejsmologiczna może być również wykorzystana do monitorowania sejsmiczności niezwiązanej z procesem zatłaczania CO_2. W strefach naturalnej aktywności sejsmicznej są to trzęsienia 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, **Fig. 1.1.18_42** (Intensywność drgań w skali EMS do 7). 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 płaszczyznach uskokowych w rejonie planowanego zbiornika CO_2, to w ich efekcie następuje pękanie skał w źródle wstrząsu, co może stanowić potencjalną drogę wycieku CO_2. Monitorowanie sejsmiczności pozwala na ocenę ryzyka sejsmicznego w obszarze składowania CO_2 i zastosowanie wyprzedzająco profilaktyki.

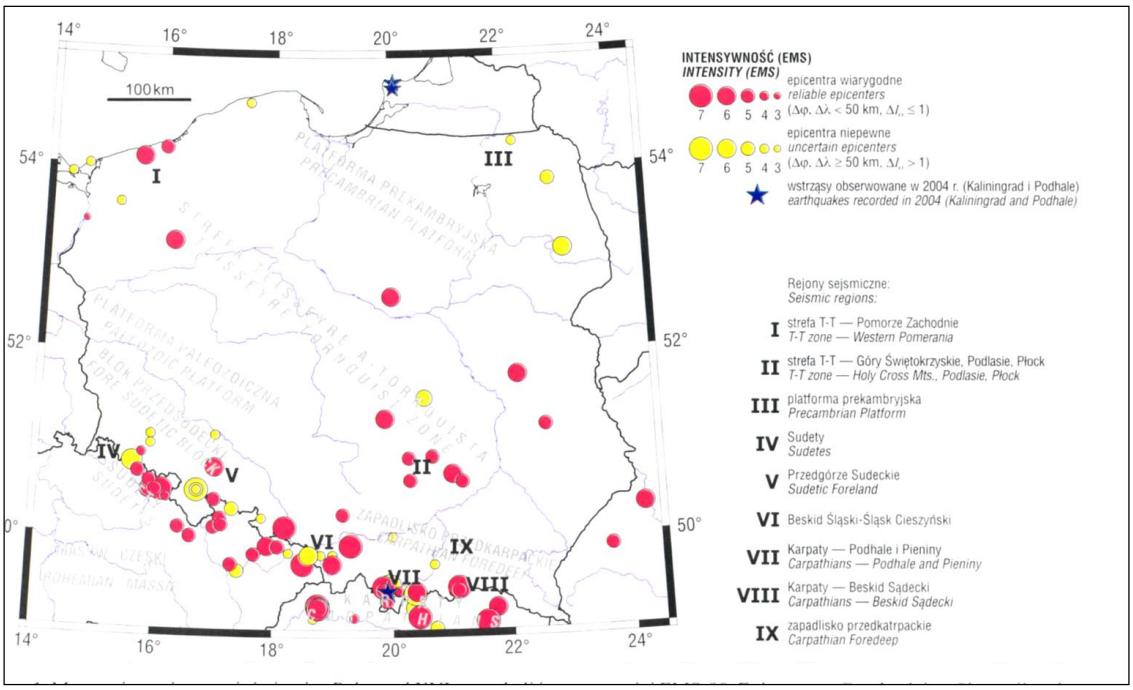


Fig. 1.1.18_42 Mapa epicentrów trzęsień ziemi w Polsce od XVI wieku , w skali intensywności EMS-98 (z artykułu Guterch 2009)

Możliwości zastosowania tomografii pasywnej do diagnostyki zmian w strukturach geologicznych w czasie procesu składowania CO_2.

Wykorzystując naturalne zjawiska dynamiczne wywoływane tworzeniem się nowych szczelin podczas procesu zatłaczania CO_2 zarejestrowane przez przestrzenną sieć sejsmologiczną, można wykonywać obliczenia pola prędkości fal sejsmicznych metodą tzw. tomografii pasywnej. Metoda ta polega na ocenie i analizie pola prędkości fali podłużnej w przesuwającym się oknie czasowym. Technika taka pozwala na śledzenie zmian pola prędkości i korelowanie ich ze zmianami zachodzącymi w rejonie zatłaczania CO2 oraz w nadkładzie. Ponieważ nie dysponujemy praktycznymi zastosowaniami tej metody do monitorowania procesu zatłaczania CO2 w naszym kraju, poniżej przedstawiono przykład takiego monitoringu do badania spękań w trakcie eksploatacji złoża miedzi.

Przykład zastosowania tomografii pasywnej do diagnostyki struktury górotworu mogą być wyniki uzyskane dla kopalni miedzi Palabora w Południowej Afryce (Glazer i Lurka 2007).Kopalnia Palabora eksploatowała złoże metodą odkrywkową. Po osiągnięciu głębokości 800m od powierzchni terenu zakończono eksploatację odkrywkową i pod spodem odkrywki na głębokości 1200m rozpoczęto eksploatację podziemną tzw. system cave-mining. Eksploatacja podziemna powoduje spękania masywu skalnego w kierunku pionowym nad poziomem eksploatacyjnym (**Fig. 1.1.18_43**). Bezpieczna eksploatacja złoża wymaga by destrukcja górotworu nie doszła do poziomu dna starej odkrywki, co groziłoby katastrofą (przerwanie pasa izolacji i wdarcie się wody do kopalni podziemnej). Jednym z zaproponowanych sposobów śledzenia rozwoju strefy spękań skał była tomografia pasywna. Wykorzystując licznie rejestrowane zjawiska dynamiczne na geofonach umieszczonych na stałe w otworach na różnych głębokościach oraz na geofonach powierzchniowych, można było uzyskać bardzo dobre pokrycie promieniami sejsmicznymi obszaru badań między poziomem eksploatacji a dnem odkrywki (**Fig. 1.1.18_44**).

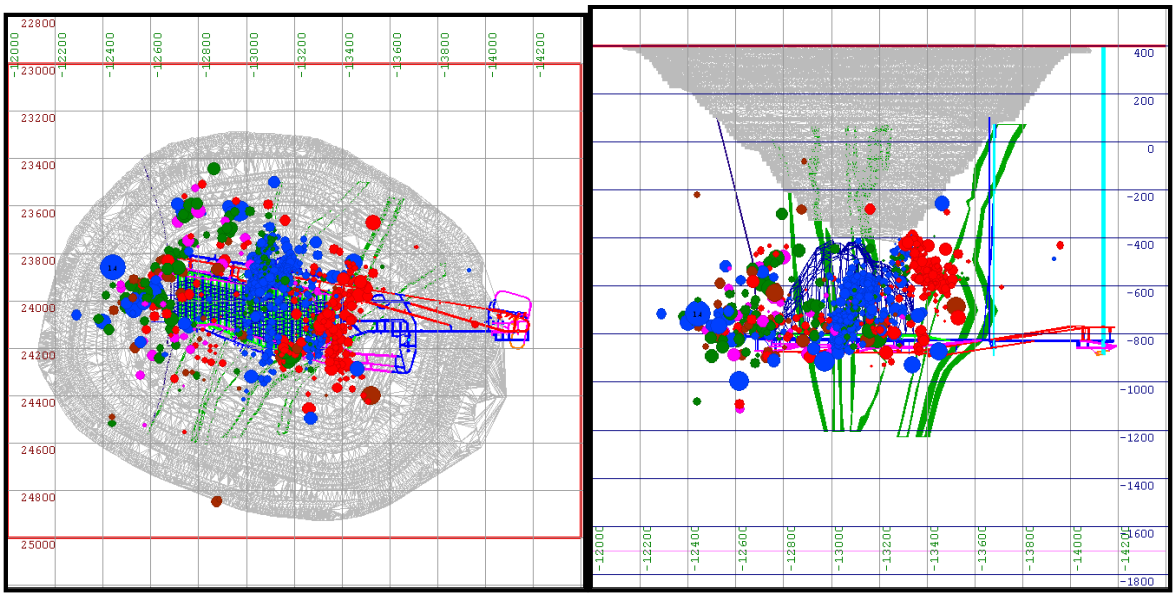


Fig. 1.1.18_43 Sejsmiczność w rzucie poziomym i pionowym w maju 2004 (za Glazer i Lurka 2007)

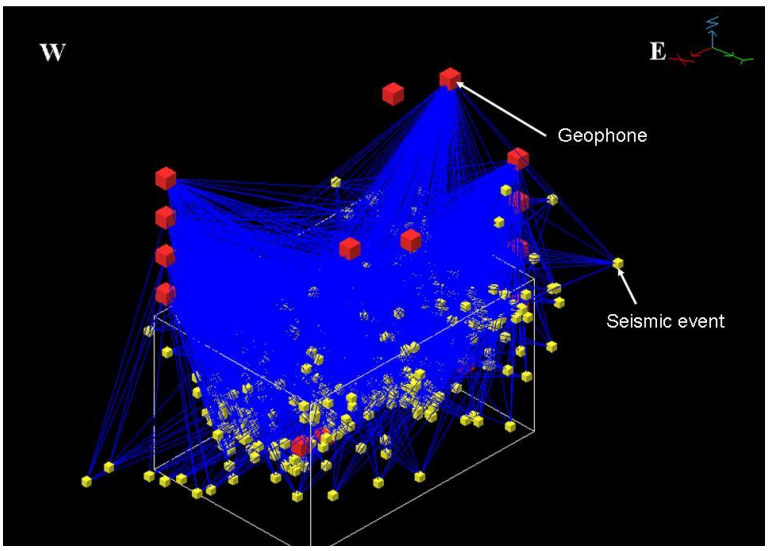


Fig. 1.1.18_44 Pokrycie promieniami sejsmicznymi obszaru badań dla wstrząsów zaistniałych w maju 2004 (za Glazer i Lurka 2007)

Obraz pola prędkości 3D przedstawiony na **Fig. 1.1.18_45**.Odnosi się do stanu na koniec maja 2004r. Pokazano na nim strefę najwyższych prędkości zakładając, że najwyższe naprężenia i małe spękania lub ich brak korelują się z tą strefą.

Rekonstrukcja pola prędkości w maju 2004 pokazała, że we wschodniej części obszaru występuje lite skały lub mocno ściśnięte duże bloki skalne. W części zachodniej obszaru nastąpiło spękanie skał. W efekcie nastąpiło w tej części kopalni dojście obszaru spękań do dna odkrywki.

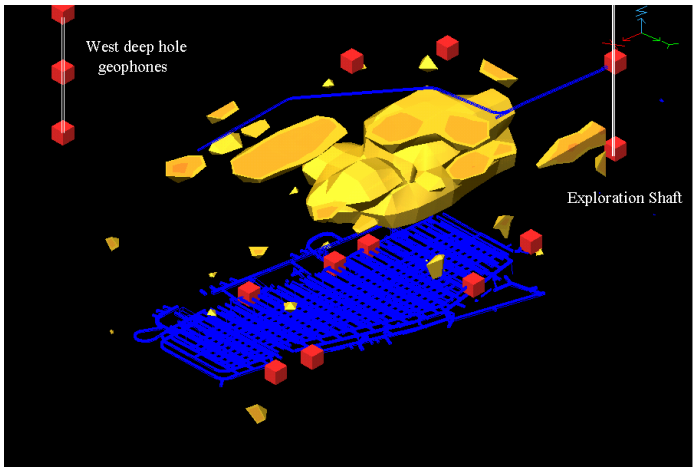


Fig. 1.1.18_45 Obszar o najwyższych prędkościach obliczony w maju 2004 (za Glazer i Lurka 2007).

Przedstawiony przykład obliczeniowy pozwala wiązać duże nadzieje z zastosowaniem tomografii pasywnej do śledzenia zmian strukturalnych w masywie skalnym w czasie procesu zatłaczania CO_2. Może pozwolić również na śledzenie migracji i geometrii zatłoczonego CO_2, o ile obrazy tomograficzne liczone będą w kolejnych oknach czasowych ukazując zmiany w czasie (tomografia pasywna 4D). Metoda wymaga oczywiście zainstalowania stałej sieci sejsmologicznej w rejonie zbiornika i zastosowania odpowiednich programów do tomografii pasywnej w wersji z krzywoliniowym promieniem. Opracowywanie kolejnych obrazów tomograficznych mogłoby się odbywać z dużą częstotliwością, nie wymagałoby dużych nakładów finansowych i byłoby zdecydowanie tańsze od sejsmiki 3D i 4D. Niewątpliwie zastosowanie tomografii pasywnej byłoby dużym przełomem w monitorowaniu procesu zatłaczania CO_2, zarówno pod względem jakości wyników jak i obniżenia kosztów. Warunkiem zastosowania tej metody jest jednak występowanie zjawisk sejsmicznych w trakcie zatłaczania. Eksploatacja węglowodorów jak również hydroszczelinowanie skał wskazują, że należy spodziewać się występowania aktywności sejsmicznej dla tych procesów (Baria i inni 2006). Również zatłaczanie CO_2 powinno wywoływać powstawanie efektów dynamicznych związanych z spękaniem masywu skalnego podczas tego procesu.

Niezależnie od naturalnych zjawisk dynamicznych stanowiących źródła fal sejsmicznych do tomografii pasywnej, można wspomóc się wytwarzaniem jej przy pomocy źródeł sztucznych (wibratory lub strzelania MW – podobnie jak to się robi w sejsmice prospekcyjnej). Przewagą systemu sejsmologicznego zamontowanego na stałe jest w takim przypadku przestrzenne rozmieszczenie czujników drgań (lepsza dokładność i wiarygodność odwzorowania pola prędkości) oraz niższe koszty (w sejsmice każde obliczenia nowych obrazów pola prędkości wymagają przyjazdu ekipy pomiarowej z ciężkim sprzętem). Tomografia pasywna wydaje się w tej chwili jedną z najbardziej obiecujących metod śledzenia spękań w masywie skalnym oraz śledzenia rozwoju chmury zatłaczanego CO_2 oraz wykrywania dróg migracji CO_2.

Opis sieci sejsmologicznej dla obiektu Skoczów-Czechowice

Czujniki drgań powinny być zamontowane w otworach monitorujących, a ich parametry powinny wytrzymać w środowisku temperaturę do 150^{o}C i do 50 MPa ciśnienia. Proponuje się zainstalowanie 12 trójskładowych czujników drgań w 4 otworach monitorujących, w każdym po trzy sondy pomiarowe 15m w ostatnich 50 m otworu (kolektor). Sygnały z czujników (zjawiska sejsmiczne) rejestrowane winny być automatycznie na rejestratorze na powierzchni. Ponadto proponuje się instalację systemu przypowierzchniowych sond geofonowych w płytkich otworach (30-50m). Połączone wspólnym czasem (GPS) geofony w otworze monitorującym oraz geofony przypowierzchniowe, pozwolą na pseudo-ciągłą obserwację mikrosejsmologiczną podczas zatłaczania CO2, wykonywania 4D obrazów tomograficznych (w przypadku znaczącej aktywności sejsmicznej – metodą tomografii pasywne, a w przypadku słabej aktywności sejsmicznej - metodą tomografii aktywnej (wykonanie strzelań ładunkami MW lub metodą wibracji). Z pomiarami mikrosejsmologicznymi oraz pasywną tomografią w zaproponowanej geometrii sieci geofonowej, można 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 Canadzie, gdzie wtłaczany jest CO2. Ze względu na długoletnie wtłaczanie CO2 do zbiornika Budziszewice-Zaosie (planowane 25 lat) i obowiązek monitorowania po zamknięciu składowiska kolejne 20-30 lat, rozwiązanie z geofonami zainstalowanymi na stałe wydaje się być najlepsze i najtańsze.

Do otworów monitorujących proponuje się zakupić dobrej klasy, cienkie sondy (slim), które łatwiej jest zamontować w otworze, a także 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.

Przykładowy sprzęt (parametry sprzętu) opisane są na bazie produktów firmy SERCEL, która prowadzi wiele projektów monitorowania sejsmiczności podczas zatłaczania mediów do skał.

Dla naszego celu optymalne z oferty SERCEL są cienkie sondy geofonowe o nazwie SLIMWAVE^{TM} , których średnica wynosi 43 mm (1 11/16 cala) i mogą być stosowane w otworach od 2 ¼ cala do 13 cala. Sondy te mogą pracować w środowisku do 100 MPa oraz w temperaturze do 150^{o}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 (drgania) o wybranym poziomie amplitudowym, a próbkowanie sygnału jest skorelowane z czasem bezwzględnym z GPS.

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 trójskładowa firmy GeoSig (takie sondy pracują w Górnośląskiej Regionalnej Sieci Sejsmologicznej GIG). Sygnał z przypisanym czasem bezwzględnym GPS przesyłany jest przez modem komórkowy do aparatury rejestrującej wstrząsy.

W efekcie naturalnej sejsmiczności podczas procesu zatłaczania CO2 oraz ewentualnie sztucznych źródeł drgań ładunkami MW lub metodą wibracyjną, 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 pękania skały kolektora podczas zatłaczania CO2, uzyskania obrazów pola prędkości z tomografii pasywne lub aktywnej 3D i 4D (przekroje pionowe i na wybranych horyzontach w poziomie w celu śledzenia rozwoju chmury CO2), jak również obrazy uzyskane z analizy VSP, timelapse 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.

Należy mocno podkreślić, że żadne inne rozwiązanie sprzętowe niż założenie stałej sieci geofonów w otworach i przy powierzchni, nie zapewni możliwości ciągłego monitorowania zjawisk sejsmicznych podczas zatłaczania CO2 oraz nie pozwoli na wykonywanie pasywnej tomografii. Przy niskiej porowatości zbiorników w Polsce południowej, z bardzo dużym prawdopodobieństwem należy oczekiwać aktywności sejsmicznej podczas zatłaczania CO2, co może znacznie poprawić jakość wyników monitorowania rozprzestrzeniania się plamy CO2, a równocześnie obniżyć koszty w stosunku do drogiej metody sejsmicznej, szczególnie w wydaniu 3D i 4D.

Koszty

W dyrektywie Parlamentu Europejskiego w sprawie geologicznego składowania dwutlenku węgla (2009) wskazuje się na konieczność zapewnienia środków na monitorowanie na okres eksploatacji oraz przynajmniej 20-30 lat po likwidacji zbiornika. Znacząco niższe koszty obliczeń tomograficznych opartych na rejestracji przy pomocy stałej sieci sejsmologicznej założonej w obszarze zbiornika, w porównaniu do okresowych badań sejsmicznych wskazują, że warto zainwestować w zastosowanie tej techniki monitorowania procesu zatłaczania CO_2 w trakcie zatłaczania i w okresie po likwidacji składowiska.

Koszt montażu na stałe sejsmicznych mierników drgań (12 sond) w otworze o długości do 1500m, wraz z systemem do rejestracji, akwizycji i analizy danych. wyniesie około 0,7 do 1,0 mln Euro. Do tego należałoby doliczyć koszty sieci powierzchniowej w kwocie rzędu 200-500 tys. Euro oraz koszty roczne nadzoru technicznego i merytorycznego (analiza danych i opracowywanie wyników do sprawozdań.

PODSUMOWANIE

Poza standardowo stosowanymi aktualnie technikami monitorowania, w dokumentacji zaproponowano wykorzystanie metody sejsmologicznej do monitorowania geologicznego składowania CO_2. Stacjonarna sieć sejsmologiczna jest w stanie rejestrować zjawiska sejsmiczne związane z pękaniem skał o niskiej porowatości w trakcie wtłaczania CO_2. Metoda ta pozwala na lokalizację pęknięć, a tym samym na śledzenie chmury wtłaczanego CO_2 oraz położenia i kierunku ewentualnych dróg przecieku.

Wykorzystując naturalne zjawiska dynamiczne wywoływane tworzeniem się nowych szczelin podczas procesu zatłaczania CO_2 zarejestrowane przez przestrzenną sieć sejsmologiczną, można również 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 zatłaczania CO2 oraz w nadkładzie.

Sieć sejsmologiczna może być również wykorzystana do monitorowania sejsmiczności niezwiązanej z procesem zatłaczania CO_2. W strefach naturalnej aktywności sejsmicznej są to trzęsienia Ziemi natomiast w strefach prowadzenia działalności górniczej są to wstrząsy górotworu indukowane procesem eksploatacji oraz warunkami lokalnej tektoniki.

Korzyścią zastosowania tej metody byłoby również ograniczenie ilości drogich pomiarów sejsmicznych 2D, 3D i 4D.

Plany monitoringu testowego zatłaczania CO2 dla struktury będącej alternatywą dla obiektu Skoczów-Czechowice (AGH & PIG-PIB)

(Stanisław Nagy)

(Adam Wójcicki)

W ramach tego punktu opracowano "Projekt prac geologicznych na wykonanie otworów wiertniczych Nowy Glinnik 1 i 2i dla zbadania chłonności utworów jury w strukturze wodonośnej Budziszewice-Zaosie" (załączony na CD).

Była to inicjatywa Ministerstwa Środowiska mająca na celu stworzenie polskiego odpowiednika „laboratorium" polowego w Ketzin.

Cel i zakres prac

Cel

- otwór badawczy Nowy Glinnik 1 (NG 1) do monitorowania procesu zatłaczania w ramach pilotażowego projektu sekwestracji dwutlenku węgla.

  Lokalizacja wiercenia: X(N)=5717058; Y(E)=7436133 (Układ 2000).

  Projektowana głębokość – 1538 m ± 10% (do stropu retyku).

- otwór badawczy-iniekcyjny Nowy Glinnik 2i do zatłaczania CO2 w ramach pilotażowego projektu sekwestracji dwutlenku węgla.

  Lokalizacja wiercenia: X(N)=5717068; Y(E)=7436183 (Układ 2000).

  Projektowana głębokość - 1239m ± 10% (do nawiercenia 10 m formacji gielniowskiej – dolny pliensbach).

Zakres prac

- Określenie ciśnienia maksymalnego - na początku zatłaczania,
- Zatłoczenie markerów (np. gazowych, SF6),
- Testowanie metod geofizycznych: VSP, tomograficznych (cross well tomography) i innych - pokazujących zmiany nasycenia wokół odwiertu zatłaczania oraz zasięg zatłaczanego CO_2: tomografia otworowa, X-well tomography), sejsmika pasywna, VSPa,
- Przygotowania do technologii monitoringu wgłębnego,

- Określenie na podstawie danych z wiercenia własności przepuszczalności pionowych, poziomych (absolutnych) oraz fazowych (w laboratorium). Określenie ciśnienia progowego ("treshold pressure") - na podstawie rdzeni z nadkładu,
- Określenie ciśnienia "treshold pressure" w trakcie testu in situ,
- Określenie indeksu chłonności określenie przewodności (kh),
- Potwierdzenie szczelności poprzez test pulsacyjno-interferencyjny w badanym otworze,
- Sprawdzenie szczelności płaszcza cementowego otworów badawczych,
- Określenie wstępne ściśliwości ośrodka (c x phi x h),
- Wykonanie kompletu badan geochemicznych,
- Przygotowanie i wdrożenie pierwszego systemu monitoringu geofizycznego,
- Przygotowanie i sprawdzenie innych procedur związanych z bezpieczeństwem składowania CO_2,
- Przygotowanie odpowiedniego raportu badawczego dla Ministerstwa Środowiska i Wyższego Urzędu Górniczego,
- Przygotowanie innych publikacji dot. pilotowego zatłaczania.

Określenie ilości CO2 do zatłoczenia w ramach projektu

Faza I – faza wstępna po zakończeniu wiercenia

a. zatłaczanie po 72 ton CO2 dziennie - razem 1008 ton CO2 (ok. 14 dni)

b. zatłaczanie po 36-72 ton CO2 dziennie - razem ok. 2240 ton CO2, 36 ton CO2/d przez 30 dni =1080 t, 48 ton CO2/d przez 15 dni =720 ton, 72 ton CO2/d przez 7 dni - ok. 500 ton)

Razem zatłaczanie w I fazie powinno objąć ok. 3300 ton CO2. Zatłaczanie poniżej 500 tys. ton jest traktowane jako mały projekt.

Faza II – ciągłe zatłaczanie do 10-12 tys. ton CO2 w ciągu roku – opcjonalnie np. 36 ton CO2/d x 330 dni = 11 880 ton. Etap konieczny przed uruchomieniem pełnego zatłaczania z instalacji demonstracyjnych (pilotowych) CCS -może być odłożony w czasie.

Faza III – ciągłe zatłaczanie w ilości ok. 10-12 tys. ton CO2 – jak w fazie II. Faza III – nastawiona na pełne wdrożenie monitoringu CO2 powinna być realizowana po zakończeniu fazy II, po przeanalizowaniu wykonanych badań.

Monitoring procesu zatłaczania

Wprowadzenie

Miejsce do składowania CO_2 musi się cechować odpowiednio dobrymi parametrami zbiornikowymi oraz posiadać wystarczającą izolację hydrauliczną skał stropowych i spągowych oraz posiadać wystarczającą izolację skał w strefach brzeżnych przyszłego zbiornika, celem uniemożliwienia ucieczki CO_2. Szczelność zależy od struktury geologicznej zbiornika jego własności petrofizycznych oraz od rodzaju płynu zatłaczanego (czy CO_2 jest w postaci gazowej czy w postaci krytycznej) oraz rozkładu ciśnienia w trakcie zatłaczania. Ryzyko utraty szczelności jest trudne do oceny ze względu na złożoną strukturę ośrodka geologicznego niemożliwą do pełnego rozpoznania, skomplikowane procesy fizyczne zachodzące w zbiorniku, nieliniowe zmiany w górotworze. Dlatego do badania szczelności zbiornika CO_2 najlepiej używać metod pozwalających kontrolować rozprzestrzenianie się gazu w strukturze geologicznej. Do osiągnięcia tego celu bardzo pomocnymi mogą być 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 prędkości fal sejsmicznych i ich tłumienie, gęstość ośrodka i jego własności elektryczne.

Monitoring sejsmiczny

Zmiany własności sprężystych wywołane zatłoczeniem dwutlenku węgla dają wyraźny efekt sejsmiczny. Doświadczenie uzyskane dotychczas na złożu norweskim Sleipner oraz badania modelowe wykazały że najlepszymi metodami wykorzystania pomiarów sejsmicznych jest badanie zmienności amplitudy (AVO) z odległością 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. Nasycenie warstwy dwutlenkiem węgla powoduje, że czas przejścia przez tą warstwę wzrasta a więc obserwujemy opóźnienie refleksów sejsmicznych pochodzących z poziomów niższych niż nasycona warstwa w porównaniu z czasami zarejestrowanymi w ośrodku nienasyconym CO_2.

Z uwagi na projektowane ilości zatłaczanego CO_2 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 zatłaczaniem może być bliski błędowi pomiaru, zwłaszcza w pierwszym etapie testowego zatłaczania. Jeżeli jednak możemy go pomierzyć, to ten sposób detekcji CO_2 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 zatłaczaniem (tła)

- 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 naprężeń w ośrodku, o złożonym rozkładzie. Dotyczy to zarówno lokalnych rozkładów naprężeń wokół por, jakie powstają w rejonach dużego gradientu ciśnień jak również regionalnych rozkładów w nadkładzie gdzie powstają naprężenia wynikające przesuwającego się frontu zatłaczania. Jeżeli 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:

- można badać intensywność procesów zachodzących w ośrodku badając aktywność (ilość zdarzeń w jednostce czasu) sejsmoakustyczną.
- lokalizacja hipocentrum możliwa, gdy prowadzimy rejestracją przy pomocy sieci czujników pozwala wyznaczyć rejony, w których naprężenia są szczególnie intensywne.
- jeżeli rejestracja dotyczy fal poprzecznych to można określić kierunki spękań wykorzystując fakt, że ten rodzaj fali ulega rozszczepieniu i dzięki temu zjawisku istnieje możliwość takiej interpretacji zarejestrowanych fal sejsmicznych aby można było wyznaczyć kierunki spękań.

Wykorzystanie sejsmiki pasywnej (czyli inaczej mikrosejsmologii) jest przewidywane w trakcie procesu zatłaczania i monitorowania.

Szczegółowy zakres przedsięwzięć związanych z umiejscowieniem sond (nadajników/anten) , częstotliwość pomiarów, położenie poziome i pionowe - będzie przedmiotem odrębnego projektu technicznego.

Monitoring elektromagnetyczny i VSP 3C

Przewiduje się wykorzystanie międzyotworowego monitoringu elektromagnetycznego i VSP 3C z wykorzystaniem sond geofizycznych.

Szczegółowy zakres przedsięwzięć związanych z umiejscowieniem sond (nadajników/anten) w otworach, częstotliwość pomiarów, położenie pionowe - będzie przedmiotem odrębnego projektu technicznego.

Monitoring geochemiczny gruntu i wód gruntowych wokół otworu zatłaczającego

Faza przed zatłaczaniem - określenie tła.

Obszar badań około 5000 m^2 , tzn. W promieniu około 40 metrów wokół otworu:

- pomiary zawartości CO_2, radonu, helu, węglowodorów, O_2, $H_2 + N_2$ w powietrzu glebowym w siatce 10x10 m - 200 pkt. pomiarowych
- wykonanie 18 otworów małośrednicowych wokół planowanego otworu zatłaczającego
- pomiary zawartości CO_2, radonu, helu w małośrednicowych otworach wykonanych wokół planowanego otworu zatłaczającego - 2 strefy (łącznie 18 otworów)
- pobór próbek powietrza glebowego
- badania próbek powietrza glebowego w laboratorium - metodami chromatograficznymi oraz badania izotopowe węgla i tlenu w CO_2
- wykonanie piezometrów - 4 otwory do max 20 m - 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_2)
- znaczniki gazów zatłoczone razem z CO_2 do otworu - mierzone w odwiercie obserwacyjnym

Faza zatłaczania

Bieżące pomiary CO_2 w powietrzu glebowym wykonywane w trakcie pompowania CO_2 do otworu

Faza po zatłoczeniu - monitoring

- pomiary zawartości CO_2, radonu, helu, węglowodorów, O_2, $H_2 + N_2$ w powietrzu glebowym w siatce 10x10 m - 200 pkt. pomiarowych
- pomiary zawartości CO_2, radonu, helu w mało średnicowych otworach wykonanych wokół planowanego otworu - 2 strefy (łącznie 18 otworów)
- pobór i badania próbek powietrza glebowego w laboratorium - metodami chromatograficznymi oraz badania izotopowe węgla i tlenu w CO_2
- pobór próbek wód podziemnych w określonych okolicznych stu-dniach, w wykonanych piezometrach
- badania wód podziemnych (określenie zawartości jonów głównych, pH, alkaliczności, izotopy stałe, gazy łącznie z węglowodorami, CO_2).

Biomonitoring

Przewiduje się badania koncentracji CO_2 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 szczegółowy zakres prac zostanie podany w odrębnym projekcie technicznym. Prace zostaną wykonane w formie:

- monitoringu zerowego przed zatłaczaniem (tła)
- pomiarów po zakończeniu kolejnych etapów zatłaczania.

Prace geodezyjne

Dokładna lokalizacja płytkich otworów małośrednicowych i piezometrów oraz punktów poboru próbek gleby/gruntu zostanie określona za pomocą GPS. Współrzędne punktów grawimetrycznych zostaną określone za pomocą GPS i niwelacji klasycznej.

Trzeci obiekt solankowy

Uzgodniono że jako trzeci obiekt w poziomach solankowych zostaną opracowane dwa obiekty/struktury:

- Choszczno-Suliszewo w rejonie NW Polski, ewentualnie na potrzeby aglomeracji szczecińskiej

- Grodzisk-Ujazd-Bukowiec (Niecka Poznańska - megastruktura solankowa, w stropie której występują też złoża gazu) w rejonie Wielkopolski, ewentualnie na potrzeby aglomeracji poznańskiej.

Dla struktury Choszczno-Suliszewo podstawowym kolektorem są piaskowce dolnej jury natomiast megastruktura Niecki Poznańskiej obejmuje kolektor czerwonego spągowca.

Zgodnie z wnioskami z prac przeprowadzonych w ramach zadania **1.1.17** definitywne określenie możliwości bezpiecznego geologicznego składowania dla rozpatrywanych obiektów wymaga dokładnego rozpoznania kompleksu składowania. Do tego celu niezbędne jest zgodnie z zasadami sztuki wykonanie przed zatłaczaniem (najpierw ewentualnie testowym, ale lokalizację otworu do testowego zatłaczania w projekcie demonstracyjnym wybiera się z myślą o jego przyszłym wykorzystaniu do zatłaczania w pełnej skali) monitoringu zerowego (Chadwick et al., 2008). Z kolei prace wykonane w ramach monitoringu zerowego powtarza się z różną częstotliwością, w zależności od metody i etapu projektu demonstracyjnego, w trakcie zatłaczania 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*).

W przypadku struktury Choszczno-Suliszewo w ramach niniejszego zadania opracowano:

- założenia do projektu wiercenia i wyposażenia otworów do testowego zatłaczania CO2 dla lokalizacji Choszczno (AGH we współpracy z PIG-PIB); ponadto PIG-PIB i AGH opracowały przykładowy projekt wiercenia i wyposażenia otworów do testowego zatłaczania CO2 dla lokalizacji Dziwie koło Kłodawy, zatwierdzony przez Ministerstwo Środowiska;

- plan monitoringu sejsmologicznego i tomografii pasywnej (GIG);

- plan monitoringu geochemicznego i biogeochemicznego w rejonie otworów zatłaczających (IGSMiE PAN, założenia odnośnie badanej lokalizacji podane przez PIG-PIB);

- plan monitoringu geofizycznego powierzchniowego metodami niesejsmicznymi (PBG; grawimetria, metody elektromagnetyczne oraz metoda elektrooporowa) a także z wykorzystaniem sejsmiki 2D (PIG-PIB).

Natomiast dla obszaru Niecki Poznańskiej INiG wykonał propozycję programu monitoringu parametrów zbiornikowych i uszczelniających, w tym z wykorzystaniem sejsmiki 4D.

projekt wiercenia i wyposażenia otworów do testowego zatłaczania CO2 dla lokalizacji Iskrzyczyn (AGH we współpracy z PIG-PIB), plan monitoringu sejsmologicznego (GIG) dla wybranej lokalizacji zatłaczania. Natomiast założenia dla wykorzystania najbardziej zaawansowanych metod monitoringu sejsmicznego, w tym sejsmiki 4D (INiG) zostały przedstawione w podrozdziale **1.1.18** dotyczącym struktur naftowych (złoże ropy Nosówka i rejon GZW łącznie), z uwagi na fakt, że w obu przypadkach mamy do czynienia z podobnymi warunkami geologicznymi w obrębie tej samej jednostki - brzeżnej strefy Karpat i Zapadliska Przedkarpackiego.

Dodatkowo PIG-PIB i AGH opracowały pilotowy projektu prac geologiczny na badanie chłonności utworów jury dla struktury będącej alternatywą dla obiektu Skoczów-Czechowice (otwór badawczy/monitoringowy, otwór zatłaczający, monitoring powierzchniowy i otworowy przed, w trakcie i po zakończeniu zatłaczania), tzn. dla struktury Budziszewice, lokalizacja Glinnik, zamieszczony na CD, którego podstawowe założenia przedstawiono na końcu niniejszego podrozdziału.

Prace zostały wykonane przez następujących partnerów konsorcjum: **AGH**, **INiG**, **GIG** oraz **PIG-PIB)**.

W następnych podrozdziałach przedstawiono analizy różnych aspektów ryzyka geologicznego składowania dla obu struktur.

GIG wykonał przeglądowe analizy i oceny ryzyka w oparciu o dotychczasowe wyniki badań prowadzonych przez członków konsorcjum w ramach segmentu II, w szczególności zadań **1.1.15** i **1.1.16**. Jako podstawę do analiz przyjęto metodologię z podręcznika najlepszych praktyk projektów CO2STORE, SACS i SACS2 (Chadwick et al., 2008), w szczególności analizę FEP (Feature-Events-Procedures). Z kolei AGH wykonał analizy niepewności określenia parametrów kompleksu składowania (zbiornik i uszczelnienie) w aspekcie bezpieczeństwa składowania i integralności składowiska dla dwóch różnych wariantów modeli kompleksu składowania w dolnej jurze i związanych z nimi scenariuszy składowania.

Wstępne projekty wierceń na potrzeby programu monitoringu dla obiektu Choszczno-Suliszewo (AGH)

(Stanisław Nagy, Rafał Wiśniowski, Tomasz Włodek, Łukasz Klimkowski, Krzysztof Polański)

(założenia PIG-PIB: Adam Wójcicki, Anna Feldman-Olszewska)

Projekt wiercenia i wyposażenia otworu Choszczno IG-1a, zakłada opracowanie programu monitoringu dla wytypowanych składowisk oraz wykonanie wstępnych projektów wierceń na potrzeby programu monitoringu dla obiektu Choszczno-Suliszewo.

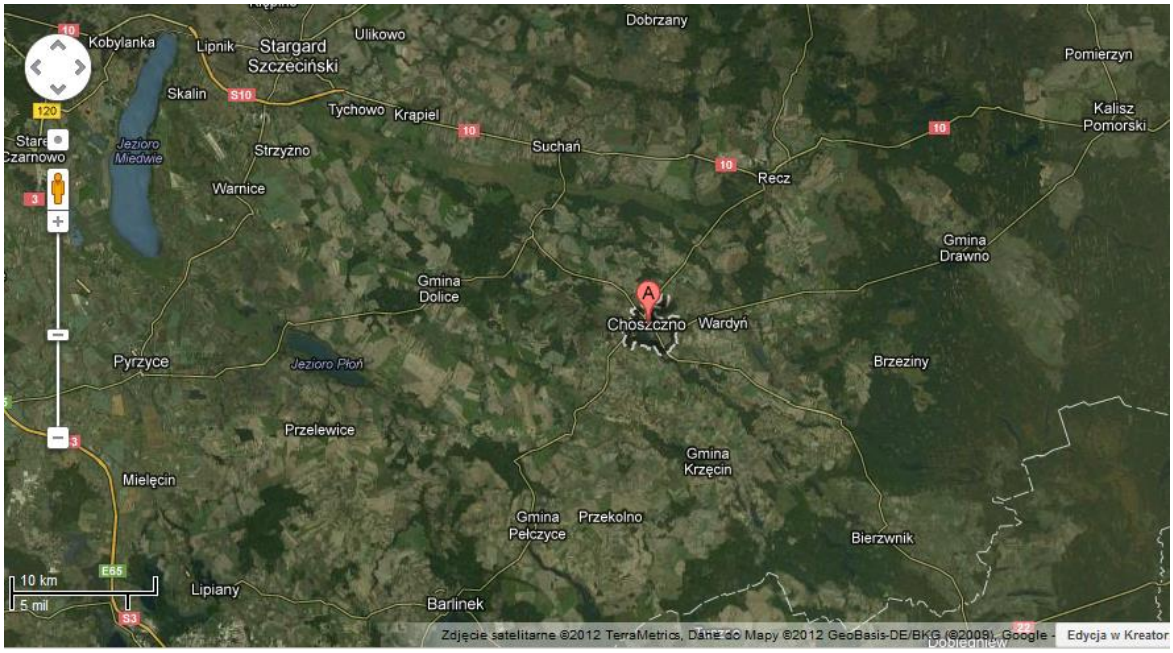


Fig. 1.1.18_46 Lokalizacja inwestycji. Mapa satelitarna (google.maps, 2012)

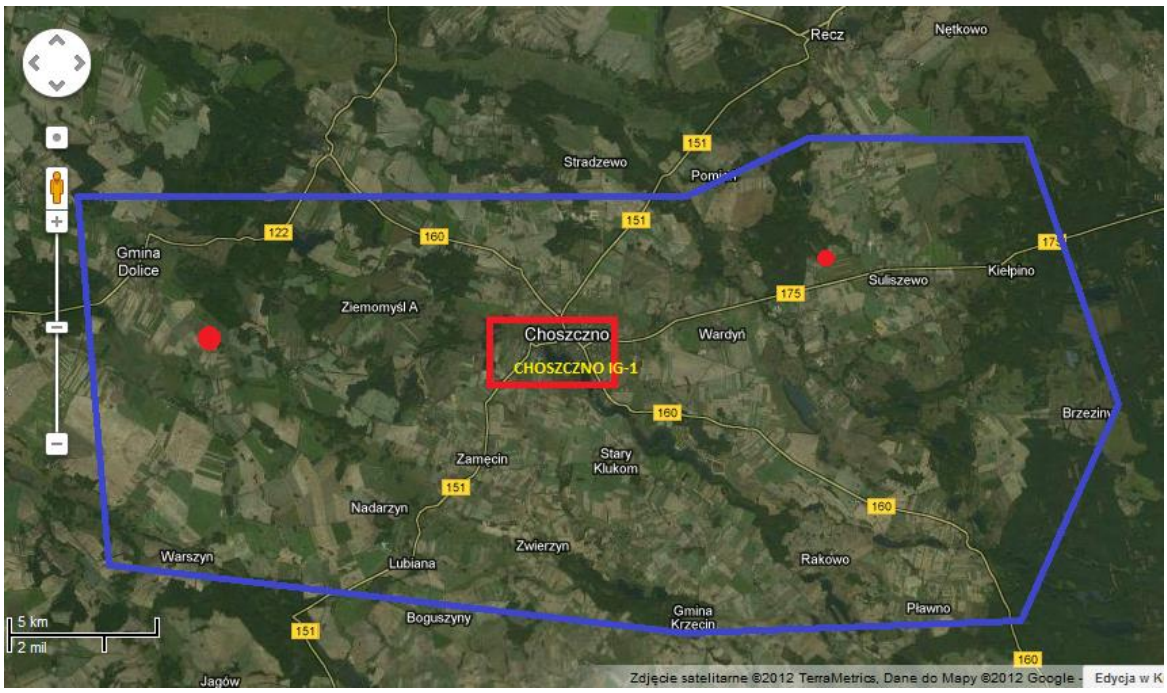


Fig. 1.1.18_47 Lokalizacja projektu. Mapa satelitarna (google.maps, 2012)

Fig. 1.1.18_48 Obszary chronione w pobliżu lokalizacji inwestycji. (http://www.dpn.pl/)

Lokalizacja odwiertów nie stwarza zagrożenia negatywnego wpływu na przyrodę w obszarze Natura 2000.

Cel wiercenia, lokalizacja i planowana głębokość otworów

Otwór Choszczno IG-1a do monitoringu zatłaczania dwutlenku węgla Lokalizacja - gmina: Choszczno - współrzędne:

Choszczno IG-1a (+253,0 m n.p.m.)

1992 : 234831,0; 486160,0

WGS84 : N 49°58'50,2; E 18°48'24,9

Projektowana głębokość – 1470 m (hettang) ± 10%

Otwór Choszczno IG-1A planowany jest w odległości 800 m od otworu zatłaczającego Choszczno – CO2.

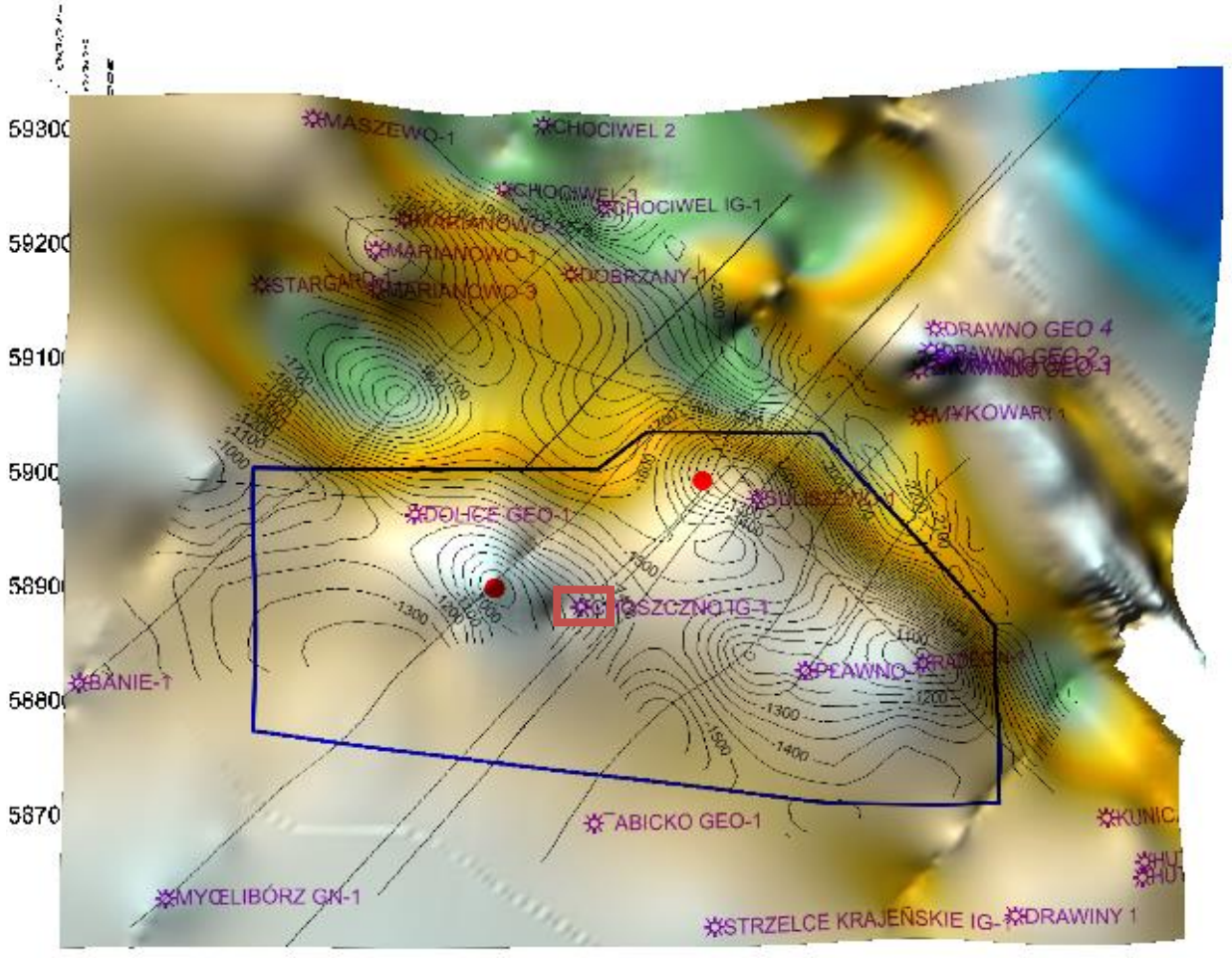


Fig. 1.1.18_49 Lokalizacja otworu monitorującego Choszczno IG-1a na tle mapy strukturalnej (Wójcicki i inni, 2012)

Na całej długości wierconych otworów dopuszcza się maksymalny kąt odchylenia od osi pionowej 1° przy czym maksymalny przyrost kąta odchylenia nie powinien przekraczać 1°/30 m. W czasie wiercenia należy

wykonywać punktowo pomiary kąta odchylenia i azymutu inklinometrem wrzutowym co ok. 100 m oraz przed każdym wyciąganiem przewodu. Uwaga! W celu pomiaru azymutu należy w zestawie przewodu wiertniczego umieścić obciążnik niemagnetyczny. Profil otworu został podany w **Tabeli 1.1.18_10.**

Tab. 1.1.18_10 Przewidywany profil stratygraficzny otworu

Głębokość [m]		**Stratygrafia**	
TVDSS	**MD**		
65.00	0.00	Q	czw.
-83.70	148.70	OL2	
-89.43	154.43	K	kreda
-89.43	154.43	K3	
-89.70	154.70	KM	
-108.56	173.56	KCP	
-108.70	173.70	KCP3	
-358.50	423.50	KCP1	
-464.83	529.83	KST	
-465.50	530.50	KST3	
-621.00	686.00	KST1	
-699.27	764.27	KCN	
-700.00	765.00	KCN3	
-737.00	802.00	KCN1	
-778.90	843.90	KT	
-779.00	844.00	KCT3	
-821.00	886.00	KCT1	
-881.00	946.00	KC	
-920.01	985.01	K1	

-928.00	993.00	KH	
-919.96	984.96	KAL	
-920.00	985.00	KAL3	
-923.50	988.50	KAL2+KBA	
-932.42	997.42	J	
-932.50	997.50	JO2	jura górna
-972.50	1037.50	JO1	
-985.41	1050.41	J2	
-985.50	1050.50	JCL3	
-1064.00	1129.00	JCL1	
-1066.99	1131.99	JBT	jura środkowa
-1067.00	1132.00	JBT3	
-1095.02	1160.02	JBJ	
-1095.04	1160.04	JBJ3	
-1097.50	1162.50	JBJ1	
-1098.70	1163.70	J1	jura dolna
-1098.70	1163.70	JTO3	toark
-1103.50	1168.50	JTO1	
-1164.79	1229.79	JPL	
-1165.00	1230.00	JPL3	pliensbach
-1250.30	1315.30	JPL1	
-1282.70	1347.70	JS	
-1282.70	1347.70	JS3	synemur
-1403.00	1468.00	JS1	
-1405.00	1470.00	JH	hettang

Zarurowanie i cementowanie otworu

Podstawowe dane dotyczące zarurowania i zacementowania otworów podano w **Tabeli 1.1.18_11.**

Tab. 1.1.18_11 Zarurowanie i cementowanie otworów

Średnica rur	Średnica [mm]	Głębokość	Cementowanie
13 3/8''	438	0-24 m	Cementowane do wierzchu
9 5/8''	311	0-154 m	Cementowane do wierzchu
7''	216	0-1164m	Cementowane do wierzchu +paker zewnętrzny
liner 4 ½	149	1230 m	

Wszystkie horyzonty wodonośne powyżej (trzeciorzęd) powinny być zamknięte przed zakończeniem wiercenia. Proces cementowania powinien być przeprowadzony w sposób uniemożliwiający przepływ metanu i CO2 poza rurami do izolowanych horyzontów, zarówno po rozpoczęciu wiercenia jak i w długim okresie po zakończeniu zatłaczania.

Przewidywane występowanie horyzontów

W utworach czwartorzędu przewiduje się występowanie wód gruntowych oraz horyzontów nasyconych wodami słodkimi.

Przewidywane występowanie gazów toksycznych

W profilu projektowanego otworu nie przewiduje się występowania gazów toksycznych.

Przewidywane gradienty ciśnienia złożowego w profilu projektowanego otworu

W projektowanym profilu otworu przewiduje się występowania gradientów ciśnienia złożowego w zakresie: 0,09-0,10 MPa/10 m.

Przewidywane gradienty ciśnienia szczelinowania w profilu projektowanego otworu

W profilu otworu przewiduje się następujących występowanie gradientów ciśnienia szczelinowania:

w interwale 0-120 m - 0,170-0,200 MPa/10 m.

w interwale 120-1230 m - 0,180-0,240 MPa/10 m.

Przewidywane trudności w czasie wiercenia

W trakcie przewiercania klastycznych utworów czwartorzędu przewiduje się możliwość obsypywania, kawernowania i zaciskania ściany otworu. W trakcie przewiercania klastycznych utworów przewiduje się możliwość zaników płuczki w poziomach piaskowcowych o dobrych parametrach zbiornikowych.

Projektowane pobieranie prób okruchowych

Projektuje się w obu otworach pobierać próbki okruchowe w interwałach nie rdzeniowanych co 10 m, a od głębokości 500 m co 5 m.

W zakresie głębokości ok. 1164-1230 m, w przypadku niemożności pobrania rdzenia w jakimkolwiek odcinku, należy pobierać próby okruchowe z tych odcinków co 3 m. Z każdej głębokości należy pobrać: próbkę 500 g, nieprzemytą i wysuszoną.

W całym profilu otworu należy pobierać co 30 m 2 próbki po 100 g, przemyte i wysuszone do badań geochemicznych. Próby okruchowe powinny być przechowywane w odpowiednio przygotowanych skrzynkach. Skrzynki powinny być opisane czytelnie i trwale na boku, wierzchu i szczycie. Każda skrzynka powinna zawierać nazwę otworu oraz interwał z którego pobrano próby okruchowe. Zarówno na wiertni jak i podczas transportu, skrzynki muszą być przykryte wieczkami.

Projektowane rdzeniowanie

W otworze **Choszczno IG-1a** projektuje się rdzeniowanie w następujący sposób interwałów:

Rdzeniowanie ciągłe:

- poziom uszczelniający (-1132 m ppm)

- poziom złożowy (strop) (-1168 m ppm)

Rdzenie powinny być układane do znormalizowanych (o długości 1 m) pojedynczych lub podwójnych skrzynek, przestrzegając ułożenia rdzenia „góra-dół”. Skrzynki powinny być opisane czytelnie i trwale na boku, wierzchu i szczycie. Opis powinien zawierać numer i nazwę otworu, numer kolejny skrzynki, numer marszu, głębokość (od-do). Rdzeń kruchy, nie wypełniający skrzynki, należy unieruchomić przegródkami o opisanych głębokościach. Zarówno na wiertni jak i podczas transportu, skrzynki muszą być przykryte wieczkami.

Uwaga: Przewiduje się możliwość zmiany zakresu rdzeniowania w zależności od faktycznie przewiercanego profilu geologicznego i facjalnego rozwoju warstw oraz bieżących ustaleń z osobami nadzoru prac geologicznych i autorami projektu. Prawdopodobnie w otworze iniekcyjnym odcinki rdzeniowania będą znacznie ograniczone.

Przekazanie i przechowywanie rdzeni wiertniczych oraz prób okruchowych

Rdzenie wiertnicze oraz próby okruchowe powinny zostać zabezpieczone i przekazane odpowiedniemu organowi administracji geologicznej zgodnie z: USTAWĄ z dnia 9 czerwca 2011 r. Prawo geologiczne i górnicze oraz ROZPORZĄDZENIEM MINISTRA ŚRODOWISKA 1) w sprawie gromadzenia i udostępniania informacji geologicznej z dnia 15 grudnia 2011 r.

Po zakończeniu wiercenia skrzynki z pozyskanym rdzeniem wiertniczym oraz próbami okruchowymi zostaną przewiezione do magazynu rdzeni Państwowego Instytutu Geologicznego lub innego wskazanego przez Ministra Środowiska.

Zakres badań laboratoryjnych:

- Powierzchniowe zdjęcia gazowe oraz monitoring środowiska naturalnego w strefie odwiertu przed rozpoczęciem i po ukończeniu wiercenia,

- Badania własności fizycznych i chemicznych próbek rdzeni,

- Analizy mikrofaunistyczne, w utworach karbonu również makroflorystyczne, miosporowe oraz makrofunistyczne,

- Analizy petrograficzne i petrofizyczne,

- Analizy wód złożowych,

- Analizy płuczki i płynów porównawczych,

- Badanie parametrów zaczynu i kamienia cementowego.

Analizy petrograficzne, petrofizyczne, analizy geochemiczne, analizy mikrofaustyczne, inne badania rdzeni i kamienia cementowego poddanego oddziaływaniu CO2 powinny zostać wykonane po pobraniu rdzeni; analizy wód złożowych powinny zostać wykonane bezzwłocznnie po oczyszczeniu odwiertu zgodnie z wytycznymi zawartymi w pracy „Zasady i metodyka dokumentowania zasobów wód termalnych i energii, 1997”.

Zakres badań geofizycznych

ODC. I - w interwale 0-154 m przed zapuszczeniem kolumny rur 9 5/8”

profilowanie średnicy – XYC

profilowanie krzywizny - DEV

profilowanie oporności

profilowanie akustyczne - BSC

profilowanie gęstości - CDL

profilowanie gamma - GR

profilowanie porowatości neutronowej - CNT

profilowania - DIL + LL3 + PS

obliczenie objętości otworu pod rury 13 3/8”

ODC. II - w interwale 154-1164 m przed zapuszczeniem kolumny rur 7”

profilowanie średnicy - XYC

profilowanie krzywizny - DEV

profilowanie oporności - DLL + PS, MSFL

profilowanie gęstości - CDL

profilowanie gamma - GR

profilowanie porowatości neutronowej - CNT

cementomierz akustyczny w rurach 9 5/8” - RBT

obliczenie objętości otworu pod rury 7”

ODC. III - w interwale 1164-1230 m przy głębokości końcowej otworu

profilowanie gamma spektrometryczne - SCR

profilowanie średnicy profilowanie krzywizny - DEV

profilowanie akustyczne - BCS

profilowanie gęstości profilowanie gamma - GR

profilowanie - DLL + PS, HRAI + PS

profilowanie porowatości neutronowej - CNT

profilowanie temperatury - BHTP

cementomierz akustyczny w rurach 7’’

profilowanie gamma - GR

opcjonalnie: profilowanie neutron -gamma spektrometryczne SGR

opcjonalnie: rezonans magnetyczny MRL

opcjonalnie: dipolowa sonda akustyczna z orientacją przestrzenną

opcjonalnie: skaner opornościowy ultradźwiękowy XRMI

opcjonalnie: skaner akustyczny Borehole Telev.

próbniki (typu RTF lub MFT) (dla określenia zmienności poziomej i pionowej przepuszczalności, ciśnienia złożowego oraz poboru próbek wody złożowej m.in. do badań RSA)

Po osiągnięciu głębokości końcowej i wykonaniu końcowych pomiarów geofizycznych przewiduje się opcjonalnie wykonanie pomiarów sejsmometrycznych „time lapse" VSP.

Końcowe średnice otworów

Końcowe średnice wierconych otworów wynosić będą 149 mm.

Przewidywane opróbowania w czasie i po ukończeniu wiercenia

Opcjonalnie przewiduje się badania mikroszczelinowania (minifrac) dla warstwy zatłaczającej CO2 i uszczelnienia

Przewiduje się badania próbnikiem typu RST – celem poboru wody do analizy RSA oraz innych analiz, określenie ciśnienia porowego i zgrubną estymację przepuszczalności pionowej i poziomej

W przypadku stwierdzenia dobrej przepuszczalności warstwy chłonnej i jej stabilnej budowy otwór nie musi być poszerzany ani filtrowany.

Udostępnione poziomy przewiduje się opróbować próbnikami złoża.

Zakres głębokościowy pracy laboratorium kontrolno - pomiarowego

Projektuje się pracę laboratorium kontrolno-pomiarowego w interwale od ok. 154 m (rozpoczęcie wiercenia) pod butem rur 9 5/8" do końcowej głębokości otworu.

Szczegółowy projekt konstrukcji otworów

Obecnie przyjmuje się, że kolektorami, do których może być zatłaczane CO2 są pokłady węgla w obrębie serii mułowcowej i górnośląskiej serii piaskowcowej (górny karbon).

Mając na względzie bezpieczeństwo planowanych prac i rejonu zaprojektowano otwory, których konstrukcja powinna być szczelna i wytrzymała przez bardzo długi okres czasu przy równoczesnym zapewnieniu skutecznego wtłaczania CO_2 w pokłady charakteryzujące się przepuszczalnością od 0 do 4 mD.

Po przygotowaniu terenu wiertni i kolaudacji należy wykonać otwór świdrem o średnicy 17 ¼" (438 mm) i zapuścić do otworu kolumnę wstępną o średnicy 13 3/8" najlepiej do warstwy ilastej położonej na głębokości do 24 m (czwartorzęd i strop jego podłoża). Wskazane jest ją zacementować do wierzchu i po stójce na związanie zaczynu dalsze wiercenie otworu wskazane jest realizować stosując świder o średnicy 12 ¼ " (311 mm). Po dowierceniu do głębokości 154 m tj. po przewierceniu miocenu zakłada się zapuszczenie do otworu kolumny rur okładzinowych o średnicy 9 5/8" i zacementowanie jej do wierzchu.

Kolejna średnica świdra powinna wynosić 8 ½ " (216 mm) i otwór należy wiercić do osiągnięcia głębokości 1164 m (10-20 m poniżej spągu serii uszczelniającej). W ten odcinek otworu zaleca się zapuścić kolumnę rur okładzinowych 7" z pakerem zewnętrznym i uszczelnić ją na całej długości zaczynem cementowym odpornym na CO2. Do zasadniczych warstw, w które może być wtłaczany CO_2 trzeba dowiercić otwór świdrem o średnicy 5 7/8"(149 mm) i/lub aparatem rdzeniowym. Planuje się zapuścić do otworu kolumnę rur traconych szlicowanych na odcinku, którego długość zostanie ustalona po odwierceniu otworu do końcowej głębokości. Zakłada się średnicę rur 4 1/2" z minimalną zakładką 100m w rurach okładzinowych 7". Ze względu na możliwy kontakt tej kolumny rur z CO_2 zaleca się, aby była ona odporna na CO_2. To samo dotyczy zaczynu uszczelniającego.

Ponadto w zależności od rozpoznania górotworu otworem badawczym zasadnicze warstwy izolacyjne i chłonne mogą być rdzeniowane.

Schemat konstrukcji otworów przedstawiono na **Fig. 1.1.18_50.**

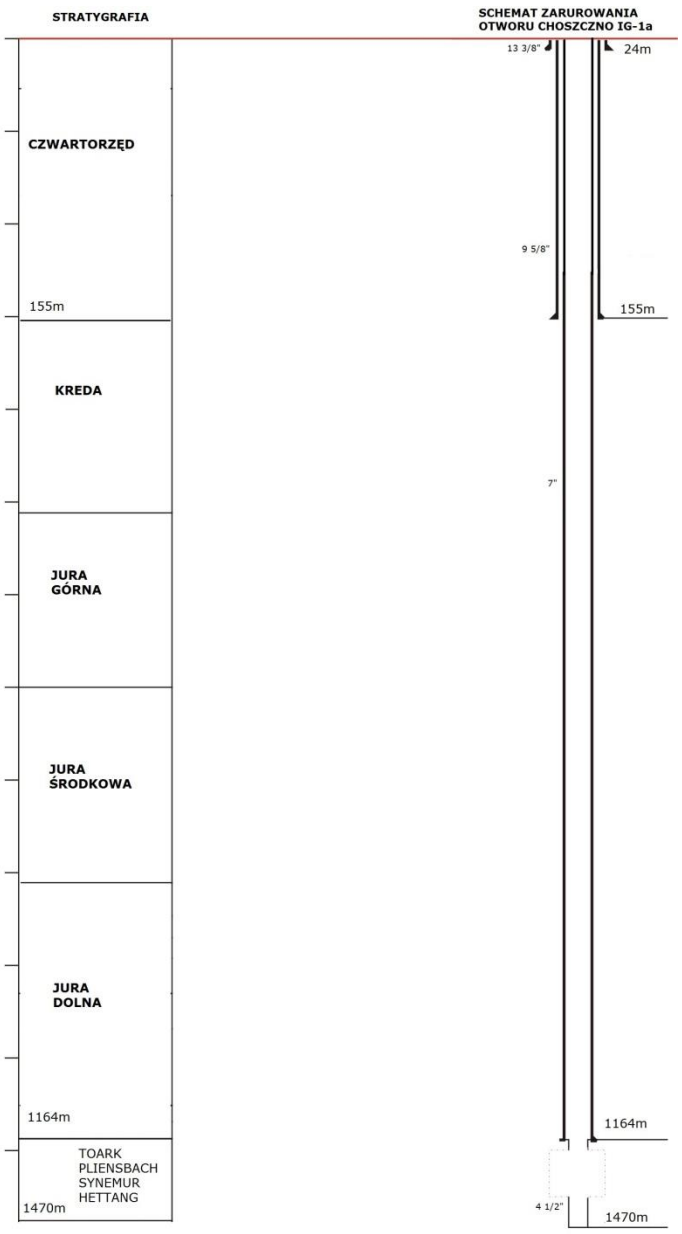


Fig. 1.1.18_50 Schemat zarurowania otworu Choszczno IG1a

Do właściwego zrealizowania otworu konieczne jest odpowiednie dobranie płuczki. Stąd na podstawie rozeznania rejonu wierceń proponuje się zastosowanie płuczek o poniższych parametrach w wyróżnionych interwałach.

Podstawowe parametry płuczki:

Interwał 0 – 154 m / płuczka bentonitowa /

gęstość 1,05 – 1,15 g/cm^3

filtracja poniżej 20 ml/0,7 MPa/30 min.

lepkość plastyczna możliwie niska

granica płynięcia 12 -15 Pa

pH 9,0 -11,0

Interwał 154 – 1164 m płuczka polimerowo – potasowa

gęstość 1,10 - 1,20 g/cm^3

filtracja poniżej 6 ml/0,7 MPa/30 min

lepkość plastyczna: możliwie niska

granica płynięcia 7-14 Pa (w temperaturze 50 ^{0}C)

K^+ około 60 g/l KCL (25-30 g/l K^+)

pH 7,5-9,0

Interwał 1164 – 1230 m płuczka polimerowo-potasowa z blokatorami

gęstość: 1,05 - 1,10g/cm^3

filtracja API: do uzyskania filtracji HTHP

filtracja HTHP: pon.10 ml/30 min. (90 ^{0}C,ciśn. różnicowe 35 at)

lepkość plastyczna: możliwie niska

K^+ około 60 g/l KCL (25-30 g/l K^+)

granica płynięcia: 9 – 11 Pa

blokator węglanowy 60-100 kg/m^3

pH: 8,5 – 10,0

<u>Receptura płuczki:</u>

Interwał 0 - 154 m płuczka bentonitowa

Bentopol - 50 kg/m^3

NaOH - 2 kg/m^3

CMC LV - 8 kg/m^3

Detergent W - 2 kg/m^3

$NaHCO_3$ - wg. potrzeb

Gips - wg. potrzeb

Interwał 154 – 1164 m płuczka polimerowo-potasowa

<u>Receptura płuczki:</u>

KCL - 60 kg/m^3

PHPA - 4 kg/m^3

NaOH - 2 kg/m^3

CMC LV - 10 kg/m^3

Skrobia - 10 kg/m^3

PAA - 3 kg/m^3

PAC - w miarę potrzeb

Detergent W - w miarę potrzeb

Biostat - w miarę potrzeb

Blokator węgl. - przy wystąpieniu zaników płuczki

CMC HV - w miarę potrzeb

$NaHCO_3$ - „

Na_2CO_3 - „

XCD - „

Defpol - w miarę potrzeb

Interwał 1164 – 1230m płuczka polimerowa-potasowa z blokatorami

<u>Receptura płuczki:</u>

KCl - 60 kg/m^3

NaOH - 2 kg/m^3

Filter-chek - 20 kg/m^3

XCD - 2 kg/m^3

PAC - 3 kg/m^3

Blokator - do uzyskania ciężaru

Blokator organiczny – wg. potrzeb

Odpieniacz - w miarę potrzeb

Biocyd - wg.potrzeb

Polimer HPHT - 3 kg/m^3

Również ważnym czynnikiem prac wiertniczych jest dobór odpowiednich zaczynów uszczelniających. Na obecnym poziomie rozpoznania problemu proponuje się receptury zaczynów podane poniżej.

Rury 9 5/8" (0 – 154 m cdw.) Cementowanie przez przewód wiertniczy.

Przed zaczynem wtłoczyć przemywkę w ilości około 5 m^3

SKŁAD ZACZYNU CEMENTOWEGO:

Cement wiertniczy G - 100%

CaCl2 - 3%

PSP 061 - 0,3%

Gęstość zaczynu – 1,8 g/cm3 w/c – 0,5

Wytrzymałość kamienia cem. około – 10 MPa

Rury 7" (0 – 1164 m cdw.) Cementowanie jednostopniowe z użyciem dwóch klocków cementacyjnych.

Przed zaczynem wtłoczyć przemywkę w ilości około 6 m^3

SKŁAD ZACZYNU CEMENTOWEGO ODPORNEGO NA KOROZJĘ CO2:

CO2 R MIX* - 100%

KCl - 3%

PSP 031 - 0,17%

PSP 042 - 0,17%

PSP 061 - 0,4%

Gęstość zaczynu – 1,86 g/cm3 w/c – 0,5

Wytrzymałość kamienia cementowego około – 15 MPa

*) CO2 R MIX – mieszanina uszczelniająca odporna na korozję CO2

Po wywierceniu otworów do zaplanowanych głębokości należy je przygotować do monitoringu i do zatłaczania CO2. Szczegółowe schematy uzbrojenia otworów powinny zostać ustalone po ich odwierceniu. Na obecnym etapie prac zwraca się uwagę na konieczność zamontowania filtra z sitem, pakera, tulei cyrkulacyjnej i zaworu bezpieczeństwa. Wskazane jest prowadzenie obserwacji i zatłaczania CO2 przez rury wydobywcze 3 ½" TDS CO2 o grubości ścianki 7,34mm połączone z głowicą eksploatacyjną także odporną na CO2.

Model przepływu CO2 wokół otworu Choszczno IG-1a

Transport, magazynowanie i instalacje do zatłaczania CO2

Dwutlenek węgla można transportować oraz magazynować w postaci ciekłej. Przewożenie ciekłego dwutlenku węgla w warunkach polskich odbywać się będzie cysternami samochodowymi. Magazynowanie dwutlenku węgla w miejscu przeznaczenia (na powierzchni) odbywać się będzie w izolowanych zbiornikach ciśnieniowych. Zastosowany w tych zbiornikach system rur i zaworów jest tak zaprojektowany, aby zapewnić bezpieczeństwo obsługi. Standardowa aluminiowa parownica wewnętrzna ma prosty kształt, jest wydajna i nie wymaga odmrażania w trakcie normalnej pracy urządzenia. Zawory bezpieczeństwa są tak dobrane, aby niezależnie zabezpieczyć zbiornik przed nadmiernym wzrostem ciśnienia. Oprócz zbiorników montowane jest również inne wyposażenie związane z magazynowaniem CO2. W instalacjach tych prowadzony jest system monitoringu poziomu cieczy w zbiornikach. pozwalający na stałą kontrolę zatłaczania CO_2 i planowanie dostaw.

Dwutlenek węgla dostarczany rurociągiem lub cysternami w fazie ciekłej i składowany w temperaturze -20ºC przy ciśnieniu 2 MPa, w zbiornikach umożliwiających utrzymanie ciągłości operacji. Zestaw pomp pozwala osiągnąć maksymalną dzienną wydajność około od 18 do 72 t CO_2. Konieczny jest wymiennik ciepła do ogrzewania CO_2 do temperatury od -10 do +10OC przed zatłaczaniem w celu zapobiegania powstawania hydratów z CO_2 i głowicy otworu podczas podniesienia ciśnienia w otworze w momencie rozpoczynania zatłaczania. Przewiduje się, że zatłaczanie będzie prowadzone w sposób ciągły – jak pokazano wyżej.

Schemat instalacji do zatłaczania ciekłego dwutlenku węgla składa się z dwóch głównych elementów:

1. Zbiornik ciekłego dwutlenku węgla

Zbiornik magazynowy ciśnieniowy wykonany ze stali austenicznej (np. 18G2A), termicznie izolowany. Zbiornik musi być wyposażony w zawór bezpieczeństwa oraz posiadać możliwość łatwego i szybkiego podłączenia węży do rozładunku autocysterny. Przetłaczanie ciekłego dwutlenku węgla odbywać się będzie z wykorzystaniem pomp autocystern.

2. Pompa zatłaczania ciekłego dwutlenku węgla

Pobierany ze zbiornika magazynowego ciekły dwutlenek węgla o ciśnieniu ok. 1,5 MPa zostaje sprężony przez pompy do ciśnienia maksymalnego 10 MPa. Dwutlenek węgla będzie wtłaczany do złoża pod ciśnieniem głowicowym ok. 6 MPa.

Model numeryczny zatłaczania CO2 do warstw złożowych

Do realizacji zadania wykorzystano symulator GEM (Computer Modelling Group) z uwagi na:

- bezpośredni import modelu statycznego zbudowanego w Petrelu,

- doskonałe referencje (podobnie jak Eclipse 300/ PetraSim/ TOUGH),

- specjalny wbudowany moduł PVT do modelowania zatłaczania CO_2.

Przeprowadzono symulację zatłaczania CO_2 z wydajnością 1 [Mt CO_2/rok] otworem Choszczno-CO2 usytuowanym w szycie antykliny Choszczna.

Dla wybranej lokalizacji zatłaczania przeprowadzono symulację zatłaczania CO_2 z wydajnością 1 [Mt CO_2/rok] otworem Choszczno-CO2 oraz wygenerowano rozkład nasycenia gazem i ciśnienia złożowego. Bardzo dobre parametry petrofizyczne (przepuszczalność) analizowanej struktury magazynowej oraz przyjęcie modelu otwartego (z wykorzystaniem akifera analitycznego) skutkują jedynie nieznacznym wzrostem ciśnienia w odwiertach oraz całej strukturze. Otrzymane w wyniku modelowania ciśnienia zatłaczania są znacznie niższe niż ciśnienie szczelinowania oraz ciśnienie progowe (‘treshold pressure’, „breakthrough pressure”) warstw uszczelniających. Po zakończeniu fazy zatłaczania ciśnienia w strukturze szybko spada.

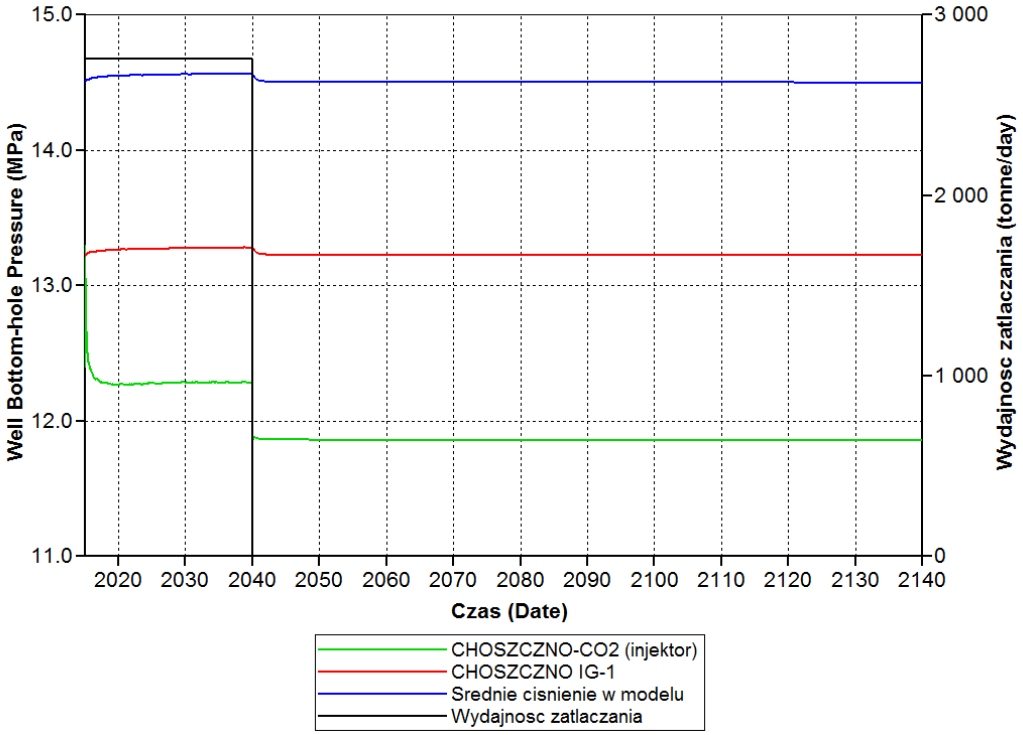


Fig. 1.1.18_51 Wydajność zatłaczania oraz przebiegi zmian ciśnienia w odwiertach oraz ciśnienia średniego

Lokalizacja odwiertu zatłaczającego w szczycie antykliny Choszczna sprawia, że zatłoczony dwutlenek węgla akumuluje się nad tym odwiertem a jego migracja jest nieznaczna nawet w skali kilkuset lat.

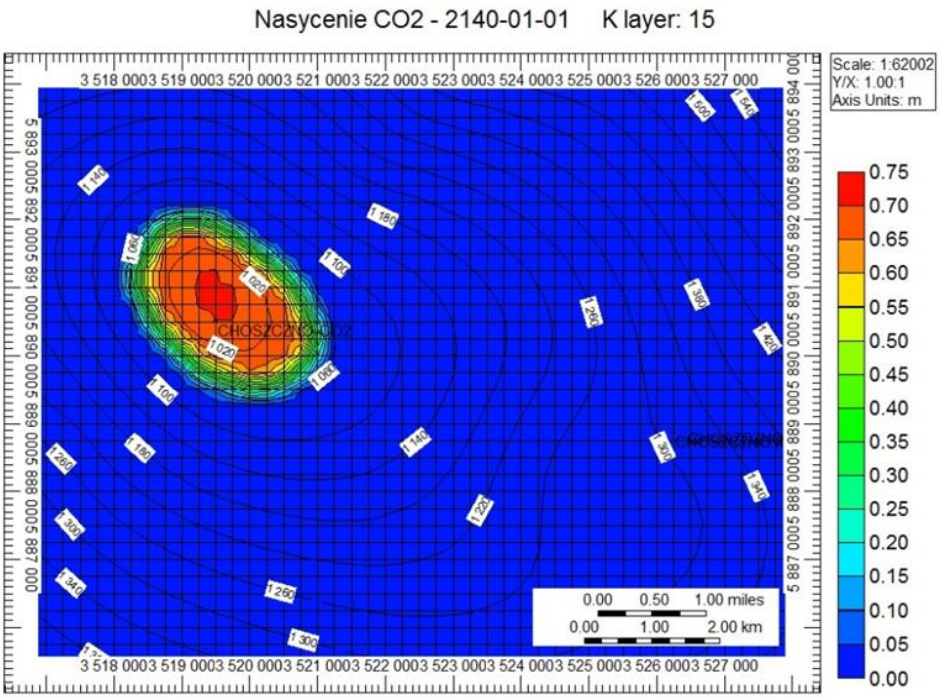


Fig. 1.1.18_52 Akumulacja zatłoczonego CO_2 w szczycie antykliny Choszczna (100 lat po zakończeniu zatłaczania)

Monitoring procesu zatłaczania – założenia oraz badania dodatkowe

Wprowadzenie

Miejsce do składowania CO_2 musi się cechować odpowiednio dobrymi parametrami zbiornikowymi oraz posiadać wystarczającą izolację hydrauliczną skał stropowych i spągowych oraz posiadać wystarczającą izolację skał w strefach brzeżnych przyszłego zbiornika, celem uniemożliwienia ucieczki CO_2. Szczelność zależy od struktury geologicznej zbiornika jego własności petrofizycznych oraz od rodzaju płynu zatłaczanego (czy CO_2 jest w postaci gazowej czy w postaci krytycznej) oraz rozkładu ciśnienia w trakcie zatłaczania. Ryzyko utraty szczelności jest trudne do oceny ze względu na złożoną strukturę ośrodka geologicznego niemożliwą do pełnego rozpoznania, skomplikowane procesy fizyczne zachodzące w zbiorniku, nieliniowe zmiany w górotworze. Dlatego do badania szczelności zbiornika CO_2 najlepiej używać metod pozwalających kontrolować rozprzestrzenianie się gazu w strukturze geologicznej. Do osiągnięcia tego celu bardzo pomocnymi mogą być 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 prędkości fal sejsmicznych i ich tłumienie, gęstość ośrodka i jego własności elektryczne.

Monitoring sejsmiczny

Zmiany własności sprężystych wywołane zatłoczeniem dwutlenku węgla dają wyraźny efekt sejsmiczny. Doświadczenie uzyskane dotychczas na złożu norweskim Sleipner oraz badania modelowe wykazały, że najlepszymi metodami wykorzystania pomiarów sejsmicznych jest badanie zmienności amplitudy (AVO) z odległością 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. Nasycenie warstwy dwutlenkiem węgla powoduje, że czas przejścia przez tą warstwę wzrasta a więc obserwujemy opóźnienie refleksów sejsmicznych pochodzących z poziomów niższych niż nasycona warstwa w porównaniu z czasami zarejestrowanymi w ośrodku nienasyconym CO_2.

Z uwagi na projektowane ilości zatłaczanego CO2 nie przewiduje się klasycznego 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 zatłaczaniem może być bliski błędowi pomiaru, zwłaszcza w pierwszym etapie testowego zatłaczania. Jeżeli jednak możemy go pomierzyć, to ten sposób detekcji CO2 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 zatłaczaniem (tła)

- 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 naprężeń w ośrodku, o złożonym rozkładzie. Dotyczy to zarówno lokalnych rozkładów naprężeń wokół por, jakie powstają w rejonach dużego gradientu ciśnień jak również regionalnych rozkładów w nadkładzie gdzie powstają naprężenia wynikające przesuwającego się frontu zatłaczania. Jeżeli 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:

- można badać intensywność procesów zachodzących w ośrodku badając aktywność (ilość zdarzeń w jednostce czasu) sejsmoakustyczną.
- lokalizacja hipocentrum, możliwa gdy prowadzimy rejestracją przy pomocy sieci czujników, pozwala wyznaczyć rejony, w których naprężenia są szczególnie intensywne.
- jeżeli rejestracja dotyczy fal poprzecznych to można określić kierunki spękań wykorzystując fakt, że ten rodzaj fali ulega rozszczepieniu i dzięki temu zjawisku istnieje możliwość takiej interpretacji zarejestrowanych fal sejsmicznych aby można było wyznaczyć kierunki spękań.

Wykorzystanie sejsmiki pasywnej (czyli inaczej mikrosejsmologii) jest przewidywane w trakcie procesu zatłaczania i monitorowania.

Szczegółowy zakres przedsięwzięć związanych z umiejscowieniem sond (nadajników/anten), częstotliwość pomiarów, położenie poziome i pionowe - będzie przedmiotem odrębnego projektu technicznego.

Monitoring elektromagnetyczny i VSP 3C

Opcjonalnie przewiduje się wykorzystanie międzyotworowego monitoringu elektromagnetycznego i VSP 3C z wykorzystaniem sond geofizycznych. W przypadku decyzji o budowie monitoringu elektromagnetycznego i VSP.Szczegółowy zakres przedsięwzięć związanych z umiejscowieniem sond (nadajników/anten) w otworach, częstotliwość pomiarów, położenie pionowe - będzie przedmiotem odrębnego projektu technicznego.

Monitoring geochemiczny gruntu i wód gruntowych wokół otworu zatłaczającego

Faza przed zatłaczaniem – określenie tła

- Obszar badań około 5000 m^2 , tzn. w promieniu około 40 metrów wokół otworu

- pomiary zawartości CO_2, radonu, helu, węglowodorów, O_2, $H_2 + N_2$ w powietrzu glebowym w siatce 10x10 m - 200 pkt. pomiarowych

- wykonanie 18 otworów małośrednicowych wokół planowanego otworu zatłaczającego

- pomiary zawartości CO_2, radonu, helu w małośrednicowych otworach wykonanych wokół planowanego otworu zatłaczającego – 2 strefy (łącznie 18 otworów)

- pobór próbek powietrza glebowego

- badania próbek powietrza glebowego w laboratorium – metodami chromatograficznymi oraz badania izotopowe węgla i tlenu w CO_2

- wykonanie piezometrów – 4 otwory do max 20 m – 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_2)

-znaczniki gazów zatłoczone razem z CO2 do otworu – mierzone w odwiercie obserwacyjnym

Faza zatłaczania

- Bieżące pomiary CO_2 w powietrzu glebowym wykonywane w trakcie pompowania CO_2 do otworu

Faza po zatłoczeniu – monitoring

- pomiary zawartości CO_2, radonu, helu, węglowodorów, O_2, $H_2 + N_2$ w powietrzu glebowym w siatce 10x10 m - 200 pkt. pomiarowych

- pomiary zawartości CO_2, radonu, helu w małośrednicowych otworach wykonanych wokół planowanego otworu – 2 strefy (łącznie 18 otworów)

- pobór i badania próbek powietrza glebowego w laboratorium – metodami chromatograficznymi oraz badania izotopowe węgla i tlenu w CO_2

- 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 węglowodorami, CO_2)

- Zakres szczegółowy zostanie przedstawiony w odrębnym projekcie technicznym po wykonaniu wiercenia.

Biomonitoring

Przewiduje się badania koncentracji CO_2 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

szczegółowy zakres prac zostanie podany w odrębnym projekcie technicznym. Prace zostaną wykonane w formie:

- monitoringu zerowego przed zatłaczaniem (tła)

- pomiarów po zakończeniu kolejnych etapów zatłaczania.

Podsumowanie

Model rozprzestrzeniania się CO2 wokół otworu iniekcyjnego Choszczno-CO2 wskazuje na nieznaczny zasięg rozprzestrzeniania się dwutlenku węgla.

Przedstawiony powyżej przegląd metod monitorujących pokazuje, że zatłaczanie CO_2 do złoża powoduje zmianę kilku parametrów ośrodka oraz powstanie w nim procesu odkształceń niesprężystych. Dzięki temu rozprzestrzenianie się frontu zatłaczanego gazu może być rejestrowane metodami geofizycznymi.

Wielkość tych zmian zależy od budowy geologicznej ośrodka, sposobu zatłaczania gazu a przede wszystkim jego ilości. Możliwość rejestracji geofizycznej zmian parametrów fizycznych wywołanych zatłaczaniem CO_2 prowadzonej na powierzchni ziemi zależy od głębokości na której prowadzi się zatłaczanie.

Przykładowy projekt wiercenia i wyposażenia otworów do testowego zatłaczania CO2 dla lokalizacji w rejonie Kłodawy (AGH & PIG-PIB)

(Stanisław Nagy)

(Adam Wójcicki)

W ramach tego punktu opracowano "Projekt prac geologicznych na wykonanie otworów wiertniczych Dziwie 1 i Dziwie 2i dla zbadania chłonności utworów jury w strukturze wodonośnej Budziszewice-Zaosie" (załączony na CD).

Była to inicjatywa Ministerstwa Środowiska mająca na celu stworzenie polskiego odpowiednika „laboratorium" polowego w Ketzin.

Cel i zakres prac

Cel

- otwór badawczy Dziwie 1 do monitorowania procesu zatłaczania w ramach pilotażowego projektu sekwestracji dwutlenku węgla.

  Lokalizacja wiercenia: X(N)= 495112; Y(E)= 494806 (Układ 1992).

  Projektowana głębokość – 1430 m ± 10% (50 m formacji gielniowskiej).

- otwór badawczy-iniekcyjny Dziwie 2i do zatłaczania CO2 w ramach pilotażowego projektu sekwestracji dwutlenku węgla.

  Lokalizacja wiercenia: X(N)= 495184; Y(E)= 494789 (Układ 1992).

  Projektowana głębokość - 1390m ± 10% (do nawiercenia 10 m formacji gielniowskiej – dolny pliensbach)

Zakres prac

- Określenie ciśnienia maksymalnego - na początku zatłaczania,
- Zatłoczenie markerów (np. gazowych, SF6),
- Testowanie metod geofizycznych: VSP, tomograficznych (cross well tomography) i innych - pokazujących zmiany nasycenia wokół odwiertu zatłaczania oraz zasięg zatłaczanego CO_2: tomografia otworowa, X-well tomography), sejsmika pasywna, VSPa,
- Przygotowania do technologii monitoringu wgłębnego,

- Określenie na podstawie danych z wiercenia własności przepuszczalności pionowych, poziomych (absolutnych) oraz fazowych (w laboratorium). Określenie ciśnienia progowego ("treshold pressure") - na podstawie rdzeni z nadkładu,
- Określenie ciśnienia "treshold pressure" w trakcie testu in situ,
- Określenie indeksu chłonności określenie przewodności (kh),
- Potwierdzenie szczelności poprzez test pulsacyjno-interferencyjny w badanym otworze,
- Sprawdzenie szczelności płaszcza cementowego otworów badawczych,
- Określenie wstępne ściśliwości ośrodka (c x phi x h),
- Wykonanie kompletu badan geochemicznych,
- Przygotowanie i wdrożenie pierwszego systemu monitoringu geofizycznego,
- Przygotowanie i sprawdzenie innych procedur związanych z bezpieczeństwem składowania CO_2,
- Przygotowanie odpowiedniego raportu badawczego dla Ministerstwa Środowiska i Wyższego Urzędu Górniczego,
- Przygotowanie innych publikacji dot. pilotowego zatłaczania.

Określenie ilości CO2 do zatłoczenia w ramach projektu

Faza I – faza wstępna po zakończeniu wiercenia

a. zatłaczanie po 72 ton CO2 dziennie - razem 1008ton CO2 (ok. 14 dni)

b. zatłaczanie po 36-72 ton CO2 dziennie - razem ok. 2240 ton CO2, 36 ton CO2/d przez 30 dni =1080 t, 48 ton CO2/d przez 15 dni =720 ton, 72 ton CO2/d przez 7 dni - ok. 500 ton)

Razem zatłaczanie w I fazie powinno objąć ok. 3300 ton CO2. Zatłaczanie poniżej 500 tys. ton jest traktowane jako mały projekt.

Faza II – ciągłe zatłaczanie do 10-12 tys. ton CO2 w ciągu roku – opcjonalnie np. 36 ton CO2/d x 330 dni = 11 880 ton. Etap konieczny przed uruchomieniem pełnego zatłaczania z instalacji demonstracyjnych (pilotowych) CCS -może być odłożony w czasie.

Faza III – ciągłe zatłaczanie w ilości ok. 10-12 tys. ton CO2 – jak w fazie II. Faza III – nastawiona na pełne wdrożenie monitoringu CO2 powinna być realizowana po zakończeniu fazy II, po przeanalizowaniu wykonanych badań.

Monitoring procesu zatłaczania

Wprowadzenie

Miejsce do składowania CO_2 musi się cechować odpowiednio dobrymi parametrami zbiornikowymi oraz posiadać wystarczającą izolację hydrauliczną skał stropowych i spągowych oraz posiadać wystarczającą izolację skał w strefach brzeżnych przyszłego zbiornika, celem uniemożliwienia ucieczki CO_2. Szczelność zależy od struktury geologicznej zbiornika jego własności petrofizycznych oraz od rodzaju płynu zatłaczanego (czy CO_2 jest w postaci gazowej czy w postaci krytycznej) oraz rozkładu ciśnienia w trakcie zatłaczania. Ryzyko utraty szczelności jest trudne do oceny ze względu na złożoną strukturę ośrodka geologicznego niemożliwą do pełnego rozpoznania, skomplikowane procesy fizyczne zachodzące w zbiorniku, nieliniowe zmiany w górotworze. Dlatego do badania szczelności zbiornika CO_2 najlepiej używać metod pozwalających kontrolować rozprzestrzenianie się gazu w strukturze geologicznej. Do osiągnięcia tego celu bardzo pomocnymi mogą być 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 prędkości fal sejsmicznych i ich tłumienie, gęstość ośrodka i jego własności elektryczne.

Monitoring sejsmiczny

Zmiany własności sprężystych wywołane zatłoczeniem dwutlenku węgla dają wyraźny efekt sejsmiczny. Doświadczenie uzyskane dotychczas na złożu norweskim Sleipner oraz badania modelowe wykazały że najlepszymi metodami wykorzystania pomiarów sejsmicznych jest badanie zmienności amplitudy (AVO) z odległością 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. Nasycenie warstwy dwutlenkiem węgla powoduje, że czas przejścia przez tą warstwę wzrasta a więc obserwujemy opóźnienie refleksów sejsmicznych pochodzących z poziomów niższych niż nasycona warstwa w porównaniu z czasami zarejestrowanymi w ośrodku nienasyconym CO_2.

Z uwagi na projektowane ilości zatłaczanego CO_2 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 zatłaczaniem może być bliski błędowi pomiaru, zwłaszcza w pierwszym etapie testowego zatłaczania. Jeżeli jednak możemy go pomierzyć, to ten sposób detekcji CO_2 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 zatłaczaniem (tła)

- 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 naprężeń w ośrodku, o złożonym rozkładzie. Dotyczy to zarówno lokalnych rozkładów naprężeń wokół por, jakie powstają w rejonach dużego gradientu ciśnień jak również regionalnych rozkładów w nadkładzie gdzie powstają naprężenia wynikające przesuwającego się frontu zatłaczania. Jeżeli 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:

- można badać intensywność procesów zachodzących w ośrodku badając aktywność (ilość zdarzeń w jednostce czasu) sejsmoakustyczną.
- lokalizacja hipocentrum możliwa, gdy prowadzimy rejestracją przy pomocy sieci czujników pozwala wyznaczyć rejony w których naprężenia są szczególnie intensywne.
- jeżeli rejestracja dotyczy fal poprzecznych to można określić kierunki spękań wykorzystując fakt, że ten rodzaj fali ulega rozszczepieniu i dzięki temu zjawisku istnieje możliwość takiej interpretacji zarejestrowanych fal sejsmicznych aby można było wyznaczyć kierunki spękań.

Wykorzystanie sejsmiki pasywnej (czyli inaczej mikrosejsmologii) jest przewidywane w trakcie procesu zatłaczania i monitorowania.

Szczegółowy zakres przedsięwzięć związanych z umiejscowieniem sond (nadajników/anten) , częstotliwość pomiarów, położenie poziome i pionowe - będzie przedmiotem odrębnego projektu technicznego.

Monitoring elektromagnetyczny i VSP 3C

Przewiduje się wykorzystanie międzyotworowego monitoringu elektromagnetycznego i VSP 3C z wykorzystaniem sond geofizycznych.

Szczegółowy zakres przedsięwzięć związanych z umiejscowieniem sond (nadajników/anten) w otworach, częstotliwość pomiarów, położenie pionowe - będzie przedmiotem odrębnego projektu technicznego.

Monitoring geochemiczny gruntu i wód gruntowych wokół otworu zatłaczającego

Faza przed zatłaczaniem - określenie tła.

Obszar badań około 5000 m^2 , tzn. W promieniu około 40 metrów wokół otworu:

- pomiary zawartości CO_2, radonu, helu, węglowodorów, O_2, $H_2 + N_2$ w powietrzu glebowym w siatce 10x10 m - 200 pkt. pomiarowych
- wykonanie 18 otworów małośrednicowych wokół planowanego otworu zatłaczającego
- pomiary zawartości CO_2, radonu, helu w małośrednicowych otworach wykonanych wokół planowanego otworu zatłaczającego - 2 strefy (łącznie 18 otworów)
- pobór próbek powietrza glebowego
- badania próbek powietrza glebowego w laboratorium - metodami chromatograficznymi oraz badania izotopowe węgla i tlenu w CO_2
- wykonanie piezometrów - 4 otwory do max 20 m - 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_2)
- znaczniki gazów zatłoczone razem z CO_2 do otworu - mierzone w odwiercie obserwacyjnym

Faza zatłaczania

Bieżące pomiary CO_2 w powietrzu glebowym wykonywane w trakcie pompowania CO_2 do otworu

Faza po zatłoczeniu - monitoring

- pomiary zawartości CO_2, radonu, helu, węglowodorów, O_2, $H_2 + N_2$ w powietrzu glebowym w siatce 10x10 m - 200 pkt. pomiarowych
- pomiary zawartości CO_2, radonu, helu w mało średnicowych otworach wykonanych wokół planowanego otworu - 2 strefy (łącznie 18 otworów)
- pobór i badania próbek powietrza glebowego w laboratorium - metodami chromatograficznymi oraz badania izotopowe węgla i tlenu w CO_2
- pobór próbek wód podziemnych w określonych okolicznych stu-dniach, w wykonanych piezometrach
- badania wód podziemnych (określenie zawartości jonów głównych, pH, alkaliczności, izotopy stałe, gazy łącznie z węglowodorami, CO_2).

Biomonitoring

Przewiduje się badania koncentracji CO_2 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 szczegółowy zakres prac zostanie podany w odrębnym projekcie technicznym. Prace zostaną wykonane w formie:

- monitoringu zerowego przed zatłaczaniem (tła)
- pomiarów po zakończeniu kolejnych etapów zatłaczania.

Prace geodezyjne

Dokładna lokalizacja płytkich otworów małośrednicowych i piezometrów oraz punktów poboru próbek gleby/gruntu zostanie określona za pomocą GPS. Współrzędne punktów grawimetrycznych zostaną określone za pomocą GPS i niwelacji klasycznej.

Monitoring sejsmologiczny i metodą tomografii pasywnej dla obiektu Choszczno-Suliszewo (GIG)

(Grzegorz Mutke, Jarosław Chećko, Przemysław Bukowski, Iwona Augustyniak)

Na I półrocze 2011 roku w zadaniu **1.1.18**, dla GIG przewidziano wykonanie programu monitoringu wtłaczania CO_2 w poziomy solankowe Choszczno-Suliszewo.

Rejon ten został wybrany po analizie danych geologicznych, jako potencjalne miejsce składowania CO_2 w północnej części kraju. Główny Instytut Górnictwa miał skoncentrować się w tym zadaniu na opisie ogólnych założeń i celów monitorowania w czasie eksploatacji zbiornika i po jego zamknięciu, podstaw fizycznych monitorowania geofizycznego płynów złożowych, ogólnym opisie metod monitorowania oraz szczegółowym projekcie monitorowania płynów złożowych z wykorzystaniem metody sejsmologicznej na przykładzie kolektora Choszczno-Suliszewo.

Charakterystyka wybranego zbiornika składowania CO_2 w poziomach solankowych Choszczno-Suliszewo

W północno zachodniej części kraju wybrano jako najlepszy zbiornik Choszczno-Suliszewo w niecce szczecińskiej.

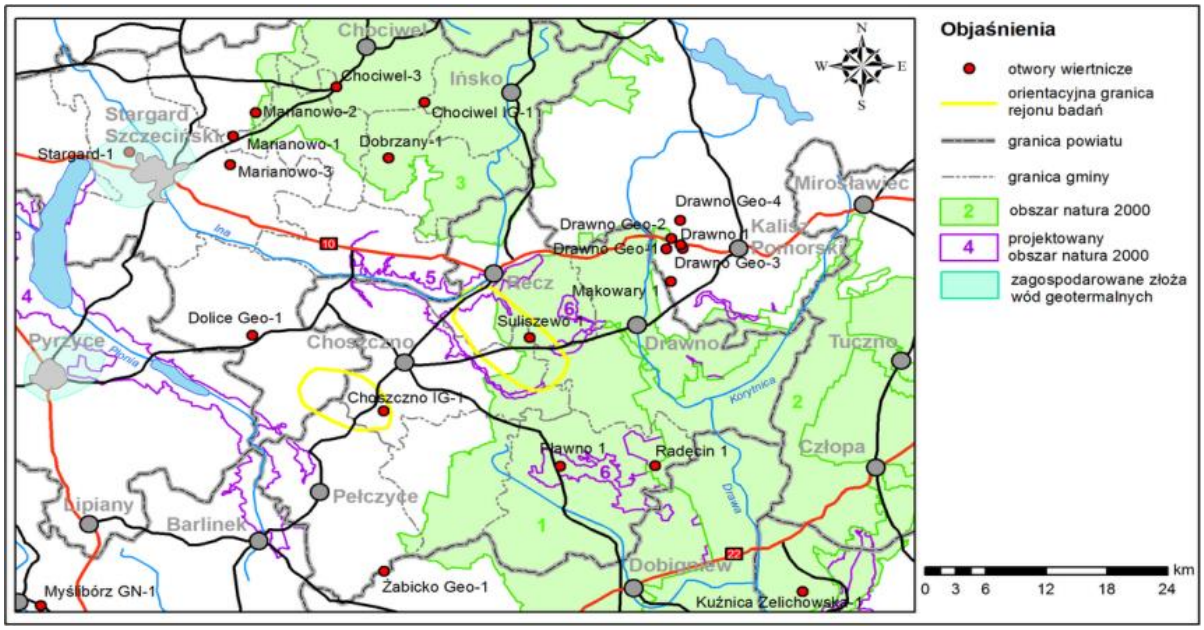


Fig. 1.1.18_53 Lokalizacja wybranych obszarów sekwestracji w niecce szczecińskiej

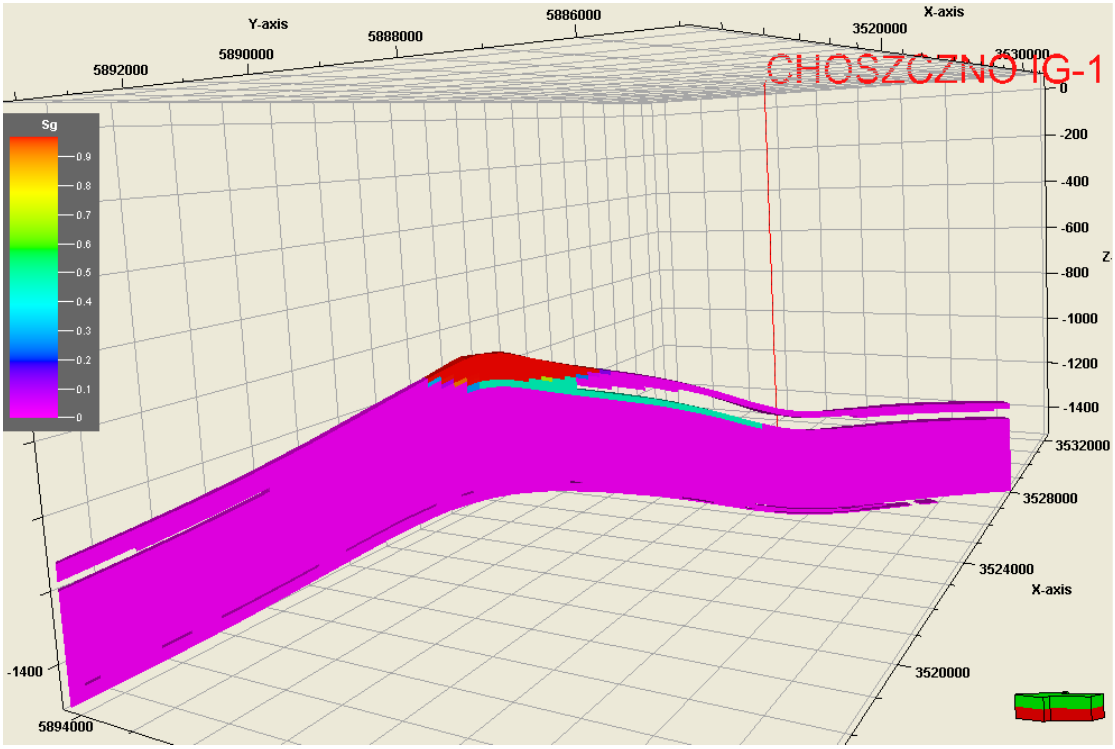


Fig. 1.1.18_54 Model Choszczno

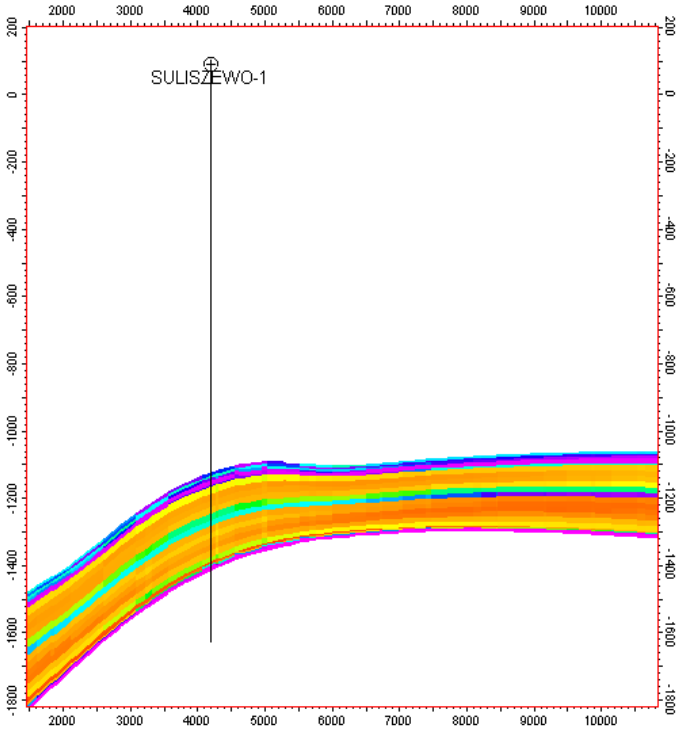


Fig. 1.1.18_55 Model Suliszewo

Podstawowe geofizyczne metody monitorowania

Dla opisanych lokalizacji zatłaczania CO_2 w poziomy solankowe w niecce szczecińskiej opracowano program monitorowania geofizycznego.

Podstawowe techniki monitorowania płytkich i głębokich struktur opierają się na wykorzystaniu:

- Metody sejsmicznej;
- Metody grawimetrycznej;
- Metody elektrycznej i elektromagnetycznej;
- Metody sejsmologicznej;
- Pomiarach geochemicznych;
- Pomiarach satelitarnych i z samolotu;
- Badaniach geofizycznych w otworach.

W tej dokumentacji przedstawiamy możliwości i zalety metody sejsmologicznej do badań w strukturach głębokich oraz metody sejsmometrycznej do badania wpływu potencjalnych wstrząsów na środowisko powierzchniowe. Główne cele tych badań to: rozpoznanie kształtu i migracji chmury zatłoczonego CO_2, dróg migracji przecieków w kierunku powierzchni oraz badanie sejsmiczności indukowanej zatłaczaniem CO_2 jak również kontrola sejsmiczności naturalnej i indukowanej na środowisko.

Wymienione cele monitorowania mogą być realizowane przy pomocy większości ww. metod. Różnica polega na dokładności i możliwościach poszczególnych metod z jednej strony oraz na kosztach ich wdrożenia z drugiej strony. Pokrótce omówione zostaną ważniejsze metody.

Metoda sejsmiczna

Metoda sejsmiczna jest aktualnie najszerzej stosowaną metodą do badania kształtu i przemieszczania chmury CO_2 oraz wykrywania dróg przecieku w kierunku powierzchni. Nie nadaje się do monitorowania sejsmiczności indukowanej zatłaczaniem. Stosowana jest najczęściej w wariancie 2D, 3D oraz 4D oraz sejsmiki międzyotworowej. Dobre wyniki jej stosowania uzyskano na zbiorniku Sleipner i Weyburn. Badania wskazują jednak generalnie ze wzrostem głębokości znacznie słabnie wiarygodność wyników. Metoda sejsmiczna jest metodą bardzo pracochłonną i drogą. Wymaga stosowania ciężkiego sprzętu pomiarowego i zaangażowania dużego zespołu do pracochłonnych prac pomiarowych w terenie. Jest to jednak najczęściej obecnie stosowana metoda do badań głębokich.

Metoda grawimetryczna

Metodą grawimetryczną można badać zmiany w głębokich i płytkich strukturach skalnych jak i gęstość płynów. Metoda charakteryzuje się znacznie niższą rozdzielczością przestrzenną niż metody sejsmiczne, ale oferuje kilka wartościowych oznaczeń w stosunku do sejsmiki. Stosowana okresowo może być wykorzystana do wykrywania akumulacji CO_2 w nadkładzie, stanowiąc system wczesnego ostrzegania przed zagrożeniem. Rozpuszczony CO_2 jest niewidoczny w obrazie fal sejsmicznych. Metoda dobrze rozpoznaje grubą chmurę CO_2. Metoda grawimetryczne jest dużo tańsza od metody sejsmicznej a zarazem stanowi jej dobre uzupełnienie jak i weryfikację wyników. Zalecana jest do stosowania w okresach między drogimi pomiarami sejsmicznymi.

Badania geofizyczne w otworach

Badania geofizyki otworowej ograniczają się do badań w profilu otaczającym odwiert. Ich zaletą jest wykonywanie badań zarówno w nadkładzie jak i w zbiorniku. Dobrze nadają się do oceny CO_2 w zbiorniku w aspekcie nasycenia i ciśnienia oraz chemizmu płynów. Monitoring otworowy należy stosować, ponieważ wykorzystuje się do lokalizacji czujników istniejące otwory.

Metody elektryczne i elektromagnetyczne

Metoda elektryczna i głęboka elektromagnetyczna mogą dać dobrą informację o potencjalnych drogach ucieczki CO_2 w nadkładzie. Metody te są stosunkowo tanie. Ich ograniczeniem w stosowaniu może być teren, w którym przebiegają przesyłowe linie energetyczne, wywołujące zakłócenia. Metody te ze względu na niskie koszty można stosować okresowo, jako uzupełnienie pomiarów sejsmicznych.

Metoda sejsmologiczna

Metoda sejsmologiczna służy przede wszystkim do badania zjawisk mikrosejsmicznych wywoływanych pękaniem skał na skutek wtłaczania CO_2. 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 stałe sieć sejsmologiczną mogą być interpretowane w celu śledzenia rozprzestrzeniania się plamy CO_2 oraz potencjalnych dróg migracji w nadkładzie stanowiącym izolację. Niezależnie od zjawisk parasejsmicznych sieć sejsmologiczna służy do monitorowania sejsmiczności naturalnej lub wstrząsów górniczych w przypadku składowania na terenach przyległych do obszarów górniczych.

Metoda sejsmometryczna

Aparatura do pomiarów sejsmometrycznych ma za zadanie monitorowanie drgań parasejsmicznych (np. przemysłowych) oraz ewentualnych silnych wstrząsów indukowanych wtłaczaniem CO2 do kolektora.

Pomiary monitoringowe sejsmometryczne są niezbędne do oceny wpływu potencjalnych drgań i wstrząsów na środowisko powierzchniowe.

Założenia metodyczne monitorowania metoda sejsmologiczną

Zainstalowanie stałej sieci sejsmologicznej w obszarze składowania CO_2 może dać bardzo duże korzyści monitorowania tego procesu. Można założyć dwa scenariusze podczas zatłaczania CO_2. Pierwszy odnosi się do przypadku, gdy będzie występowała aktywność sejsmiczna (głównie zbiorniki o małej przepuszczalności i wtłaczaniu CO_2 pod dużym ciśnieniem) i drugi przypadek gdy aktywność sejsmiczna będzie bardzo niska słaba, trudna do zarejestrowania (jak przykładowo na złożu Sleipner gdzie mamy do czynienia z dużą porowatością i stosunkowo małymi ciśnieniami).

Przypadek I – występuje aktywność sejsmiczna

W pierwszym przypadku monitorowanie przy pomocy stałej sieci sejsmologicznej może być niezmiernie korzystne. Odpowiednio rozmieszczona sieć sejsmologiczna pozwoli na lokalizację zjawisk mikrosejsmicznych związanych z tworzeniem się spękań. Oznacza to możliwość śledzenia rozprzestrzeniania się chmury CO_2 oraz monitorowania wycieków w obszarze warstwy izolacyjnej. Zastosowanie analizy parametrów ognisk spękań, takich jak spadek naprężeń w źródle, pozwoliłoby na ocenę jakości procesu zatłaczania (wzrost spadków naprężeń informowałby o trudniejszej fazie zatłaczania medium do zbiornika). Drugą bardzo istotną korzyścią monitoringu sejsmologicznego byłaby możliwość zastosowania krzywoliniowej tomografii pasywnej (tomografia oparta na naturalnych źródłach emisji fal sejsmicznych) do badania pola prędkości. Warunkiem przestrzennej interpretacji pola prędkości jest dysponowanie przestrzennym rozmieszczeniem czujników drgań. Obliczenia takie można wykonywać z dużą częstotliwością w oparciu o bazę wstrząsów zarejestrowaną automatycznie przez stacjonarny rejestrator drgań. Wydaje się, że ze względu na uwarunkowania geologiczne w naszym kraju, można oczekiwać aktywności sejsmicznej w potencjalnych miejscach składowania. Tomografia pasywna pozwoliłaby na bardzo znaczne ograniczenie ilości wykonywania drogich pomiarów sejsmicznych. Ponadto gdy zbiornik zlokalizowany jest w pobliżu zagłębi górniczych w których występują wstrząsy, sieć sejsmologiczna jako jedyna metoda pozwala na ich monitorowanie i ocenę ewentualnego zagrożenia. Sytuacja taka może mieć miejsce w potencjalnych miejscach wyznaczonych w obszarze Górnośląskiego Zagłębia Górniczego, LGOM oraz kopalni Bełchatów.

Przypadek II – brak aktywności sejsmicznej

W przypadku niskiej aktywności sejsmicznej podczas zatłaczania lub jej braku przydatność metody sejsmologicznej będzie znacznie mniejsza. Sieć sejsmologiczna może być jednak wykorzystana i w tym przypadku do badania pola prędkości fal metodą tomografii. Warunkiem będzie jednak sztuczne wzbudzanie fal sejsmicznych przy pomocy ładunków MW lub dużym wibratorem, podobnie jak się to robi przy pomiarach sejsmicznych. Korzyścią jest tutaj nie angażowanie tak często grupy pomiarowej, przez co można obniżyć koszty. Zaletą proponowanego rozwiązania jest obliczanie pola prędkości metodą tomografii

między czujnikami w otworach i na powierzchni, co nie jest możliwe przy zastosowaniu powierzchniowych pomiarów sejsmicznych. W efekcie można w ten sposób prowadzić monitoring warstw nadkładu.

Sieć sejsmologiczna

Budowa sieci sejsmologicznej jest jednorazowym wydatkiem na cały czas trwania procesu zatłaczania oraz na monitoring w czasie po likwidacji zbiornika. Sieć sejsmologiczna składa się z czujników drgań, transmisji danych i rejestratora wstrząsów (**Fig. 1.1.18_56**). Drgania sejsmiczne zarejestrowane po wystąpieniu wstrząsu są automatycznie wyzwalane i rejestrowane w pamięci rejestratora. Następnie poprzez transmisję (np. łączność komórkową) są automatycznie przesyłane do stacji bazowej, gdzie są gromadzone w formie plików cyfrowych. Zastosowanie odbiorników GPS na każdym stanowisku pomiarowym umożliwia czasowanie odebranych sygnałów przy wspólnej podstawie czasu, co pozwala w dalszej kolejności na interpretację zjawisk sejsmicznych (lokalizacja, magnituda, spadek naprężeń, tomografia). Aparatura tego typu jest produkowana przez wiele specjalistycznych firm, w tym 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 prostoliniowym z wykorzystaniem algorytmów ewolucyjnych.

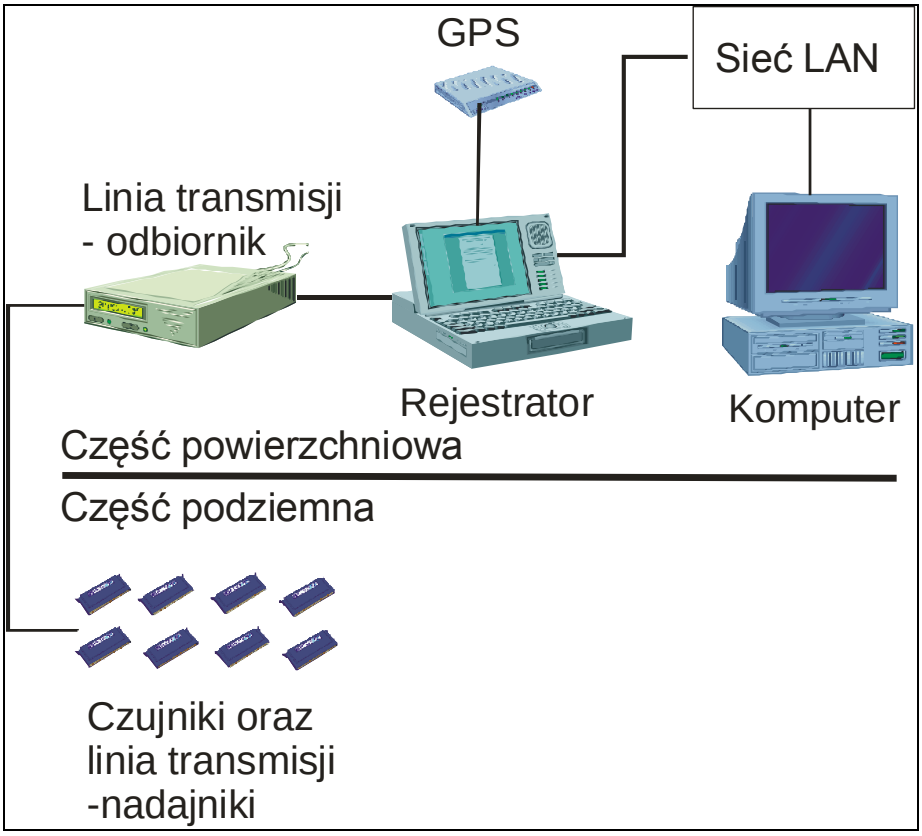


Fig. 1.1.18_56 Schemat aparatury sejsmologicznej SOS

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 powinny być na stałe umieszczone pod powierzchnią (sondy pomiarowe w płytkich otworach 20-30m, co zmniejszy szumy w porównaniu do lokalizacji czujników na powierzchni) oraz w otworach głębokich, najlepiej na głębokości zbliżonej do poziomu zatłaczania oraz na głębokościach pośrednich między powierzchnią i poziomem zatłaczania. Do tego celu można wykorzystać otwory kontrolne dla procesu zatłaczania. Warunkiem takiego rozwiązania jest jednak podjęcie decyzji o budowie przestrzennej sieci sejsmologicznej na etapie wiercenia otworów, gdyż jest to odpowiedni moment na ich zamontowanie.

Ryzyko sejsmiczne od naturalnych trzęsień ziemi i zjawisk parasejsmicznych

Sieć sejsmologiczna może być również wykorzystana do monitorowania sejsmiczności nie związanej z procesem zatłaczania CO_2. W strefach naturalnej aktywności sejsmicznej są to trzęsienia 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, **Fig. 1.1.18_57** (Intensywność drgań w skali EMS do 7).

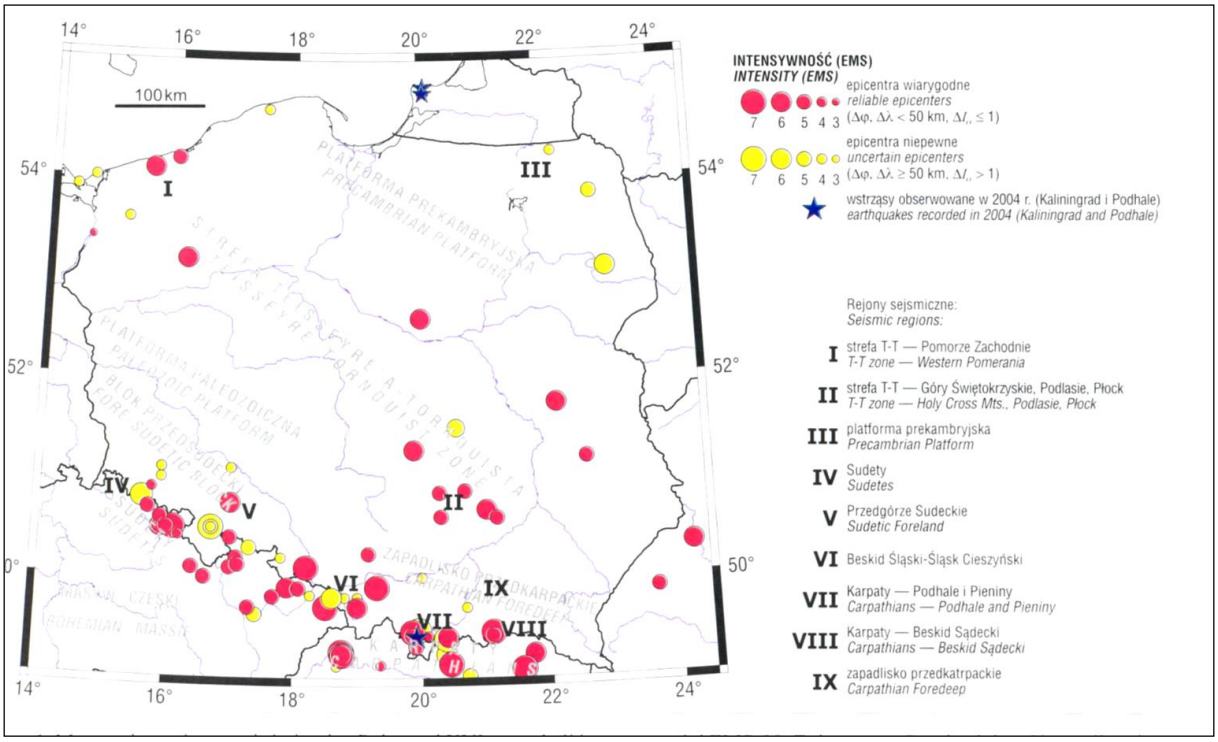


Fig. 1.1.18_57 Mapa epicentrów trzęsień ziemi w Polsce od XVI wieku , w skali intensywności EMS-98 (z artykułu Guterch 2009)

Monitorowanie aktywności sejsmicznej w trakcie procesu składowania CO_2

W zbiornikach CO_2 o niskiej porowatości oraz przy dużych ciśnieniach wtłaczania, można oczekiwać występowania aktywności sejsmicznej. W takiej sytuacji prowadzenie stałego monitoringu sejsmologicznego może dać bardzo duże korzyści. Zarejestrowane zjawiska sejsmiczne są niecenionym i praktycznie darmowym źródłem fal sejsmicznych. Sejsmika prospekcyjna wymaga wykonania drogich strzelań i pomiarów 'in situ', aby uzyskać dane do interpretacji. Tutaj wstrząsy indukują się przy okazji samego procesu składowania CO_2. Zastosowanie algorytmów do przestrzennej lokalizacji ognisk wstrząsów pozwala na śledzenie rozprzestrzeniania się i dróg migracji CO_2. Zarejestrowane procesy pękania skały na skutek wtłaczania CO_2 pod dużym ciśnieniem, pozwalają również na oszacowanie jakości skał zbiornikowych. W tym celu można wykorzystać analizy parametrów źródła drgań, takie jak spadek naprężeń, naprężenia pozorne, aktywność sejsmiczna, moment sejsmiczny, przemieszczenie w ognisku, promień ogniska. Przykładowo duże spadki naprężeń będą świadczyły, że aktualnie wtłaczamy w gorszym fragmencie zbiornika. W połączeniu z tomografią pasywną również wykorzystującą do obliczeń naturalne „darmowe" zjawiska sejsmiczne, metoda sejsmologiczna daje dużo szersze i bardziej wiarygodne badania masywu skalnego i samego procesu zatłaczania do niego CO_2.

Możliwości zastosowania tomografii pasywnej do diagnostyki zmian w strukturach geologicznych w czasie procesu składowania CO_2

Wykorzystując naturalne zjawiska dynamiczne wywoływane tworzeniem się nowych szczelin podczas procesu zatłaczania CO_2 zarejestrowane przez przestrzenną sieć sejsmologiczną, można wykonywać obliczenia pola prędkości fal sejsmicznych metodą tzw. tomografii pasywnej. Metoda ta polega na ocenie i analizie pola prędkości fali podłużnej w przesuwającym się oknie czasowym. Technika taka pozwala na śledzenie zmian pola prędkości i korelowanie ich ze zmianami zachodzącymi w rejonie zatłaczania CO2 oraz w nadkładzie.

Dla celów projektu, opracowano w GIG założenia metody sejsmologii pasywnej z krzywoliniowym promieniem sejsmicznym. Tomografia z promieniem krzywoliniowym znacznie poprawi dokładność lokalizacji stref epicentrów wstrząsów oraz rozkładu prędkości propagacji fal w przestrzeni.

W ramach realizacji zadania opracowano oprogramowanie komputerowe do algorytmu obliczeniowego rozwiązania tomografii pasywnej z krzywoliniowym śledzeniem promieni sejsmicznych i regularyzacją z uwzględnieniem minimalizacji funkcjonału według algorytmu optymalizacji nieliniowej (Levenberga-Marquardta) oraz śledzenie promieni sejsmicznych (reytracing) według metody Mosera, Noleta i Sniedera.

Przykład modelowania trajektorii promieni sejsmicznych

Model prędkości o stałym gradiencie

Model o stałym gradiencie prędkości opisuje następująca formuła

$$V(x,y) = 3000 + 0,3 \cdot (y + 2200) \text{ dla } y \geq 2200 \qquad (1)$$

Model ten, przedstawiony w postaci graficznej na figurach **1.1.18_58** i **1.1.18_59**.Krzywizna uzyskiwanych promieni jest mała, a sam ośrodek dobrze odpowiada prędkościom obserwowanym w podziemnych kopalniach węgla w Polsce. Na **Fig. 1.1.18_60**przedstawiono wyznaczone numerycznie trajektorie dla źródła znajdującego się w punkcie [–2000; 0], skierowane do wszystkich analizowanych odbiorników drgań. Liniami białymi oznaczono trajektorie promieni sejsmicznych wyznaczone dla siatki rzadkiej (12 × 12), natomiast linie czerwone pokazują promienie sejsmiczne obliczone dla siatki gęstej (700 × 700). Na **Fig. 1.1.18_61**wyraźnie widać, że zagęszczenie siatki prędkości nie wpłynęło w istotny sposób na przebieg promieni sejsmicznych, co jest spowodowane głównie tym, że badany model ośrodka nie zawiera gwałtownych zmian pola prędkości. Na figurach **1.1.18_60** i **1.1.18_61** pokazano obliczony numerycznie przebieg wszystkich krzywoliniowych promieni sejsmicznych, a więc łączących wszystkie źródła drgań z wszystkimi odbiornikami, odpowiednio dla siatki rzadkiej (12 × 12) i gęstej (700 × 700) modelu prędkości. Porównując przebieg tych promieni widać, że różnice są niewielkie, co oznacza, że wpływ parametryzacji modelu prędkości na inwersję tomograficzną nie będzie zbyt istotny.

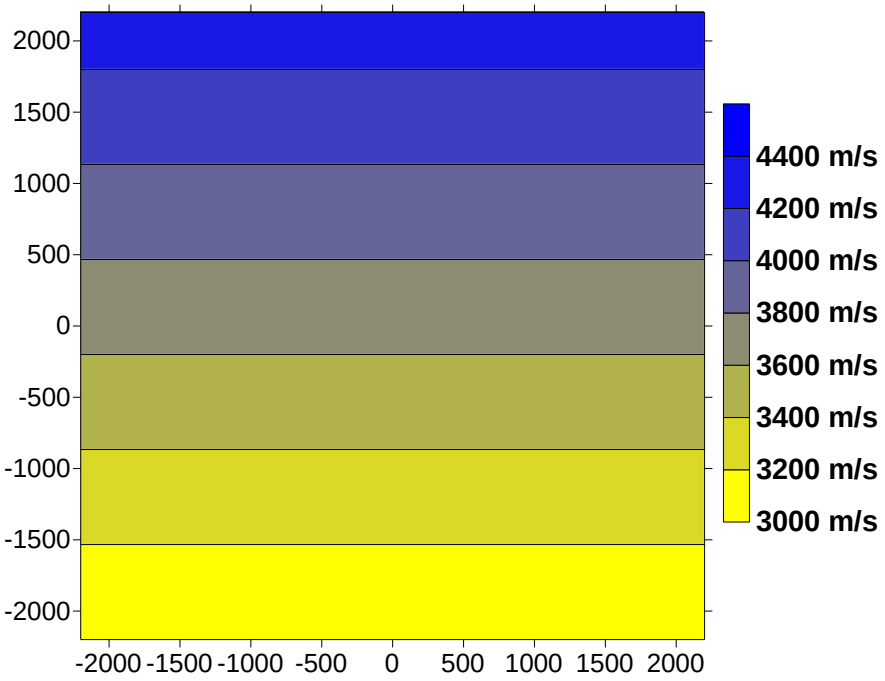


Fig. 1.1.18_58 Konturowa mapa modelu gradientowego ośrodka prędkości

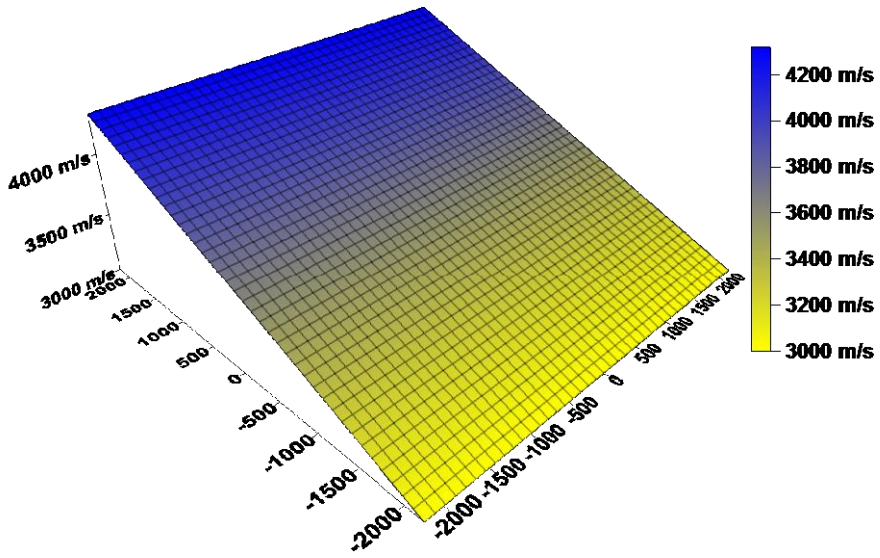


Fig. 1.1.18_59 Trójwymiarowa mapa modelu gradientowego ośrodka prędkości

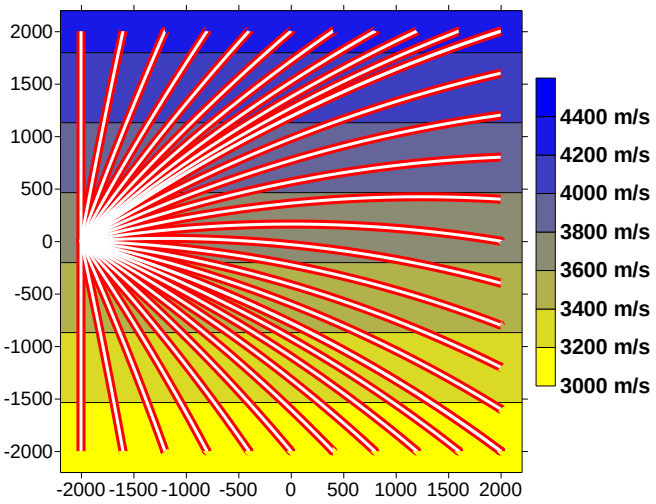


Fig. 1.1.18_60 Modelowanie numeryczne promieni sejsmicznych w ośrodku z **Fig. 1.1.18_58** dla gęstej (700 × 700) i rzadkiej (12 × 12) siatki modelu prędkości; czerwone linie – promienie dla siatki gęstej, białe linie – promienie dla siatki rzadkiej

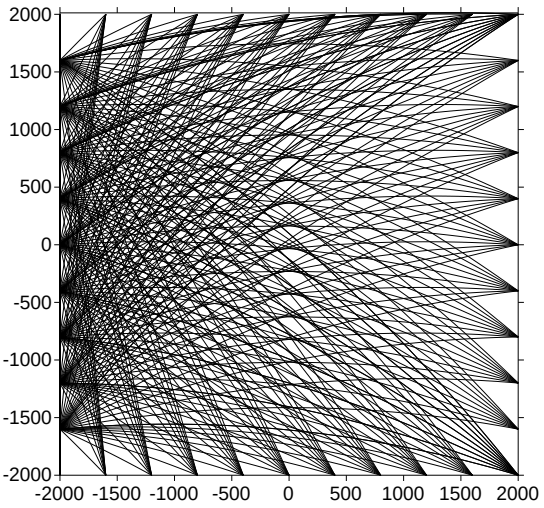


Fig. 1.1.18_61 Modelowanie numeryczne pełnego pokrycia promieniami sejsmicznymi w ośrodku z **Fig. 1.1.18_58** dla rzadkiej (12 × 12) siatki modelu prędkości

Przykład modelowania inwersji tomograficznego pola prędkości

W niniejszym rozdziale przedstawiono przykładowe wyniki uzyskane z zastosowaniem tomograficznej inwersji krzywoliniowej i regularyzacji, odniesione do różnych modeli prędkościowych ośrodka. Jako dane wejściowe do algorytmu inwersji wykorzystano teoretyczne czasy przejścia fali sejsmicznej wyznaczone na siatce o rozmiarze 700 × 700 zarówno w kierunku poziomym, jak i pionowym, z zastosowaniem interpolacji liniowej. Czasy te zostały obliczone na podstawie algorytmu krzywoliniowego śledzenia promieni sejsmicznych, który daje wynik w postaci trajektorii krzywoliniowych promieni sejsmicznych.

Inwersja modelu prędkości o stałym gradiencie

Inwersję tomograficzną wykonano dla modelu prędkości przedstawionego na **Fig. 1.1.18_58**. Wyniki inwersji tomograficznej dla funkcjonału z nowo wprowadzoną regularyzacją przedstawiają **Fig. 1.1.18_62 do Fig. 1.1.18_64**. Wartości startowe prędkości w algorytmie tomograficznym były stałe i wynosiły odpowiednio 2000, 3500 i 5000 m/s. Z porównania **Fig. 1.1.18_62 do Fig. 1.1.18_64**wynika, że rezultaty inwersji są bardzo podobne, co świadczy, że nowa regularyzacja pozwoliła uniezależnić się w dużym przedziale zmienności od wartości startowych prędkości. Ponadto widoczne jest, że inwersja w nowym wariancie regularyzacji pozwala wyznaczyć charakter zmienności pola prędkości w badanym modelu oraz dobrze odwzorowuje same wartości pola prędkości.

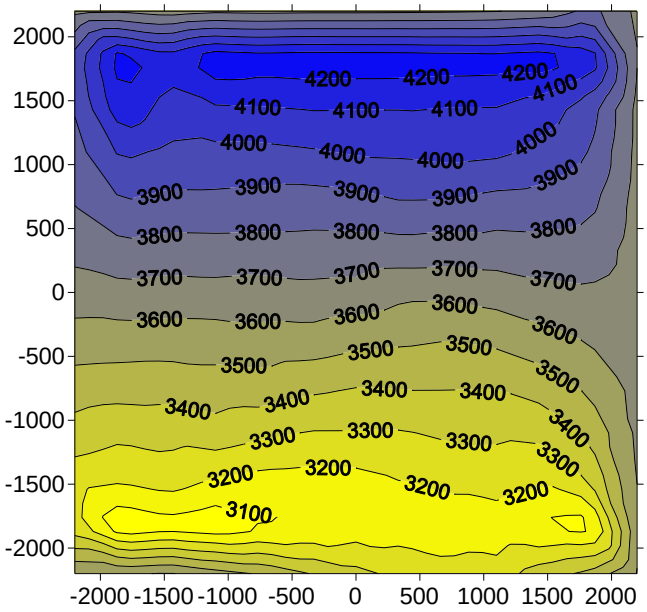


Fig. 1.1.18_62 Wyniki krzywoliniowej inwersji tomograficznej modelu prędkości z **Fig. 1.1.18_58**z wykorzystaniem funkcjonału z regularyzacją bez zaburzeń współrzędnych źródeł sejsmicznych i startową prędkością 2000 m/s

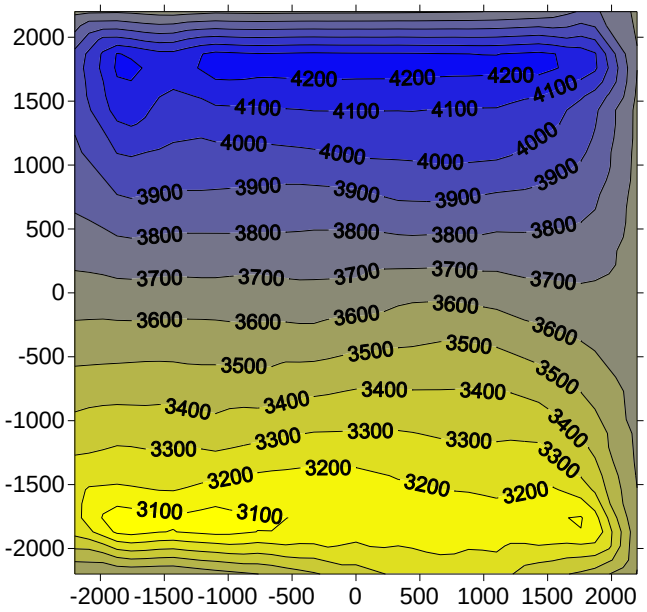


Fig. 1.1.18_63 Wyniki krzywoliniowej inwersji tomograficznej modelu prędkości z **Fig. 1.1.18_58**z wykorzystaniem funkcjonału z regularyzacją bez zaburzeń współrzędnych źródeł sejsmicznych i startową prędkością 3500 m/s

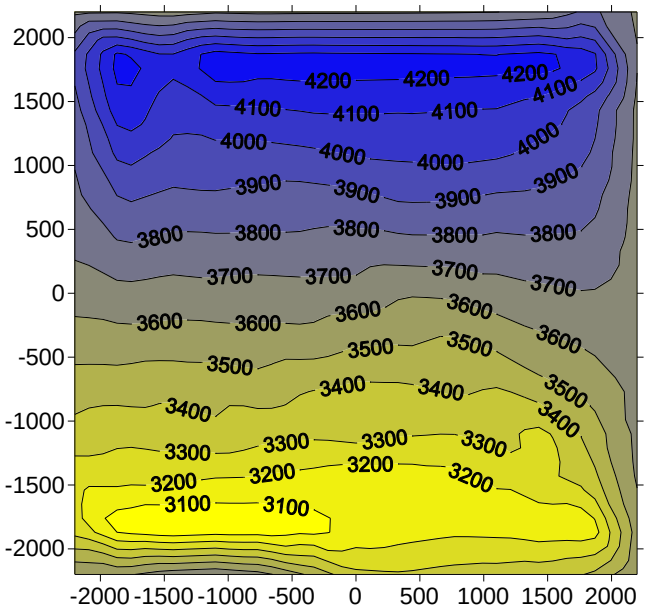


Fig. 1.1.18_64 Wyniki krzywoliniowej inwersji tomograficznej modelu prędkości z **Fig. 1.1.18_58** z wykorzystaniem funkcjonału z regularyzacją bez zaburzeń współrzędnych źródeł sejsmicznych i startową prędkością 5000 m/s

Program do obliczania pola prędkości metodą tomografii pasywnej z krzywoliniowym śledzeniem promieni sejsmicznych może wykorzystywać jako parametry wejściowe zbiór cyfrowo zarejestrowanych wstrząsów górniczych przy użyciu aparatury SOS zaprojektowanej w GIG.

Niezależnie od naturalnych zjawisk dynamicznych stanowiących źródła fal sejsmicznych do tomografii pasywnej, można wspomóc się wytwarzaniem jej przy pomocy źródeł sztucznych (wibratory lub strzelania MW – podobnie jak to się robi w sejsmice prospekcyjnej). Przewagą systemu sejsmologicznego zamontowanego na stałe jest w takim przypadku przestrzenne rozmieszczenie czujników drgań (lepsza dokładność i wiarygodność odwzorowania pola prędkości) oraz niższe koszty (w sejsmice każde obliczenia nowych obrazów pola prędkości wymagają przyjazdu ekipy pomiarowej z ciężkim sprzętem). Tomografia pasywna wydaje się w tej chwili jedną z najbardziej obiecujących metod śledzenia spękań w masywie skalnym oraz śledzenia rozwoju chmury zatłaczanego CO_2 oraz wykrywania dróg migracji CO_2.

Opis sieci sejsmologicznej dla struktury Choszczno-Suliszewo

Proponuje się zainstalowanie 12 trójskładowych czujników drgań w dwóch otworach monitorujących. Trzy czujniki należałoby zainstalować co 10-15m w ostatnich 40 m otworu (kolektor), a kolejne 6 czujników w odstępach 50m. Sygnały z czujników (zjawiska sejsmiczne) rejestrowane winny być automatycznie na rejestratorze na powierzchni. Ponadto proponuje się instalację systemu przypowierzchniowych sond geofonowych w płytkich otworach (30-50m). Połączone wspólnym czasem (GPS) geofony w otworze monitorującym oraz geofony przypowierzchniowe, pozwolą na pseudo-ciągłą obserwację mikrosejsmologiczną podczas zatłaczania CO2, wykonywania 4D obrazów tomograficznych (w przypadku znaczącej aktywności sejsmicznej – metodą tomografii pasywne, a w przypadku słabej aktywności sejsmicznej - metodą tomografii aktywnej (wykonanie strzelań ładunkami MW lub metodą wibracji). Z pomiarami mikrosejsmologicznymi oraz pasywną tomografią w zaproponowanej geometrii sieci geofonowej, można równocześnie wykonywać inne pomiary i analizy znane z aktywnej sejsmiki prospekcyjnej, takie jak profilowanie VSP, time laps 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 Canadzie, gdzie wtłaczany jest CO2.

Aparatura do pomiarów sejsmometrycznych

Aparatura do pomiarów sejsmometrycznych ma za zadanie monitorowanie drgań parasejsmicznych (przemysłowych) oraz ewentualnych silnych wstrząsów indukowanych wtłaczaniem CO2 do kolektora w warstwach solankowych.. Pomiary monitoringowe sejsmometryczne są niezbędne do oceny wpływu potencjalnych wstrząsów na środowisko powierzchniowe.

Sieć sejsmometryczna powinna się składać z 3-5 stanowisk powierzchniowych rozlokowanych bezpośrednio przy otworze wtłaczającym, 2 otworach monitoringowych oraz ewentualnie przy pobliskich obiektach strategicznych.

Przykładem takiej aparatury może być opracowana w GIG aparatura sejsmometryczna AMAX 99. Jest to aparatura mobilna, stosowana do pomiarów drgań parasejsmicznych i wstrząsów górotworu.

Podstawowe wymagane parametry aparatury sejsmometrycznej powierzchniowej:

przejrzysta i wygodna prezentacja graficzna zarejestrowanych wstrząsów

analiza widmowa wstrząsów (FFT)

całkowanie zapisów przyspieszenia drgań na amplitudy prędkości z uwzględnieniem korekty linii bazowej (tzw. baseline correction)

projektowanie przez użytkownika filtrów o wybranej dowolnej charakterystyce

Obliczanie czasu trwania wstrząsu

Eksport i import plików w formacie ASCII

Podstawowe oprogramowanie aparatury sejsmometrycznej

Obliczanie spektrów odpowiedzi

Ciągła rejestracja drgań w plikach

Detekcja zjawisk sejsmicznych

Podstawowe parametry aparatury sejsmometrycznej

zakres częstotliwości: od 1 do 500 Hz

maksymalne amplitudy prędkości drgań do 200 mm/s

maksymalne amplitudy przyspieszenia do 3000 mm/s^2

automatyczne wyzwalanie zapisów wstrząsów

zdalne sterowanie aparaturą przez GRSM lub internet

Koszty

W dyrektywie Parlamentu Europejskiego w sprawie geologicznego składowania dwutlenku węgla (2009) wskazuje się na konieczność zapewnienia środków na monitorowanie na okres eksploatacji oraz przynajmniej 20-30 lat po likwidacji zbiornika. Znacząco niższe koszty obliczeń tomograficznych opartych na rejestracji przy pomocy stałej sieci sejsmologicznej założonej w obszarze zbiornika, w porównaniu do okresowych badań sejsmicznych wskazują, że warto zainwestować w zastosowanie tej techniki monitorowania procesu zatłaczania CO_2 w trakcie zatłaczania i w okresie po likwidacji składowiska.

Koszt montażu na stałe sejsmicznych mierników drgań (12 sond) w otworze o długości do 1500m, wraz z systemem do rejestracji, akwizycji i analizy danych. wyniesie około 0,7 do 1,0 mln Euro. Do tego należałoby doliczyć koszty sieci powierzchniowej w kwocie rzędu 200-300 tys. Euro oraz koszty roczne nadzoru technicznego i merytorycznego (analiza danych i opracowywanie wyników do sprawozdań.

Koszt aparatury sejsmometrycznej to około o,5 mln zł oraz koszty nadzoru technicznego i obsługi w okresie czasu monitorowania.

Podsumowanie

Poza standardowo stosowanymi aktualnie technikami monitorowania, w dokumentacji zaproponowano wykorzystanie metody sejsmologicznej do monitorowania geologicznego składowania CO_2 w pokładach węgla oraz monitorowania drgań na powierzchni metodą sejsmometryczną. Stacjonarna sieć sejsmologiczna jest w stanie rejestrować zjawiska sejsmiczne związane z pękaniem skał o niskiej porowatości w trakcie wtłaczania CO_2. Metoda ta pozwala na lokalizację pęknięć, a tym samym na śledzenie chmury wtłaczanego CO_2 oraz położenia i kierunku ewentualnych dróg przecieku.

Wykorzystując naturalne zjawiska dynamiczne wywoływane tworzeniem się nowych szczelin podczas procesu zatłaczania CO_2 zarejestrowane przez przestrzenną sieć sejsmologiczną, można również 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 zatłaczania CO2 oraz w nadkładzie. Zaproponowano zastosowanie algorytmu obliczeniowego opartego o krzywoliniowy promień sejsmiczny.

Sieć sejsmometryczna została zaproponowana do monitorowania silniejszych wstrząsów związanych z procesem zatłaczania CO_2, naturalnej aktywności sejsmicznej oraz wstrząsów górotworu indukowanych procesem eksploatacji węgla w pobliskich kopalniach. Pomiary sejsmometryczne są niezbędne do oceny wpływu potencjalnych drgań na środowisko powierzchniowe.

Monitoring mikrobiologiczny i stężenia CO2 w powietrzu podglebowym dla obiektu Choszczno-Suliszewo (IGSMiE)

(Radosław Tarkowski, Wiesław Sroczyński, Katarzyna Luboń)

Zakres prac IGSMiE PAN na II półrocze 2012 r. w ramach zadania **1.1.18** dotyczył:

- opracowania programu monitoringu (stanu początkowego) mikrobiologicznego i stężenia CO_2 w powietrzu glebowym dla wybranego obszaru
- opracowania założeń dla monitoringu mikrobiologicznego i monitoringu stężenia CO_2 w powietrzu podglebowym w trakcie i po zakończeniu zatłaczania CO_2 dla wybranego obszaru.

Zgodnie ze wskazaniami Koordynatora Projektu do badań monitoringu wybrano obszar struktury Suliszewa, położony w południowo-zachodniej części niecki szczecińskiej.

Program monitoringu zawartości dwutlenku węgla w powietrzu glebowym oraz biomonitoringu sporządzono na podstawie dotychczasowych doświadczeń i wyników badań wykonanych przez IGSMiE PAN w ramach prac statutowych i projektów badawczych, jak również na podstawie dostępnej literatury.

Ramy prawne

Podstawowym aktem prawnym regulującym kwestie podziemnego składowania dwutlenku węgla pozostaje Dyrektywa Parlamentu Europejskiego I Rady 2009/31/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie geologicznego składowania dwutlenku węgla (Dyrektywa CCS 2009).

W art. 13 Dyrektywy wprowadzony został wymóg, aby operatorzy monitorowali instalacje zatłaczające, kompleksy składowania (w tym chmurę CO_2, jeśli to możliwe) i – w stosownych przypadkach – otaczające środowisko w celu:

- porównania faktycznego i modelowanego zachowania w składowisku CO_2 i wody występującej w formacjach,

- wykrycia znaczących nieprawidłowości,

- wykrycia migracji CO_2,

- wykrycia wycieku CO_2,

- wykrycia znaczącego niekorzystnego wpływu na otaczające środowisko, w tym w szczególności na wodę pitną, na populacje ludzkie lub na użytkowników otaczającej biosfery,

- oceny skuteczności wszelkich działań naprawczych,

- aktualizacji oceny bezpieczeństwa i integralności kompleksu składowania w krótkiej i długiej perspektywie, w tym oceny, czy CO_2 będzie całkowicie i stale hermetycznie składowany.

Podstawą monitorowania jest plan sporządzony przez operatora, podlegający zatwierdzeniu przez właściwe organy.

Kryteria celowe opracowania i aktualizacji planów monitorowania instalacji zatłaczających i kompleksów składowania CO_2 są wskazane w Załączniku II Dyrektywy CCS. Plany takie opracowuje się zgodnie z analizą oceny ryzyka (omówioną w zał. I Dyrektywy CCS, etap 3.3) i aktualizuje, aby spełnić wymogi w zakresie monitorowania określone w art. 13 ust. 1 Dyrektywy.

Plany monitorowania zawierają szczegółowe ustalenia odnoszące się do głównych etapów projektu, w tym monitorowania stanu wyjściowego, w czasie eksploatacji i po zamknięciu. Dla każdego z etapów należy określić: monitorowane parametry, zastosowaną technologię monitorowania i uzasadnienie wyboru technologii, monitorowane punkty i uzasadnienie wyboru prób, częstotliwość realizacji i uzasadnienie wyboru prób.

Teoretyczne podstawy monitorowania zawartości dwutlenku węgla w powietrzu glebowym oraz biomonitoringu

Dwutlenek węgla w powietrzu glebowym

Biogeniczny CO_2

Gleba, jako ożywiony układ trójfazowy, jest złożonym utworem, który stwarza środowisko bytowania faunie glebowej, mikroorganizmom i roślinom. Dwutlenek węgla wchodzi w skład fazy gazowej, czyli tak zwanego powietrza glebowego. Skład powietrza glebowego, jego wymiana pomiędzy atmosferą a glebą oraz transport w samej glebie, jego wpływ na system korzeniowy roślin oraz na procesy biologiczne i chemiczne w glebie zaliczane są do grupy zagadnień określanych pod pojęciem „aeracji gleb" lub „natlenienia gleb" (Kowalik, Stepniewski 1976; Armstrong 1979).

Podstawowe składowe powietrza glebowego (N_2, O_2, CO_2, H_2O) występują zarówno w fazie gazowej jak i ciekłej gleby (w porach wypełnionych powietrzem i wodą), a ich prężność w fazie gazowej zależy od temperatury i ciśnienia atmosferycznego (Stępniewska i in., 2004). Skład powietrza glebowego podlega nieustannym zmianom, jest on bowiem warunkowany efektem biologicznych i chemicznych procesów zachodzących w glebie. Pochłanianie i wydzielanie gazów zależy od aktywności biologicznej mikroorganizmów glebowych i korzeni roślin oraz od procesów fizycznych transportu gazów, których wartość wypadkowa wyznacza stan aerobiozy (Tretyn, 1998; Marscher, 1986).

Masa organiczna w glebie zawiera kilkakrotnie więcej węgla niż znajduje się go w atmosferze (Post i in. 1982). Dlatego nawet niewielkie ilości węgla uwolnione z gleb zwiększają koncentracje CO_2 w powietrzu (Jenkinson 1991). W atmosferze CO_2 stanowi niewielki ułamek całej masy gazów, natomiast w powietrzu glebowym jest go kilkakrotnie więcej (**Tab. 1.1.18_12**), czasami może dochodzić do 2%, a na polach ryżowych nawet do 21% (Dobrzański 1993; Kędziora 1995, Boroń 1983).

Podstawowe znaczenie dla składu powietrza glebowego mają przemiany tlenu i dwutlenku węgla. Tlen głównie jest pobierany w procesie oddychania (respiracji) przez aeroby obecne w tym środowisku, może być również wydzielany np. przez organizmy asymilujące dwutlenek węgla (glony, sinice). Dwutlenek węgla, obok dominującego procesu jego wydzielania (produkt dekarboksylacji i mineralizacji substancji organicznej) może podlegać również asymilacji przez autotrofy, a także niektóre heterotrofy glebowe. Poza wymienionymi procesami biologicznymi, tlen i dwutlenek węgla mogą również wchodzić w reakcje chemiczne z mineralnymi i organicznymi składnikami gleby (rozkład węglanów, utlenianie zredukowanych form żelaza, manganu itp.) (Stępniewska i in. 2004).

Tab. 1.1.18_12 Główne składniki powietrza atmosferycznego w troposferze oraz powietrza glebowego(Boroń 1983; Kędziora 1995)

Składnik powietrza	**Powietrze atmosferyczne (%)**	**Powietrze glebowe (%)**
Tlen	20,94	10,4-20,7
Azot	78,08	70,8-80,24
Dwutlenek węgla	0,03	0,15-0,65

Ilość powietrza glebowego, a w nim CO_2, zależy od: struktury, porowatości i wilgotności gleby, wahań temperatury, oddychania korzeni itp. (Dobrzański, Zawadzki 1993). Źródłem CO_2 w powietrzu glebowym jest oddychanie mikroorganizmów rozkładających substancje organiczną oraz oddychanie korzeni roślin (Radecki-Pawlik, Boroń 1998). W stabilnych ekosystemach i niezmiennych warunkach środowiskowych ilość wydzielanego CO_2 wykazuje stan równowagi, która może być zachwiana w wyniku działania czynników oraz procesów powodujących nadmierne uwalnianie węgla organicznego i wydzielanie go do atmosfery w postaci dwutlenku węgla. Do procesów tych można zaliczyć (Falkowska, Korzeniewski 1998):

- rozkład tlenowy materii organicznej: $C_6H_{10}O_5 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 5H_2O$,

- rozkład beztlenowy materii organicznej: $C_6H_{10}O_5 + H_2O \rightarrow 3CH_4 + 3CO_2$,

- rozkład mocznika: $CO(NH_2)_2 + 2H_2O \rightarrow (NH_4)2CO_3 \rightarrow 2NH_3 + CO_2 + H_2O$ (Kowalik 2001),

- amonifikacje: $CH_2NH_2COOH + 1{,}5O_2 \rightarrow NH_3 + 2CO_2 + H_2O$ (Buresh, Patrick 1978),

- denitryfikacje: $5(CH_2O) + 4NO_3^- + 4H^+ \rightarrow 5CO_2 + 2N_2 + 7H_2O$

Równowagę można naruszyć poprzez antropogeniczne działania, takie jak: zmiany użytkowania terenu, wylesianie, działalność rolnicza itp. (Rogalski i in. 2004).

Ilość dwutlenku węgla w glebie zmienia się dynamicznie, podobnie jak zawartość tlenu. Przy dobrym przewietrzaniu jest w przybliżeniu równa ubytkowi tlenu, z reguły nie przekracza kilku procent objętościowych powietrza glebowego, nawet na głębokości kilku metrów. W glebach o wysokim poziomie wody gruntowej stężenie CO_2 często osiąga maksimum w środkowej części profilu. Maksymalne stężenie dwutlenku węgla w powietrzu glebowym występuje w okresach zwiększonego uwilgotnienia i podwyższonej temperatury gleby. Koncentracja dwutlenku węgla zależy od nawodnienia, obecności szaty roślinnej, nawożenia świeżym materiałem roślinnym, stosowaniem obornika, ścieków oraz gnojowicy (Gliński, Stępniewski 1985; Stępniewska i in. 2004).

Wymiana gazowa obejmuje dopływ do gleby tlenu z powietrza atmosferycznego oraz odprowadzenie wytworzonego w niej dwutlenku węgla. Od ciągłości tej wymiany i jej intensywności uzależniony jest skład chemiczny powietrza glebowego i stopień natlenienia korzeni roślin. Wymiana gazowa w glebie następuje w wyniku działania wielu czynników, z których najważniejsza jest dyfuzja stężeniowa. Przepływ powietrza

występuje przede wszystkim w warstwie powierzchniowej gleby. W warstwach głębszych, począwszy od 5 cm, przepływ gazu jest nieznaczny i może w ogóle nie zachodzić, co powodować może gromadzenie się np. CO_2. Należy zaznaczyć, że intensywność przepływu gazów związana jest z różnicami ciśnień, spowodowanych różnicami temperatur, zmianami ciśnienia atmosferycznego, nasileniem wiatru, wsiąkaniem wody opadowej, wahaniami zwierciadła wody gruntowej itp. Jednakże głównym mechanizmem wymiany gazów w glebie jest dyfuzja, która powoduje około 90% całkowitej wymiany gazowej. Dyfuzja jest również jedynym sposobem przemieszczania się gazów w fazie ciekłej wokół korzeni i wewnątrz nasyconych wodą agregatów glebowych.

W naturalnych systemach ekologicznych, w przypadku, gdy nie ma emisji tego gazu z głębszych warstw Ziemi, koncentracja w powietrzu podglebowym i strumień dwutlenku węgla zależy głównie od fotosyntezy, oddychania korzeni, rozkładu substancji organicznej, odgazowywania wód podziemnych i wymiany z atmosferą (**Fig. 1.1.18_65**).

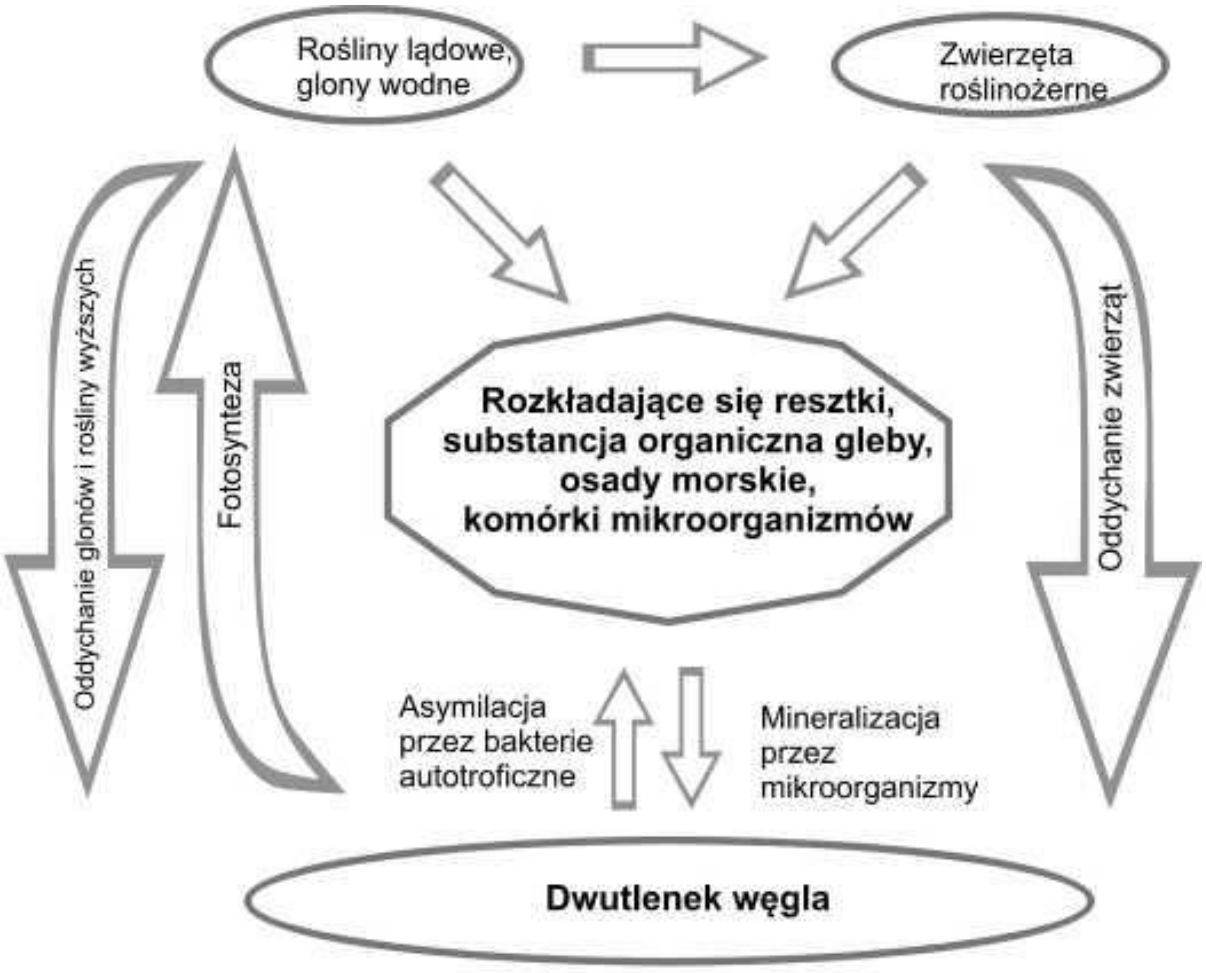


Fig. 1.1.18_65 Udział mikroorganizmów w przemianach materii organicznej (Źródło: Kołwzan i in. 2005)

Endogeniczny CO_2

W głębi ziemi wolny dwutlenek węgla może występować w stężeniach większych niż w atmosferze (nawet o 2 rzędy wielkości), przy czym przeważnie pozostaje tam uwięziony w naturalnych pułapkach. Miejsca, gdzie dociera on do wierzchnich warstw skorupy ziemskiej zaznaczają się występowaniem wód mineralnych typu szczaw. W naszym kraju takie wody występują w Karpatach (karpacka prowincja szczaw) oraz w Sudetach i na obszarze bloku przedsudeckiego (prowincja sudecka). Rzadziej (w Polsce sporadycznie) dwutlenek węgla wydobywa się na powierzchnię także w postaci strumienia gazowego dając suche ekshalacje.

Endogeniczny dwutlenek węgla może pochodzić wprost z głębokich warstw skorupy ziemskiej, gdzie występują wody reliktowe nasycone CO_2, poprzez różnego rodzaju nieszczelności, związane głównie ze strefami uskokowymi. Z taką sytuacją mamy do czynienia w rejonie od Szczawy i Krościenka na zachodzie, przez Piwniczną, Muszynę, Tylicz po Wysową na wschodzie (tzw. karpacka prowincja szczaw). Innym źródłem endogenicznego dwutlenku węgla jest utlenianie substancji bitumicznych. Taka geneza przypisywana jest wodom mineralnym z rejonu Iwonicza-Zdroju i Rymanowa-Zdroju, gdzie szczawy i wody kwasowęglowe są wykorzystywane do celów leczniczych. Kolejny, izolowany obszar występowania szczaw znajduje się w Bieszczadach, w okolicach Baligrodu.

Do uwalniania endogenicznego dwutlenku węgla przyczynia się także działalność górnicza. Z niezorganizowaną emisją CO_2, w małych stężeniach, mamy do czynienia w wyrobiskach kopalnianych, skąd jest on usuwany razem ze zużytym powietrzem, przez wentylację. Jako gaz towarzyszący dwutlenek węgla występuje powszechnie w złożach ropy naftowej i gazu ziemnego (w stężeniach od ułamka procenta do kilkunastu procent). Może stamtąd wydostawać się np. przez nieszczelności po źle zlikwidowanych otworach wydobywczych. W przypadku złóż eksploatowanych dodatkowym źródłem CO_2 może być wspomniane wcześniej utlenianie bituminów w zanieczyszczonych miejscach.

Mikroorganizmy glebowe

W skład gleby wchodzą cząstki stałe (mineralne i organiczne), powietrze i roztwór glebowy oraz mikroorganizmy (edafon). Mikroorganizmy bytujące w glebie to grzyby, jednokomórkowce roślinne i zwierzęce, rośliny naczyniowe i bezkręgowce. Edafon może stanowić od 1 do 10% suchej masy substancji organicznej gleby. Ze względu na wielkość organizmy żyjące w glebie można podzielić na trzy grupy (Kołwzan i in. 2005):

- mikrobiota (niedostrzegalne gołym okiem) – wirusy, bakterie, grzyby, glony i pierwotniaki,

- mezobiota (0,2-2 mm) – wazonkowce, nicienie, owady bezskrzydłe, wije, roztocza i inne, małe rośliny,

- makrobiota (>2 mm) – dżdżownice, gryzonie, większe owady, korzenie roślin i drzew.

Podstawową masę mikroorganizmów glebowych stanowią bakterie, które charakteryzują się wysoką aktywnością metaboliczną. Większość bakterii wykazuje adhezję do cząstek mineralnych gleby i koloidów glebowych.

Liczebność bakterii w glebie jest różna i waha się od kilku milionów do kilku miliardów komórek na 1 gram gleby. Najwięcej bakterii znajduje się w warstwie gleby uprawnej do głębokości 30 cm. W głębszych warstwach ich ilość szybko spada.

Zespoły drobnoustrojów w glebach są na ogół złożonymi zbiorami populacji różnych gatunków, których różnorodność jest olbrzymia. Torsvic i in. (1990) na podstawie analizy DNA w próbkach gleby wykazali, że zawierają one około 4000 do 7000 genotypów należących do różnych organizmów prokariotycznych. Na podstawie innych badań stwierdzono, że w środowisku glebowym może znajdować się nawet 12000 do 18000 różnych gatunków bakterii. Obliczenia innych autorów wskazują na występowanie w biosferze 40 000, a nawet 2 do 3 milionów różnych gatunków bakterii (Trevors i in. 1995; Tunlid i in. 1991). Uprawnione jest założenie, że w środowisku glebowym wśród tak wielkiej bioróżnorodności mikroorganizmów znajdą się zawsze jakieś drobnoustroje przystosowane do specyficznych warunków panujących w mikroniszach ekologicznych. Dwutlenek węgla, jako gaz naturalnie występujący w środowisku glebowym wpłynął na ewolucję drobnoustrojów w taki sposób, że na pewno znajdują się w niej takie, które są przystosowane do egzystencji w obecności tego gazu w podwyższonej ilości, a nawet mogą go koniecznie wymagać do prawidłowego wzrostu i rozwoju.

Migracja CO_2 do górnych przypowierzchniowych warstw gleby może powodować widoczne zmiany w biocenozie glebowej. Normalna zawartość CO_2 w warstwie gleby ornej waha się w granicach od 0,05 do 0,3 % (De Jong i in. 1972, 1974). Liczne badania wskazują, że organizmy glebowe w bardzo małym stopniu reagują na zmiany zawartości CO_2 w glebie (Fireston, Chapin 1999; Gołębiowska, Pędziwilk 1984; Sadowsky, Schortemeyer 1997; Weyman-Kaczmarkowa, Głuchowska 2004). Należy wspomnieć, że gleba jest naturalnym środowiskiem występowania różnych grup systematycznych drobnoustrojów, których biomasa w warstwie ornej może wynosić 5-15 ton/ha. Środowisko glebowe sprzyja ich rozwojowi, bowiem posiada wszystkie niezbędne warunki dla ich prawidłowego życia i rozwoju. Jednakże ich biomasa i skład gatunkowy uzależniony jest od wielu czynników natury fizycznej, chemicznej i biologicznej, a w szczególności od składników pokarmowych, szaty roślinnej, stosunków wodno-powietrznych, klimatu, odczyn gleby itp., które wywierają decydujący wpływ na dynamikę rozwoju mikroorganizmów w glebie i ich aktywność biochemiczną (Aleksander 1975; Badura 2002). Cała ta masa żywych organizmów stanowi olbrzymi, niezwykle czynny pod względem metabolicznym mechanizm, przerabiający ogromne ilości rozmaitych substancji organicznych i związków mineralnych oraz wzbogacających gleby w węgiel, azot, substancje wzrostowe, substancje antybiotyczne i inne.

Program monitoringu powierzchniowego CO_2 dla składowiska na strukturze Suliszewo

Antyklina Suliszewa jest usytuowana kilka kilometrów na południe od miejscowości Recz i około 20 km na północny wschód od antykliny Choszczna. Struktura ta została rozpoznana półszczegółowym zdjęciem sejsmiki refleksyjnej oraz jednym otworem wiertniczym Suliszewo 1 o końcowej głębokości 1726,0 m (retyk) położonym w pobliżu centrum struktury.

Potencjalnym poziomem zbiornikowym przebadanym otworem Suliszewo 1 na głębokości 1293,0-1386,0 m jest formacja komorowska górnego pliensbachu (domeru). Poziom formacji komorowskiej reprezentują głównie piaskowce z przewarstwieniami mułowców i iłowców, liczniejszymi w górnej części profilu. Pojemność wolumetryczna formacji komorowskiej wynosi w przybliżeniu 60 mln ton dwutlenku węgla przy współczynniku efektywności składowania CO_2 przyjętym na poziomie 0,1. Serię uszczelniającą stanowią warstwy gryfickie (=formacja ciechocińska) toarsu dolnego wykształcone jako iłowce i mułowce z przerostami piaszczysto-wapnistymi.

Drugim potencjalnym poziomem zbiornikowym w obrębie antykliny Suliszewa wynikającym z badań regionalnych jest piaskowiec trzcinowy karniku (środkowego kajpru). W kulminacji antykliny strop piaskowca trzcinowego określa izohipsa o wartości -1750 m. Poziom ten jest zbudowany z piaskowców i warstw mułowcowo-ilastych liczniejszych w górnej części profilu. Pojemność wolumetryczna piaskowca trzcinowego w antyklinie Suliszewa wynosi szacunkowo 59 mln ton dwutlenku węgla przy współczynniku efektywności składowania CO_2 przyjętym na poziomie 0,1. Poziom piaskowca trzcinowego uszczelniają warstwy kajpru górnego reprezentowane przez iłowce i mułowce z przewarstwieniami ewaporatów (patrz rozdział **1.1.15**).

Założenia do monitoringu

Badania powierzchniowe obejmują pomiary stężenia dwutlenku węgla w powietrzu podglebowym (wzdłuż wyznaczonych profili, badania powierzchniowe, zmiany sezonowe oraz głębokościowe) oraz strumienia tego gazu. Monitoring będzie realizowany przez badanie stężenia CO_2 w powietrzu podglebowym oraz strumienia na terenie składowiska. Wzrost stężenia dwutlenku węgla w powietrzu podglebowym i/lub wielkości strumienia tego gazu wskazuje 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, włączając w to 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 składowania dwutlenku węgla na składowisku w strukturze Suliszewo proponuje się wykonanie następujących badań geochemicznych:

- szczegółowe zdjęcie geochemiczne zawartości dwutlenku węgla na terenie składowiska w strukturze Suliszewo,

- powierzchniowe badania geochemiczne zawartości CO_2 w pobliżu otworu zatłaczającego,

- sezonowe powierzchniowe badania geochemiczne zawartości CO_2 na terenie składowiska w strukturze Suliszewo,

- badania geochemiczne rozkładu stężeń CO_2 do głębokości 5 m w wybranych punktach,

- ciągłe pomiary zawartości CO_2 w powietrzu podglebowym w zastabilizowanych punktach pomiarowych.

Na etapie monitorowania poziomu odniesienia badania te mają na celu ustalenie tła zawartości CO_2 w powietrzu podglebowym oraz jego zmian sezonowych i rozkładu głębokościowego dla składowiska w strukturze Suliszewo. Posłużą 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.

Metodyka pomiarów zawartości CO_2 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 ustalono wstępnie na mapach topograficznych w skali 1:10 000 (w razie potrzeby posłużono się powiększeniami). Lokalizacja stanowisk wymaga weryfikacji na podstawie rekonesansu w terenie, przy czym część punktów pomiarowych może być nieznacznie przesunięta ze względu na występowanie trwałej nawierzchni, przeszkód terenowych, instalacji podziemnych, itp.

Położenie punktów pomiarowych w terenie należy udokumentować metodami geodezyjnymi z dokładnością $\pm$1 m.

Punkty pomiarowe powierzchniowego zdjęcia geochemicznego zawartości CO_2 planuje się rozmieścić w siatce podstawowej 200 x 200 m. Obszar składowiska, na którym wykonywane będą pomiary stężenia CO_2 w powietrzu glebowym obejmuje powierzchnię ok. 1,45 km^2. Na tym obszarze tym przewidziano 53 podstawowe punkty pomiarowe (**Tab. 1.1.18_13, Fig. 1.1.18_67**).

Lokalizacja punktów do badań zmian sezonowych zawartości dwutlenku węgla została zaplanowana w formie siatki o rozmiarach 400x400 m. Na obszarze składowiska przewidziano 13 punktów pomiarowych do badań sezonowych (**Tab. 1.1.18_14, Fig. 1.1.18_68**).

Zawartości CO_2 w powietrzu glebowym proponuje się badać dokładniej w pobliżu otworu zatłaczającego. Punkty będą lokalizowane w odległości 25 m; przewiduje się, że takich punktów będzie 4÷5.

Punkty, w których będzie prowadzony ciągły pomiar zawartości dwutlenku węgla w powietrzu glebowym (9 szt.) powinny być zlokalizowane w pobliżu otworu zatłaczającego i pozostałych otworów na składowisku w strukturze Suliszewo (**Tab. 1.1.18_15, Fig. 1.1.18_69**).

Powierzchniowe pomiary geochemiczne (zdjęcie zawartości CO_2 oraz zmiany sezonowe) będą prowadzone na głębokości do l m w punktach pomiarowych przewidzianych dla poszczególnych typów badań. Zawartość CO_2 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 (**Fig. 1.1.18_66**). Oznaczenie stężenia będzie wykonywane detektorem X-am 7000 firmy Drager. Miernik ten jest wyposażony w sensor CO_2 działający na zasadzie absorpcji promieniowania podczerwonego techniką NDIR *(Non-dispersive Infrared)* o zakresie pomiarowym 0-100% obj. gazu.

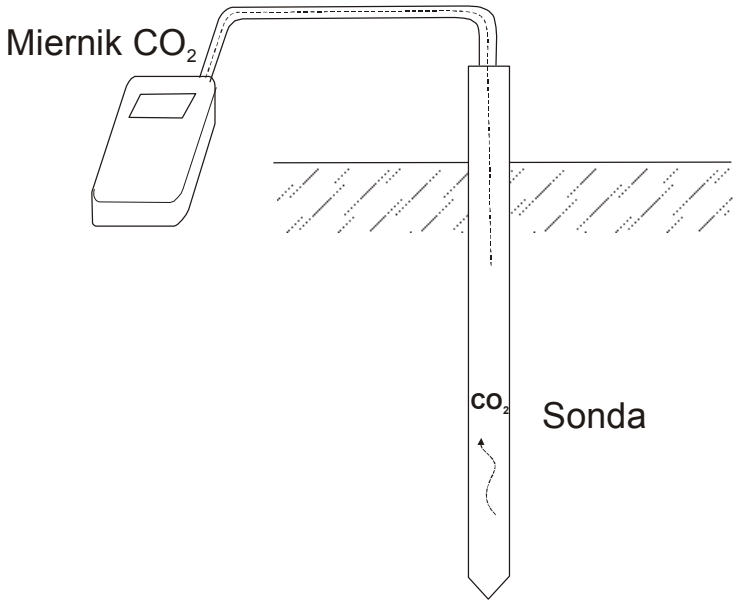


Fig. 1.1.18_66 Schemat pomiarów zawartości dwutlenku węgla w powietrzu podglebowym

Głębokościowy rozkład stężenia dwutlenku węgla będzie wykonany w 10 punktach w otworach odwierconych do głębokości 5 m. Pomiar stężenia będzie wykonywany na głębokości l, 2, 3, 4 m.

Instalacja ciągłego pomiaru zawartości i rejestracji dwutlenku węgla w powietrzu glebowym będzie składała się z przetworników (liczba zostanie ustalona na etapie projektowania prac), źródła zasilania, skanera pomiarowego oraz komputera. Przetworniki umieszczone będą w rurach PCV o średnicy 100 mm; na

głębokości 110 cm, w dolnej części będą one sperforowane: zasilane napięciem 24 V DC, z zasilacza napięcia stałego. Skaner pomiarowy, zlokalizowany w oddzielnej skrzynce pomiarowej, połączony będzie kablami sygnałowymi z przetwornikami CO_2 ułożonymi 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.

Tab. 1.1.18_13 Lokalizacja punktów pomiarowych stężenia CO_2 w powietrzu podglebowym na składowisku na strukturze Suliszewo

Punkt pomiarowy	Współrzędne topograficzne (1992)		Współrzędne geograficzne (WGS84)	
	X_1992	Y_1992	Długość	Szerokość
1	601 100,00	269 400,00	15º 32' 39,5'' E	53º 13' 30,0'' N
2	601 100,00	269 600,00	15º 32' 50,3'' E	53º 13' 30,4'' N
3	601 100,00	269 800,00	15º 33' 00,7'' E	53º 13' 30,4'' N
4	601 100,00	270 000,00	15º 33' 11,5'' E	53º 13' 30,7'' N
5	601 100,00	270 200,00	15º 33' 22,3'' E	53º 13' 31,1'' N
6	601 100,00	270 400,00	15º 33' 33,1'' E	53º 13' 31,4'' N
7	601 100,00	270 600,00	15º 33' 43,9'' E	53º 13' 31,8'' N
8	601 100,00	270 800,00	15º 33' 54,7'' E	53º 13' 32,2'' N
9	601 100,00	271 000,00	15º 34' 05,5'' E	53º 13' 32,5'' N
10	601 100,00	271 200,00	15º 34' 16,3'' E	53º 13' 32,5'' N
11	600 900,00	269 000,00	15º 32' 18,2'' E	53º 13' 22,8'' N
12	600 900,00	269 200,00	15º 32' 29,0'' E	53º 13' 23,2'' N
13	600 900,00	269 400,00	15º 32' 39,8'' E	53º 13' 23,5'' N
14	600 900,00	269 600,00	15º 32' 50,6'' E	53º 13' 23,9'' N
15	600 900,00	269 800,00	15º 33' 01,4'' E	53º 13' 23,9'' N
16	600 900,00	270 000,00	15º 33' 12,2'' E	53º 13' 24,2'' N
17	600 900,00	270 200,00	15º 33' 23,0'' E	53º 13' 24,6'' N
18	600 900,00	270 400,00	15º 33' 33,8'' E	53º 13' 25,0'' N
19	600 900,00	270 600,00	15º 33' 44,6'' E	53º 13' 25,3'' N
20	600 900,00	270 800,00	15º 33' 55,1'' E	53º 13' 25,7'' N
21	600 900,00	271 000,00	15º 34' 05,9'' E	53º 13' 26,0'' N
22	600 900,00	271 200,00	15º 34' 16,7'' E	53º 13' 26,4'' N
23	600 900,00	271 400,00	15º 34' 27,5'' E	53º 13' 26,4'' N
24	600 900,00	271 600,00	15º 34' 38,3'' E	53º 13' 26,8'' N
25	600 700,00	268 600,00	15º 31' 57,4'' E	53º 13' 15,6'' N
26	600 700,00	268 800,00	15º 32' 08,2'' E	53º 13' 16,0'' N
27	600 700,00	269 000,00	15º 32' 19,0'' E	53º 13' 16,3'' N

28	600 700,00	269 200,00	15º 32' 29,8'' E	53º 13' 16,7'' N
29	600 700,00	269 400,00	15º 32' 40,2'' E	53º 13' 17,0'' N
30	600 700,00	269 600,00	15º 32' 51,0'' E	53º 13' 17,4'' N
31	600 700,00	269 800,00	15º 33' 01,8'' E	53º 13' 17,8'' N
32	600 700,00	270 000,00	15º 33' 12,6'' E	53º 13' 17,8'' N
33	600 700,00	270 200,00	15º 33' 23,4'' E	53º 13' 18,1'' N
34	600 700,00	270 400,00	15º 33' 34,2'' E	53º 13' 18,5'' N
35	600 700,00	270 600,00	15º 33' 45,0'' E	53º 13' 18,8'' N
36	600 700,00	270 800,00	15º 33' 55,8'' E	53º 13' 19,2'' N
37	600 700,00	271 000,00	15º 34' 06,6'' E	53º 13' 19,6'' N
38	600 700,00	271 200,00	15º 34' 17,4'' E	53º 13' 19,9'' N
39	600 700,00	271 400,00	15º 34' 28,2'' E	53º 13' 19,9'' N
40	600 700,00	271 600,00	15º 34' 39,0'' E	53º 13' 20,3'' N
41	600 700,00	271 800,00	15º 34' 49,4'' E	53º 13' 20,6'' N
42	600 500,00	268 400,00	15º 31' 46,9'' E	53º 13' 08,8'' N
43	600 500,00	268 600,00	15º 31' 57,7'' E	53º 13' 09,1'' N
44	600 500,00	268 800,00	15º 32' 08,5'' E	53º 13' 09,5'' N
45	600 500,00	269 000,00	15º 32' 19,3'' E	53º 13' 09,8'' N
46	600 500,00	269 200,00	15º 32' 30,1'' E	53º 13' 10,2'' N
47	600 500,00	269 400,00	15º 32' 40,9'' E	53º 13' 10,6'' N
48	600 500,00	269 600,00	15º 32' 51,7'' E	53º 13' 10,9'' N
49	600 500,00	269 800,00	15º 33' 02,5'' E	53º 13' 11,3'' N
50	600 500,00	270 000,00	15º 33' 13,3'' E	53º 13' 11,3'' N
51	600 500,00	270 200,00	15º 33' 24,1'' E	53º 13' 11,6'' N
52	600 500,00	270 400,00	15º 33' 34,6'' E	53º 13' 12,0'' N
53	600 500,00	270 600,00	15º 33' 45,4'' E	53º 13' 12,4'' N
54	600 500,00	270 800,00	15º 33' 56,2'' E	53º 13' 12,7'' N
55	600 500,00	271 000,00	15º 34' 07,0'' E	53º 13' 13,1'' N
56	600 500,00	271 200,00	15º 34' 17,8'' E	53º 13' 13,4'' N
57	600 500,00	271 400,00	15º 34' 28,6'' E	53º 13' 13,4'' N
58	600 500,00	271 600,00	15º 34' 39,4'' E	53º 13' 13,8'' N
59	600 500,00	271 800,00	15º 34' 50,2'' E	53º 13' 14,2'' N
60	600 500,00	272 000,00	15º 35' 01,0'' E	53º 13' 14,5'' N
61	600 300,00	268 400,00	15º 31' 47,6'' E	53º 13' 02,6'' N
62	600 300,00	268 600,00	15º 31' 58,4'' E	53º 13' 02,6'' N
63	600 300,00	268 800,00	15º 32' 09,2'' E	53º 13' 03,0'' N
64	600 300,00	269 000,00	15º 32' 20,0'' E	53º 13' 03,4'' N
65	600 300,00	269 200,00	15º 32' 30,5'' E	53º 13' 03,7'' N
66	600 300,00	269 400,00	15º 32' 41,3'' E	53º 13' 04,1'' N

67	600 300,00	269 600,00	15º 32' 52,1'' E	53º 13' 04,4'' N
68	600 300,00	269 800,00	15º 33' 02,9'' E	53º 13' 04,8'' N
69	600 300,00	270 000,00	15º 33' 13,7'' E	53º 13' 04,8'' N
70	600 300,00	270 200,00	15º 33' 24,5'' E	53º 13' 05,2'' N
71	600 300,00	270 400,00	15º 33' 35,3'' E	53º 13' 05,5'' N
72	600 300,00	270 600,00	15º 33' 46,1'' E	53º 13' 05,9'' N
73	600 300,00	270 800,00	15º 33' 56,9'' E	53º 13' 06,2'' N
74	600 300,00	271 000,00	15º 34' 07,7'' E	53º 13' 06,6'' N
75	600 300,00	271 200,00	15º 34' 18,5'' E	53º 13' 07,0'' N
76	600 300,00	271 400,00	15º 34' 28,9'' E	53º 13' 07,3'' N
77	600 300,00	271 600,00	15º 34' 39,7'' E	53º 13' 07,3'' N
78	600 300,00	271 800,00	15º 34' 50,5'' E	53º 13' 07,7'' N
79	600 300,00	272 000,00	15º 35' 01,3'' E	53º 13' 08,0'' N
80	600 100,00	268 400,00	15º 31' 48,0'' E	53º 12' 56,2'' N
81	600 100,00	268 600,00	15º 31' 58,8'' E	53º 12' 56,2'' N
82	600 100,00	268 800,00	15º 32' 09,6'' E	53º 12' 56,5'' N
83	600 100,00	269 000,00	15º 32' 20,4'' E	53º 12' 56,9'' N
84	600 100,00	269 400,00	15º 32' 42,0'' E	53º 12' 57,6'' N
85	600 100,00	269 600,00	15º 32' 52,8'' E	53º 12' 58,0'' N
86	600 100,00	269 800,00	15º 33' 03,6'' E	53º 12' 58,3'' N
87	600 100,00	270 000,00	15º 33' 14,4'' E	53º 12' 58,7'' N
88	600 100,00	270 200,00	15º 33' 24,8'' E	53º 12' 58,7'' N
89	600 100,00	270 400,00	15º 33' 35,6'' E	53º 12' 59,0'' N
90	600 100,00	270 600,00	15º 33' 46,4'' E	53º 12' 59,4'' N
91	600 100,00	270 800,00	15º 33' 57,2'' E	53º 12' 59,8'' N
92	600 100,00	271 000,00	15º 34' 08,0'' E	53º 13' 00,1'' N
93	600 100,00	271 200,00	15º 34' 18,8'' E	53º 13' 00,5'' N
94	600 100,00	271 400,00	15º 34' 29,6'' E	53º 13' 00,8'' N
95	600 100,00	271 600,00	15º 34' 40,4'' E	53º 13' 00,8'' N
96	600 100,00	271 800,00	15º 34' 51,2'' E	53º 13' 01,2'' N
97	600 100,00	272 000,00	15º 35' 02,0'' E	53º 13' 01,6'' N
98	600 100,00	272 200,00	15º 35' 12,8'' E	53º 13' 01,9'' N
99	599 900,00	268 400,00	15º 31' 48,7'' E	53º 12' 49,7'' N
100	599 900,00	268 600,00	15º 31' 59,5'' E	53º 12' 49,7'' N
101	599 900,00	268 800,00	15º 32' 10,3'' E	53º 12' 50,0'' N
102	599 900,00	269 000,00	15º 32' 20,8'' E	53º 12' 50,4'' N
103	599 900,00	269 400,00	15º 32' 42,4'' E	53º 12' 51,1'' N
104	599 900,00	269 600,00	15º 32' 53,2'' E	53º 12' 51,5'' N
105	599 900,00	269 800,00	15º 33' 04,0'' E	53º 12' 51,8'' N

106	599 900,00	270 000,00	15º 33' 14,8'' E	53º 12' 52,2'' N
107	599 900,00	270 200,00	15º 33' 25,6'' E	53º 12' 52,2'' N
108	599 900,00	270 400,00	15º 33' 36,4'' E	53º 12' 52,6'' N
109	599 900,00	270 600,00	15º 33' 47,2'' E	53º 12' 52,9'' N
110	599 900,00	270 800,00	15º 33' 58,0'' E	53º 12' 53,3'' N
111	599 900,00	271 000,00	15º 34' 08,8'' E	53º 12' 53,6'' N
112	599 900,00	271 200,00	15º 34' 19,2'' E	53º 12' 54,0'' N
113	599 900,00	271 400,00	15º 34' 30,0'' E	53º 12' 54,4'' N
114	599 900,00	271 600,00	15º 34' 40,8'' E	53º 12' 54,4'' N
115	599 900,00	271 800,00	15º 34' 51,6'' E	53º 12' 54,7'' N
116	599 900,00	272 000,00	15º 35' 02,4'' E	53º 12' 55,1'' N
117	599 900,00	272 200,00	15º 35' 13,2'' E	53º 12' 55,4'' N
118	599 700,00	268 400,00	15º 31' 49,1'' E	53º 12' 43,2'' N
119	599 700,00	268 600,00	15º 31' 59,9'' E	53º 12' 43,6'' N
120	599 700,00	268 800,00	15º 32' 10,7'' E	53º 12' 43,6'' N
121	599 700,00	269 000,00	15º 32' 21,5'' E	53º 12' 43,9'' N
122	599 700,00	269 400,00	15º 32' 43,1'' E	53º 12' 44,6'' N
123	599 700,00	269 600,00	15º 32' 53,9'' E	53º 12' 45,0'' N
124	599 700,00	269 800,00	15º 33' 04,7'' E	53º 12' 45,4'' N
125	599 700,00	270 000,00	15º 33' 15,1'' E	53º 12' 45,7'' N
126	599 700,00	270 200,00	15º 33' 25,9'' E	53º 12' 45,7'' N
127	599 700,00	270 400,00	15º 33' 36,7'' E	53º 12' 46,1'' N
128	599 700,00	270 600,00	15º 33' 47,5'' E	53º 12' 46,4'' N
129	599 700,00	270 800,00	15º 33' 58,3'' E	53º 12' 46,8'' N
130	599 700,00	271 000,00	15º 34' 09,1'' E	53º 12' 47,2'' N
131	599 700,00	271 200,00	15º 34' 19,9'' E	53º 12' 47,5'' N
132	599 700,00	271 400,00	15º 34' 30,7'' E	53º 12' 47,9'' N
133	599 700,00	271 600,00	15º 34' 41,5'' E	53º 12' 48,2'' N
134	599 700,00	271 800,00	15º 34' 52,3'' E	53º 12' 48,2'' N
135	599 700,00	272 000,00	15º 35' 02,8'' E	53º 12' 48,6'' N
136	599 700,00	272 200,00	15º 35' 13,6'' E	53º 12' 49,0'' N
137	599 700,00	272 400,00	15º 35' 24,4'' E	53º 12' 49,3'' N
138	599 500,00	268 600,00	15º 32' 00,6'' E	53º 12' 37,1'' N
139	599 500,00	268 800,00	15º 32' 11,0'' E	53º 12' 37,1'' N
140	599 500,00	269 000,00	15º 32' 21,8'' E	53º 12' 37,4'' N
141	599 500,00	269 200,00	15º 32' 32,6'' E	53º 12' 37,8'' N
142	599 500,00	269 400,00	15º 32' 43,4'' E	53º 12' 38,2'' N
143	599 500,00	269 600,00	15º 32' 54,2'' E	53º 12' 38,5'' N
144	599 500,00	269 800,00	15º 33' 05,0'' E	53º 12' 38,9'' N

145	599 500,00	270 000,00	15º 33' 15,8'' E	53º 12' 39,2'' N
146	599 500,00	270 200,00	15º 33' 26,6'' E	53º 12' 39,6'' N
147	599 500,00	270 400,00	15º 33' 37,4'' E	53º 12' 39,6'' N
148	599 500,00	270 600,00	15º 33' 48,2'' E	53º 12' 40,0'' N
149	599 500,00	270 800,00	15º 33' 58,7'' E	53º 12' 40,3'' N
150	599 500,00	271 000,00	15º 34' 09,5'' E	53º 12' 40,7'' N
151	599 500,00	271 200,00	15º 34' 20,3'' E	53º 12' 41,0'' N
152	599 500,00	271 400,00	15º 34' 31,1'' E	53º 12' 41,4'' N
153	599 500,00	271 600,00	15º 34' 41,9'' E	53º 12' 41,8'' N
154	599 500,00	271 800,00	15º 34' 52,7'' E	53º 12' 41,8'' N
155	599 500,00	272 000,00	15º 35' 03,5'' E	53º 12' 42,1'' N
156	599 500,00	272 200,00	15º 35' 14,3'' E	53º 12' 42,5'' N
157	599 500,00	272 400,00	15º 35' 25,1'' E	53º 12' 42,8'' N
158	599 300,00	268 800,00	15º 32' 11,8'' E	53º 12' 31,0'' N
159	599 300,00	269 000,00	15º 32' 22,6'' E	53º 12' 31,0'' N
160	599 300,00	269 200,00	15º 32' 33,4'' E	53º 12' 31,3'' N
161	599 300,00	269 400,00	15º 32' 44,2'' E	53º 12' 31,7'' N
162	599 300,00	269 600,00	15º 32' 55,0'' E	53º 12' 32,0'' N
163	599 300,00	269 800,00	15º 33' 05,4'' E	53º 12' 32,4'' N
164	599 300,00	270 000,00	15º 33' 16,2'' E	53º 12' 32,8'' N
165	599 300,00	270 200,00	15º 33' 27,0'' E	53º 12' 33,1'' N
166	599 300,00	270 400,00	15º 33' 37,8'' E	53º 12' 33,1'' N
167	599 300,00	270 600,00	15º 33' 48,6'' E	53º 12' 33,5'' N
168	599 300,00	270 800,00	15º 33' 59,4'' E	53º 12' 33,8'' N
169	599 300,00	271 000,00	15º 34' 10,2'' E	53º 12' 34,2'' N
170	599 300,00	271 200,00	15º 34' 21,0'' E	53º 12' 34,6'' N
171	599 300,00	271 400,00	15º 34' 31,8'' E	53º 12' 34,9'' N
172	599 300,00	271 600,00	15º 34' 42,6'' E	53º 12' 35,3'' N
173	599 300,00	271 800,00	15º 34' 53,0'' E	53º 12' 35,3'' N
174	599 300,00	272 000,00	15º 35' 03,8'' E	53º 12' 35,6'' N
175	599 300,00	272 200,00	15º 35' 14,6'' E	53º 12' 36,0'' N
176	599 300,00	272 400,00	15º 35' 25,4'' E	53º 12' 36,4'' N
177	599 100,00	269 000,00	15º 32' 22,9'' E	53º 12' 24,5'' N
178	599 100,00	269 200,00	15º 32' 33,7'' E	53º 12' 24,8'' N
179	599 100,00	269 400,00	15º 32' 44,5'' E	53º 12' 25,2'' N
180	599 100,00	269 600,00	15º 32' 55,3'' E	53º 12' 25,6'' N
181	599 100,00	269 800,00	15º 33' 06,1'' E	53º 12' 25,9'' N
182	599 100,00	270 000,00	15º 33' 16,9'' E	53º 12' 26,3'' N
183	599 100,00	270 200,00	15º 33' 27,7'' E	53º 12' 26,6'' N

184	599 100,00	270 400,00	15º 33' 38,5'' E	53º 12' 26,6'' N
185	599 100,00	270 600,00	15º 33' 49,0'' E	53º 12' 27,0'' N
186	599 100,00	270 800,00	15º 33' 59,8'' E	53º 12' 27,4'' N
187	599 100,00	271 000,00	15º 34' 10,6'' E	53º 12' 27,7'' N
188	599 100,00	271 200,00	15º 34' 21,4'' E	53º 12' 28,1'' N
189	599 100,00	271 400,00	15º 34' 32,2'' E	53º 12' 28,4'' N
190	599 100,00	271 600,00	15º 34' 43,0'' E	53º 12' 28,8'' N
191	599 100,00	271 800,00	15º 34' 53,8'' E	53º 12' 29,2'' N
192	599 100,00	272 000,00	15º 35' 04,6'' E	53º 12' 29,2'' N
193	599 100,00	272 200,00	15º 35' 15,4'' E	53º 12' 29,5'' N
194	599 100,00	272 400,00	15º 35' 26,2'' E	53º 12' 29,9'' N
195	598 900,00	269 400,00	15º 32' 45,2'' E	53º 12' 18,7'' N
196	598 900,00	269 600,00	15º 32' 55,7'' E	53º 12' 19,1'' N
197	598 900,00	269 800,00	15º 33' 06,5'' E	53º 12' 19,4'' N
198	598 900,00	270 000,00	15º 33' 17,3'' E	53º 12' 19,8'' N
199	598 900,00	270 200,00	15º 33' 28,1'' E	53º 12' 20,2'' N
200	598 900,00	270 400,00	15º 33' 38,9'' E	53º 12' 20,5'' N
201	598 900,00	270 600,00	15º 33' 49,7'' E	53º 12' 20,5'' N
202	598 900,00	270 800,00	15º 34' 00,5'' E	53º 12' 20,9'' N
203	598 900,00	271 000,00	15º 34' 11,3'' E	53º 12' 21,2'' N
204	598 900,00	271 200,00	15º 34' 22,1'' E	53º 12' 21,6'' N
205	598 900,00	271 400,00	15º 34' 32,5'' E	53º 12' 22,0'' N
206	598 900,00	271 600,00	15º 34' 43,3'' E	53º 12' 22,3'' N
207	598 900,00	271 800,00	15º 34' 54,1'' E	53º 12' 22,7'' N
208	598 900,00	272 000,00	15º 35' 04,9'' E	53º 12' 22,7'' N
209	598 900,00	272 200,00	15º 35' 15,7'' E	53º 12' 23,0'' N
210	598 900,00	272 400,00	15º 35' 26,5'' E	53º 12' 23,4'' N
211	598 700,00	269 800,00	15º 33' 07,2'' E	53º 12' 13,0'' N
212	598 700,00	270 000,00	15º 33' 18,0'' E	53º 12' 13,3'' N
213	598 700,00	270 200,00	15º 33' 28,8'' E	53º 12' 13,7'' N
214	598 700,00	270 400,00	15º 33' 39,2'' E	53º 12' 14,0'' N
215	598 700,00	270 600,00	15º 33' 50,0'' E	53º 12' 14,0'' N
216	598 700,00	270 800,00	15º 34' 00,8'' E	53º 12' 14,4'' N
217	598 700,00	271 000,00	15º 34' 11,6'' E	53º 12' 14,8'' N
218	598 700,00	271 200,00	15º 34' 22,4'' E	53º 12' 15,1'' N
219	598 700,00	271 400,00	15º 34' 33,2'' E	53º 12' 15,5'' N
220	598 700,00	271 600,00	15º 34' 44,0'' E	53º 12' 15,8'' N
221	598 700,00	271 800,00	15º 34' 54,8'' E	53º 12' 16,2'' N
222	598 700,00	272 000,00	15º 35' 05,6'' E	53º 12' 16,2'' N

223	598 700,00	272 200,00	15º 35' 16,4'' E	53º 12' 16,6'' N
224	598 500,00	270 600,00	15º 33' 50,8'' E	53º 12' 07,9'' N
225	598 500,00	270 800,00	15º 34' 01,6'' E	53º 12' 07,9'' N
226	598 500,00	271 000,00	15º 34' 12,4'' E	53º 12' 08,3'' N
227	598 500,00	271 200,00	15º 34' 22,8'' E	53º 12' 08,6'' N
228	598 500,00	271 400,00	15º 34' 33,6'' E	53º 12' 09,0'' N
229	598 500,00	271 600,00	15º 34' 44,4'' E	53º 12' 09,4'' N

Tab. 1.1.18_14 Lokalizacja punktów do badań zmian sezonowych stężenia CO_2 na składowisku na strukturze Suliszewo

Punkt pomiarowy	Współrzędne topograficzne (1992)		Współrzędne geograficzne (WGS84)	
	X_1992	Y_1992	Długość	Szerokość
1	601 100,00	269 400,00	15º 32' 39,5'' E	53º 13' 30,0'' N
2	601 100,00	269 800,00	15º 33' 00,7'' E	53º 13' 30,4'' N
3	601 100,00	270 200,00	15º 33' 22,3'' E	53º 13' 31,1'' N
4	601 100,00	270 600,00	15º 33' 43,9'' E	53º 13' 31,8'' N
5	601 100,00	271 000,00	15º 34' 05,5'' E	53º 13' 32,5'' N
6	600 700,00	268 600,00	15º 31' 57,4'' E	53º 13' 15,6'' N
7	600 700,00	269 000,00	15º 32' 19,0'' E	53º 13' 16,3'' N
8	600 700,00	269 400,00	15º 32' 40,2'' E	53º 13' 17,0'' N
9	600 700,00	269 800,00	15º 33' 01,8'' E	53º 13' 17,8'' N
10	600 700,00	270 200,00	15º 33' 23,4'' E	53º 13' 18,1'' N
11	600 700,00	270 600,00	15º 33' 45,0'' E	53º 13' 18,8'' N
12	600 700,00	271 000,00	15º 34' 06,6'' E	53º 13' 19,6'' N
13	600 700,00	271 400,00	15º 34' 28,2'' E	53º 13' 19,9'' N
14	600 700,00	271 800,00	15º 34' 49,4'' E	53º 13' 20,6'' N
15	600 300,00	268 600,00	15º 31' 58,4'' E	53º 13' 02,6'' N
16	600 300,00	269 000,00	15º 32' 20,0'' E	53º 13' 03,4'' N
17	600 300,00	269 400,00	15º 32' 41,3'' E	53º 13' 04,1'' N
18	600 300,00	269 800,00	15º 33' 02,9'' E	53º 13' 04,8'' N
19	600 300,00	270 200,00	15º 33' 24,5'' E	53º 13' 05,2'' N
20	600 300,00	270 600,00	15º 33' 46,1'' E	53º 13' 05,9'' N
21	600 300,00	271 000,00	15º 34' 07,7'' E	53º 13' 06,6'' N
22	600 300,00	271 400,00	15º 34' 28,9'' E	53º 13' 07,3'' N
23	600 300,00	271 800,00	15º 34' 50,5'' E	53º 13' 07,7'' N
24	599 900,00	268 600,00	15º 31' 59,5'' E	53º 12' 49,7'' N
25	599 900,00	269 000,00	15º 32' 20,8'' E	53º 12' 50,4'' N

26	599 900,00	269 400,00	15º 32' 42,4'' E	53º 12' 51,1'' N
27	599 900,00	269 800,00	15º 33' 04,0'' E	53º 12' 51,8'' N
28	599 900,00	270 200,00	15º 33' 25,6'' E	53º 12' 52,2'' N
29	599 900,00	270 600,00	15º 33' 47,2'' E	53º 12' 52,9'' N
30	599 900,00	271 000,00	15º 34' 08,8'' E	53º 12' 53,6'' N
31	599 900,00	271 400,00	15º 34' 30,0'' E	53º 12' 54,4'' N
32	599 900,00	271 800,00	15º 34' 51,6'' E	53º 12' 54,7'' N
33	599 900,00	272 200,00	15º 35' 13,2'' E	53º 12' 55,4'' N
34	599 500,00	268 600,00	15º 32' 00,6'' E	53º 12' 37,1'' N
35	599 500,00	269 000,00	15º 32' 21,8'' E	53º 12' 37,4'' N
36	599 500,00	269 400,00	15º 32' 43,4'' E	53º 12' 38,2'' N
37	599 500,00	269 800,00	15º 33' 05,0'' E	53º 12' 38,9'' N
38	599 500,00	270 200,00	15º 33' 26,6'' E	53º 12' 39,6'' N
39	599 500,00	270 600,00	15º 33' 48,2'' E	53º 12' 40,0'' N
40	599 500,00	271 000,00	15º 34' 09,5'' E	53º 12' 40,7'' N
41	599 500,00	271 400,00	15º 34' 31,1'' E	53º 12' 41,4'' N
42	599 500,00	271 800,00	15º 34' 52,7'' E	53º 12' 41,8'' N
43	599 500,00	272 200,00	15º 35' 14,3'' E	53º 12' 42,5'' N
44	599 100,00	269 000,00	15º 32' 22,9'' E	53º 12' 24,5'' N
45	599 100,00	269 400,00	15º 32' 44,5'' E	53º 12' 25,2'' N
46	599 100,00	269 800,00	15º 33' 06,1'' E	53º 12' 25,9'' N
47	599 100,00	270 200,00	15º 33' 27,7'' E	53º 12' 26,6'' N
48	599 100,00	270 600,00	15º 33' 49,0'' E	53º 12' 27,0'' N
49	599 100,00	271 000,00	15º 34' 10,6'' E	53º 12' 27,7'' N
50	599 100,00	271 400,00	15º 34' 32,2'' E	53º 12' 28,4'' N
51	599 100,00	271 800,00	15º 34' 53,8'' E	53º 12' 29,2'' N
52	599 100,00	272 200,00	15º 35' 15,4'' E	53º 12' 29,5'' N
53	598 700,00	269 800,00	15º 33' 07,2'' E	53º 12' 13,0'' N
54	598 700,00	270 200,00	15º 33' 28,8'' E	53º 12' 13,7'' N
55	598 700,00	270 600,00	15º 33' 50,0'' E	53º 12' 14,0'' N
56	598 700,00	271 000,00	15º 34' 11,6'' E	53º 12' 14,8'' N
57	598 700,00	271 400,00	15º 34' 33,2'' E	53º 12' 15,5'' N
58	598 700,00	271 800,00	15º 34' 54,8'' E	53º 12' 16,2'' N
59	598 700,00	272 200,00	15º 35' 16,4'' E	53º 12' 16,6'' N

Tab. 1.1.18_15 Lokalizacja punktów ciągłego pomiaru stężenia CO_2 w powietrzu podglebowym wokół otworów na składowisku na strukturze Suliszewo

Punkt pomiarowy	Współrzędne topograficzne (1992)		Współrzędne geograficzne (WGS84)	
	X_1992	Y_1992	Długość	Szerokość
I	268 930,00	600 325,00	15º 32' 16,0'' E	53º 13' 04,1'' N
II	268 886,00	600 233,00	15º 32' 13,9'' E	53º 13' 01,1'' N
III	268 970,00	600 233,00	15º 32' 18,5'' E	53º 13' 01,2'' N

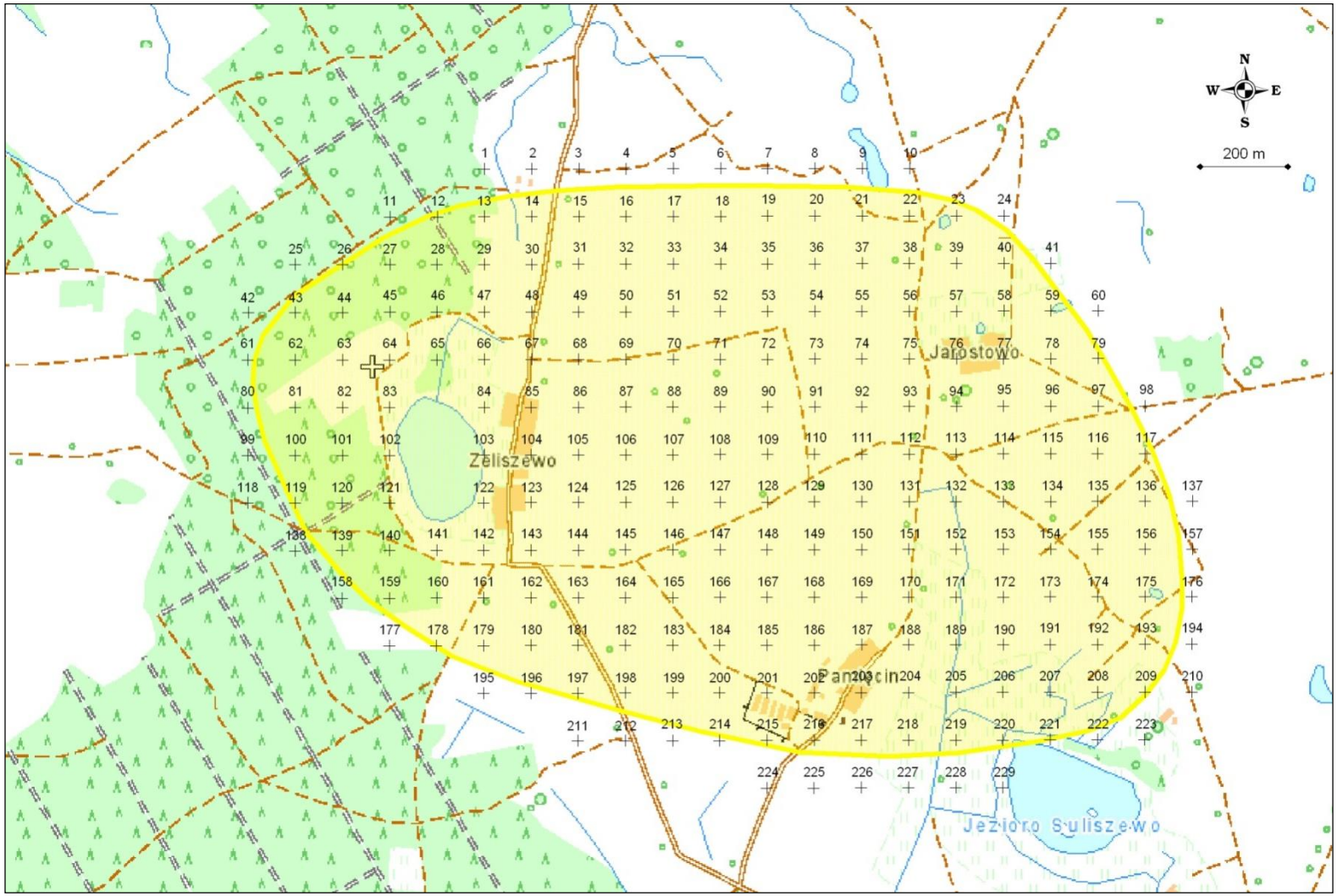


Fig. 1.1.18_67 Lokalizacja punktów pomiarowych zdjęcia geochemicznego stężenia CO_2 w powietrzu podglebowym na składowisku na strukturze Suliszewo

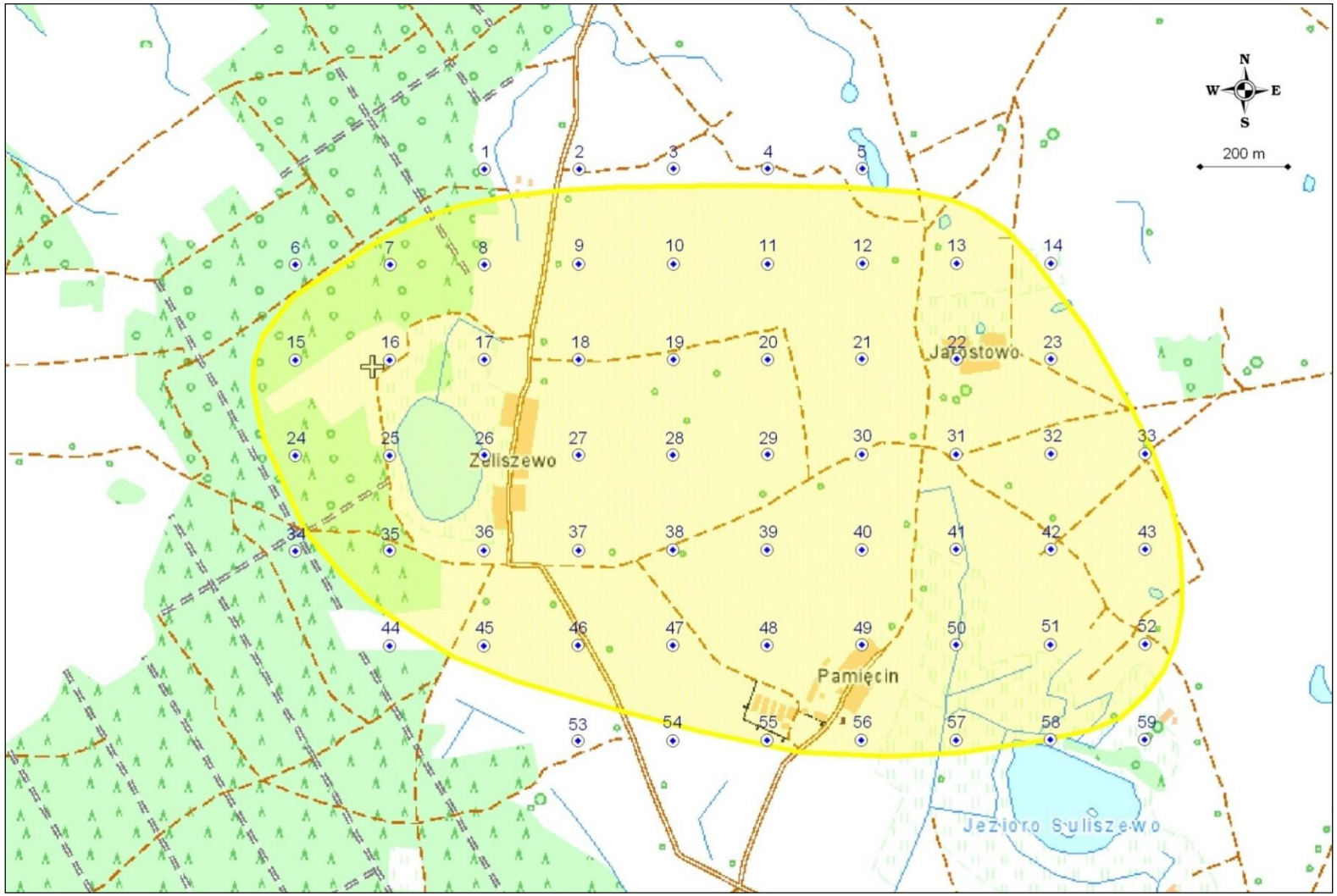


Fig. 1.1.18_68 Lokalizacja punktów do badań zmian sezonowych stężenia CO_2 na składowisku na strukturze Suliszewo

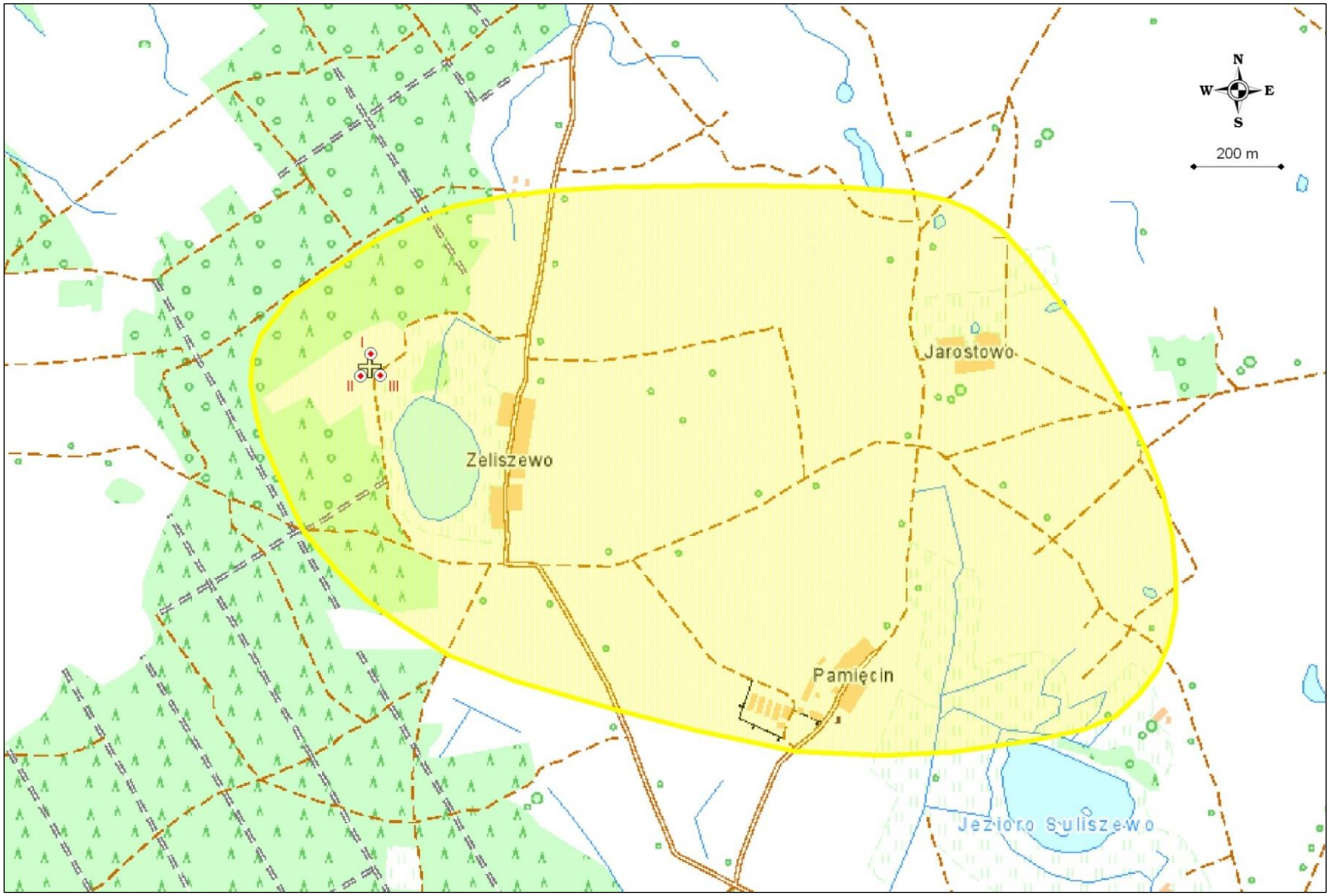


Fig. 1.1.18_69 Lokalizacja punktów ciągłego pomiaru stężenia CO_2 w powietrzu podglebowym wokół otworów na składowisku na strukturze Suliszewo

Metodyka pomiarów strumienia CO_2

Pomiary naturalnego strumienia dwutlenku węgla prowadzi się przy wykorzystaniu zamkniętej komory. Strumień dwutlenku węgla mierzy się przy wykorzystaniu systemu pomiarowego złożonego z jednostki pomiarowej i jednej lub kilku komór pomiarowych oraz komputera (palmtopa) rejestrującego wyniki. System ten oprócz pomiarów strumienia dwutlenku węgla powinien mierzyć temperaturę gleby. Gotowe systemy pomiarowe tego rodzaju są produkowane np. przez firmę LI-COR Inc. umożliwiają one pomiary strumienia dwutlenku węgla jednorazowe i długoterminowe.

System pomiarowy strumienia naturalnego dwutlenku węgla może być również wykonany w oparciu o miernik wielogazowy z czujnikami na podczerwień (**Fig. 1.1.18_70**).

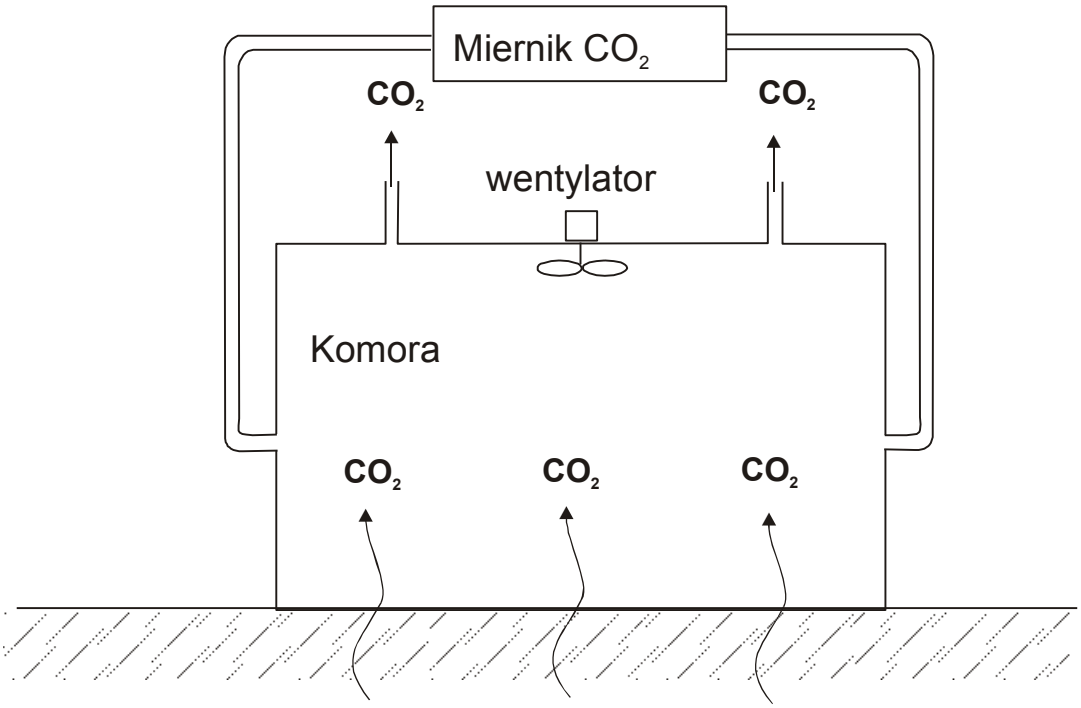


Fig. 1.1.18_70 Schemat komory do pomiaru strumienia dwutlenku węgla(Źródło: Żak i in., 2008)

W planowaniu lokalizacji punktów pomiarowych strumienia dwutlenku węgla powinno się brać pod uwagę budowę geologiczną (litologię, tektonikę i warunki hydrogeologiczne), morfologię, hydrografię i zabudowę terenu.

Badania strumienia dwutlenku węgla powinny być wykonane na obszarze oddziaływania zatłaczanego gazu, na tym samym terenie gdzie będą wykonywane pomiary stężenia dwutlenku węgla. Planowane punkty pomiarowe strumienia CO_2 (13 szt.) będą rozmieszczone w siatce podstawowej o rozmiarach około 400 x 400 m (**Tab. 1.1.18_16, Fig. 1.1.18_71**).

Tab. 1.1.18_16 Lokalizacja punktów pomiarowych strumienia CO_2 oraz poboru próbek do badań biomonitoringu na składowisku na strukturze Suliszewo

Punkt pomiarowy	Współrzędne topograficzne (1992)		Współrzędne geograficzne (WGS84)	
	X_1992	Y_1992	Długość	Szerokość
1	601 100,00	269 400,00	15º 32' 39,5'' E	53º 13' 30,0'' N
2	601 100,00	269 800,00	15º 33' 00,7'' E	53º 13' 30,4'' N
3	601 100,00	270 200,00	15º 33' 22,3'' E	53º 13' 31,1'' N
4	601 100,00	270 600,00	15º 33' 43,9'' E	53º 13' 31,8'' N
5	601 100,00	271 000,00	15º 34' 05,5'' E	53º 13' 32,5'' N
6	600 700,00	268 600,00	15º 31' 57,4'' E	53º 13' 15,6'' N
7	600 700,00	269 000,00	15º 32' 19,0'' E	53º 13' 16,3'' N
8	600 700,00	269 400,00	15º 32' 40,2'' E	53º 13' 17,0'' N
9	600 700,00	269 800,00	15º 33' 01,8'' E	53º 13' 17,8'' N
10	600 700,00	270 200,00	15º 33' 23,4'' E	53º 13' 18,1'' N
11	600 700,00	270 600,00	15º 33' 45,0'' E	53º 13' 18,8'' N
12	600 700,00	271 000,00	15º 34' 06,6'' E	53º 13' 19,6'' N
13	600 700,00	271 400,00	15º 34' 28,2'' E	53º 13' 19,9'' N
14	600 700,00	271 800,00	15º 34' 49,4'' E	53º 13' 20,6'' N
15	600 300,00	268 600,00	15º 31' 58,4'' E	53º 13' 02,6'' N
16	600 300,00	269 000,00	15º 32' 20,0'' E	53º 13' 03,4'' N
17	600 300,00	269 400,00	15º 32' 41,3'' E	53º 13' 04,1'' N
18	600 300,00	269 800,00	15º 33' 02,9'' E	53º 13' 04,8'' N
19	600 300,00	270 200,00	15º 33' 24,5'' E	53º 13' 05,2'' N
20	600 300,00	270 600,00	15º 33' 46,1'' E	53º 13' 05,9'' N
21	600 300,00	271 000,00	15º 34' 07,7'' E	53º 13' 06,6'' N
22	600 300,00	271 400,00	15º 34' 28,9'' E	53º 13' 07,3'' N
23	600 300,00	271 800,00	15º 34' 50,5'' E	53º 13' 07,7'' N
24	599 900,00	268 600,00	15º 31' 59,5'' E	53º 12' 49,7'' N
25	599 900,00	269 000,00	15º 32' 20,8'' E	53º 12' 50,4'' N
26	599 900,00	269 400,00	15º 32' 42,4'' E	53º 12' 51,1'' N
27	599 900,00	269 800,00	15º 33' 04,0'' E	53º 12' 51,8'' N
28	599 900,00	270 200,00	15º 33' 25,6'' E	53º 12' 52,2'' N
29	599 900,00	270 600,00	15º 33' 47,2'' E	53º 12' 52,9'' N
30	599 900,00	271 000,00	15º 34' 08,8'' E	53º 12' 53,6'' N
31	599 900,00	271 400,00	15º 34' 30,0'' E	53º 12' 54,4'' N
32	599 900,00	271 800,00	15º 34' 51,6'' E	53º 12' 54,7'' N
33	599 900,00	272 200,00	15º 35' 13,2'' E	53º 12' 55,4'' N
34	599 500,00	268 600,00	15º 32' 00,6'' E	53º 12' 37,1'' N

35	599 500,00	269 000,00	15º 32' 21,8'' E	53º 12' 37,4'' N
36	599 500,00	269 400,00	15º 32' 43,4'' E	53º 12' 38,2'' N
37	599 500,00	269 800,00	15º 33' 05,0'' E	53º 12' 38,9'' N
38	599 500,00	270 200,00	15º 33' 26,6'' E	53º 12' 39,6'' N
39	599 500,00	270 600,00	15º 33' 48,2'' E	53º 12' 40,0'' N
40	599 500,00	271 000,00	15º 34' 09,5'' E	53º 12' 40,7'' N
41	599 500,00	271 400,00	15º 34' 31,1'' E	53º 12' 41,4'' N
42	599 500,00	271 800,00	15º 34' 52,7'' E	53º 12' 41,8'' N
43	599 500,00	272 200,00	15º 35' 14,3'' E	53º 12' 42,5'' N
44	599 100,00	269 000,00	15º 32' 22,9'' E	53º 12' 24,5'' N
45	599 100,00	269 400,00	15º 32' 44,5'' E	53º 12' 25,2'' N
46	599 100,00	269 800,00	15º 33' 06,1'' E	53º 12' 25,9'' N
47	599 100,00	270 200,00	15º 33' 27,7'' E	53º 12' 26,6'' N
48	599 100,00	270 600,00	15º 33' 49,0'' E	53º 12' 27,0'' N
49	599 100,00	271 000,00	15º 34' 10,6'' E	53º 12' 27,7'' N
50	599 100,00	271 400,00	15º 34' 32,2'' E	53º 12' 28,4'' N
51	599 100,00	271 800,00	15º 34' 53,8'' E	53º 12' 29,2'' N
52	599 100,00	272 200,00	15º 35' 15,4'' E	53º 12' 29,5'' N
53	598 700,00	269 800,00	15º 33' 07,2'' E	53º 12' 13,0'' N
54	598 700,00	270 200,00	15º 33' 28,8'' E	53º 12' 13,7'' N
55	598 700,00	270 600,00	15º 33' 50,0'' E	53º 12' 14,0'' N
56	598 700,00	271 000,00	15º 34' 11,6'' E	53º 12' 14,8'' N
57	598 700,00	271 400,00	15º 34' 33,2'' E	53º 12' 15,5'' N
58	598 700,00	271 800,00	15º 34' 54,8'' E	53º 12' 16,2'' N
59	598 700,00	272 200,00	15º 35' 16,4'' E	53º 12' 16,6'' N

Przy otworze zatłaczającym badania powinny być wykonywane w dodatkowych punktach pomiarowych. Na obszarze tym przewidziano punkty pomiarowe w siatce (25x25 m) wokół otworów. Ich lokalizację, po weryfikacji na podstawie prac terenowych, należy przedstawić na mapie topograficznej w skali 1:1000.

W każdym punkcie pomiary strumienia CO_2 powinny być wykonywane przez około 10 minut przy wykorzystaniu systemu automatycznego pomiaru LI-8100.

Wokół otworów można również prowadzić ciągły pomiar strumienia dwutlenku węgla przy wykorzystaniu systemu ciągłego pomiaru firmy LI-COR Inc.

Lokalizację punktów pomiarowych powinno się ustalić w terenie za pomocą urządzeń nawigacji satelitarnej GPS. Część punktów pomiarowych ze względu na występowanie trwałej nawierzchni, przeszkód terenowych może być przesunięte o niewielką odległość w stosunku do planowanej.

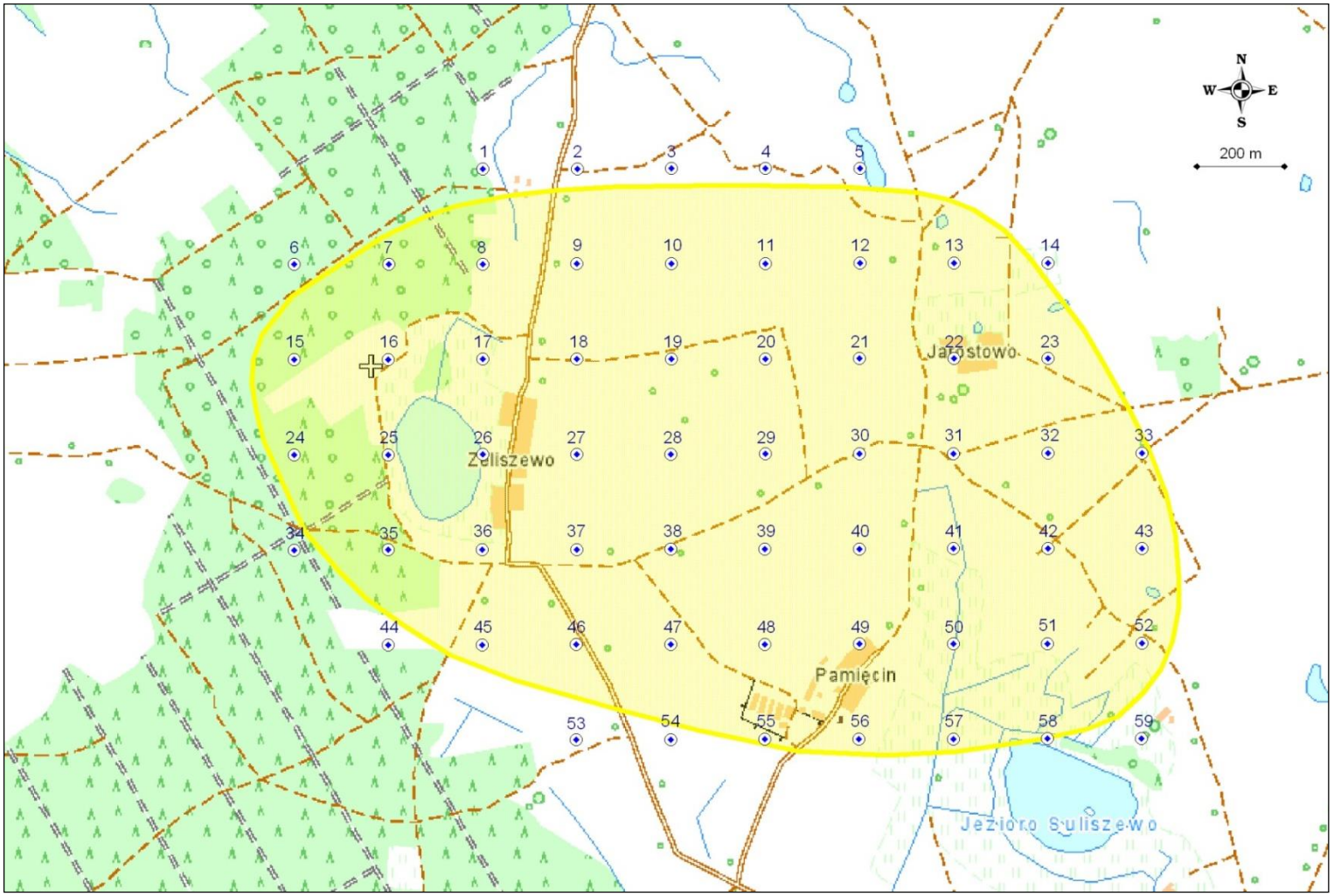


Fig. 1.1.18_71 Lokalizacja punktów pomiarowych strumienia powierzchniowego CO_2w powietrzu podglebowym i poboru próbek do badań biomonitoringu na składowisku w strukturze Suliszewo

Harmonogram pomiarów

Badania zawartości dwutlenku węgla w powietrzu podglebowym będą prowadzone w trakcie głównych etapów projektu: monitorowanie poziomu odniesienia, w czasie eksploatacji i po zamknięciu składowiska (**Tab. 1.1.18_17**).

Tab. 1.1.18_17 Harmonogram pomiarów zawartości CO_2 w powietrzu podglebowym, strumienia i biomonitoringu na składowisku na strukturze Suliszewo

Metoda badań		**Poziom odniesienia**	**Eksploatacja składowiska**	**Po zamknięciu składowiska**
Pomiar stężenia CO_2	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_2	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

<u>Harmonogram pomiarów stężenia CO_2 w powietrzu podglebowym</u>

W ramach monitorowania poziomu odniesienia dla składowiska z obszaru proponuje się wykonanie następujących badań:

- szczegółowe zdjęcie geochemiczne stężenia dwutlenku węgla na terenie składowiska – 4 razy w roku,

- powierzchniowe badania geochemiczne stężenia dwutlenku węgla w pobliżu otworu zatłaczającego – 4 razy w roku,

- sezonowe powierzchniowe badania geochemiczne stężenia dwutlenku węgla na terenie składowiska – 8 razy w roku (dwukrotnie w sezonach wiosennym, letnim, jesiennym i zimowym),

- badania geochemiczne rozkładu stężeń CO_2 do głębokości 5 m w wybranych punktach – 2 razy w roku (sezon ciepły i chłodny),

- ciągłe pomiary stężenia CO_2 w powietrzu glebowym w zastabilizowanych punktach pomiarowych.

W trakcie eksploatacji składowiska CO_2 proponuje się wykonanie następujących badań geochemicznych stężenia dwutlenku węgla:

- szczegółowe zdjęcie geochemiczne stężenia dwutlenku węgla na terenie składowiska – 2 razy w roku (sezon ciepły i chłodny),

- powierzchniowe badania geochemiczne stężenia dwutlenku węgla w pobliżu otworu zatłaczającego – 4 razy w roku,

- ciągłe pomiary stężenia CO_2 w powietrzu podglebowym w zastabilizowanych punktach pomiarowych.

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

- powierzchniowe badania geochemiczne stężenia dwutlenku węgla w pobliżu otworu zatłaczającego – 2 razy w roku (sezon ciepły i chłodny),

- ciągłe pomiary stężenia CO_2 w powietrzu podglebowym w zastabilizowanych punktach pomiarowych.

<u>Harmonogram pomiarów strumienia CO_2</u>

Pomiar strumienia dwutlenku węgla należy przeprowadzić w trakcie wszystkich głównych etapów projektu: monitorowanie poziomu odniesienia, w czasie eksploatacji i po zamknięciu.

W ramach monitorowania poziomu odniesienia dla składowiska w strukturze Suliszewo proponuje się wykonanie następujących badań strumienia dwutlenku węgla:

- badania tła strumienia dwutlenku węgla w siatce podstawowej na terenie składowiska; 4 razy w roku,

- badania tła strumienia dwutlenku węgla w pobliżu otworu zatłaczającego; 4 razy w roku,

- ciągłe pomiary strumienia dwutlenku węgla w pobliżu otworów.

W trakcie eksploatacji składowiska na w strukturze Suliszewo proponuje się wykonanie następujących badań strumienia dwutlenku węgla:

- badania strumienia dwutlenku węgla w siatce podstawowej na terenie składowiska; 2 razy w roku (sezon ciepły i zimny),

- badania strumienia dwutlenku węgla w pobliżu otworu zatłaczającego; 4 razy w roku,

- ciągłe pomiary strumienia dwutlenku węgla w pobliżu otworów.

Po zamknięciu składowiska w strukturze Suliszewo proponowane są następujące badania strumienia dwutlenku węgla:

badania tła strumienia dwutlenku węgla w pobliżu otworu zatłaczającego – 4 razy w roku,

ciągłe pomiary strumienia dwutlenku węgla w pobliżu otworów.

Program biomonitoringu dla składowiska na strukturze Suliszewo

Biomonitoring oparty będzie na badaniu zmian ilościowych wskaźnikowych mikroorganizmów i procesów życiowych będących wynikiem zmiany podaży dwutlenku węgla w środowisku glebowym wywołanej wyciekiem tego gazu z podziemnego składowiska.

Próby gruntowe pobierane z terenu składowiska CO_2 stanowią materiał do badań mikrobiologicznych wykonywanych w ramach prac monitoringowych. Przy poborze próbek należy uwzględnić odpowiednią lokalizację punktów i głębokość poboru oraz zachowanie jałowości 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, dostępności poszczególnych punktów poboru próbek), lokalizacji otworu zatłaczającego, geologii struktury, w tym prawdopodobnego przebiegu uskoków.

W celu uzyskania pełnej informacji o mikroflorze występującej na danym terenie, w środowisku gruntowym, próbki powinno się pobierać ze stałej głębokości (60-80 cm). Zróżnicowanie mikroflory w zależności od głębokości bytowania jest znaczne, gdyż 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.

Metodyka i harmonogram badań biomonitoringu

Proponuje się przeprowadzenie następujących prac w ramach biomonitoringu składowania dwutlenku węgla przed, w trakcie i po zatłaczaniu gazu:

- 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 prowadzić przez 2 lata lub do momentu rozpoczęcia eksploatacji składowiska dwutlenku węgla.

Monitoring mikrobiologiczny w czasie eksploatacji składowiska dwutlenku węgla i po jej zakończeniu prowadzić się będzie poprzez badania zmian ilościowych bakterii i procesów wskaźnikowych na obszarze składowiska. Badania mikroorganizmów wskaźnikowych należy prowadzić czterokrotnie w ciągu roku przez cały czas trwania zatłaczania dwutlenku węgla.

Pobór próbek będzie wykonany na obszarze całego składowiska w siatce o rozmiarach około 400 x 400 m (**Tab. 1.1.18_16, Fig. 1.1.18_71**). Próbki pobierane będą z głębokości 80 cm p.p.t. za pomocą świdra ręcznego z zachowaniem czystości mikrobiologicznej. Przewiduje się również pobór próbek w pobliżu otworu zatłaczającego i obserwacyjnych.

Program monitoringu (grawimetrycznego, elektromagnetycznego, elektrooporowego oraz sejsmiki 2D) stanu początkowego oraz w trakcie i po zakończeniu zatłaczania CO_2 dla obiektu Choszczno-Suliszewo (PBG & PIG-PIB)

(Marek Wojdyła, Zdzisław Żuk, Grzegorz Pacanowski, Cezary Ostrowski, Tomasz Bąk)

(Grzegorz Wróbel, Adam Wójcicki)

Monitoring metodą grawimetryczną

Z przeprowadzonego oszacowania zdolności geologicznego składowania dwutlenku węgla (Wójcicki, 2005; Christensen, 2007) wynika, że największy potencjał umożliwiający sekwestrację dwutlenku węgla z dużych zakładów przemysłowych posiadają głębokie solankowe poziomy wodonośne. Dla stwierdzenie ich przydatności do długotrwałego uwięzienia dwutlenku węgla niezbędne jest dokładne rozpoznanie, a następnie, ze względu na w dużej mierze pionierski charakter geologicznej sekwestracji CO2, rozważny wybór właściwego obiektu.

Obszar badań jest pokryty w całości półszczegółowym zdjęciem grawimetrycznym wykonanym w ramach szeregu opracowań w latach 1957-1980 przez Przedsiębiorstwo Poszukiwań Geofizycznych (obecnie PBG Sp. z o.o.). Średnie zagęszczenie zdjęcia wynosi 2 pkt/km2, a dokładność waha się w granicach ±0,044 - ±0,055 mGal. (2,3). W nawiązaniu do wyników zdjęcia półszczegółowego wykonano w latach 1977-1980, na zlecenie PIG-PIB, szczegółowe, profilowe zdjęcie grawimetryczne: Dokumentacja szczegółowych profilowych badań grawimetrycznych, temat: Goleniów – Stargard Szczeciński – Choszczno – Krzyż. Reczek J. Smrek A. 1977-1980: (11) Profile o przebiegu NE-SW oddalone były od siebie o ok. 6 km, a w wybranych rejonach o ok. 2 km. Punkty na profilach usytuowano co 50 i 100 m. Dokładność pomiarów siły ciężkości tego zdjęcia wynosi +/- 0.029 mGal, a dokładność wyznaczenia anomalii siły ciężkości wynosi +/- 0.047 mGal. W latach 1980-1991 PPG, (PBG Sp. z o.o.) wykonało szereg dokumentacji kompleksowych z zastosowaniem metod: grawimetrycznej, sejsmicznej i geoelektrycznej celem opracowania metodyki poszukiwań złóż węgli brunatnych w obrębie ujemnych anomalii grawimetrycznych. W rejonie na NE od struktury Choszczna przebadano obiekt Giżyno (14), na którym wykonano 300 pomiarów grawimetrycznych na 4 profilach z krokiem 40-50m i z dokładnością +/-0.013 mGal. Po wstępnym rozpoznaniu obiekt ten uznano za nieperspektywiczny.

Zgromadzone wówczas materiały znajdują się w banku danych grawimetrycznych. Wprawdzie służyły one do opracowywania map grawimetrycznych i modelowań gęstościowych 2D, ale należy pamiętać, że dokładność wyników interpretacji jest pochodną jakości materiałów źródłowych, które często nie odpowiadają stawianym obecnie wymogom. Dotyczy to stosowanego wcześniej podkładu topograficznego, braku poprawki topograficznej, używania przyrządów o małej dokładności, prostych metod interpretacji. Z konieczności istniejące dane służyły dotychczas do różnego rodzaju analiz zaburzeń pola siły ciężkości. Na podstawie tych materiałów opracowana została i do tej pory obowiązuje podstawowa mapa grawimetryczna anomalii siły ciężkości w redukcji Bouguera. Przy jej konstruowaniu przyjęto m.in. niestosowane od szeregu lat wartości siły ciężkości w systemie poczdamskim, wartości pola normalnego wg algorytmu Helmerta i współrzędne niestosowanego od lat układu Borowa Góra.

Bardzo złożona budowa geologiczna badanego terenu wskazuje na różnorodną genezę anomalii grawimetrycznych. Możliwymi źródłami zaburzeń pola grawitacyjnego są:

- ukształtowanie powierzchni stropowej utworów podtrzeciorzędowych
- zmiany miąższości w obrębia wapienia muszlowego i retu
- zmiany miąższości i wykształcenia facjalnego utworów cechsztynu
- zaburzenia tektoniczne w obrębie kompleksu permomezozoicznego
- ukształtowanie powierzchni stropowej paleozoiku i podłoża krystalicznego

CEL I ZAKRES BADAŃ

Zadaniem prac będzie uszczegółowienie obrazu grawimetrycznego wywołanego budową strukturalną rejonu w zasięgu struktury Choszczno-Sulmierzyce. Prace grawimetryczne są częścią szerokiego przedsięwzięcia, którego cel sprowadza się do dokładniejszego rozpoznania kompleksów geologicznych do głębokości około 2000 m, co w połączeniu z wynikami projektowanych prac geologicznych oraz badań innymi metodami geofizycznymi, przybliży rozwiązanie problemów związanych z przewidywaną geologiczną sekwestracją CO2.

Zadania stawiane przed grawimetrią w zakresie prac terenowych obejmują:

- wykonanie zdjęcia o wysokiej dokładności pomiarów polowych na stanowiskach pomiarowych oddalonych od siebie o 150-250 m, przy użyciu przyrządów pomiarowych najnowszej generacji, lub
- stosowanie systemu punktów profilowych przy wzajemnych odległościach co 200 m wzdłuż linii planowanych pomiarów sejsmicznych, oraz systemu punktów rozproszonych pomiędzy profilami i w ich otoczeniu – punkty rozproszone przy odległościach względem siebie jak poprzednio 150-250 m.

W obu przypadkach zagęszczenie stanowisk pomiarowych wyniesie około 25 pkt/1 km2.

W dalszych etapach prac prowadzonych w ramach monitoringu grawimetrycznego, należy zwiększyć ilość stanowisk pomiarowych do 200-400/1 km2 w rejonach otworów służących do zatłaczania składowanego medium.

W ramach przetwarzania danych polowych i prac dokumentujących opracowane zostaną:

- katalog anomalii siły ciężkości w redukcji P. Bouguera,
- mapa anomalii Bouguera – podstawowa mapa grawimetryczna,
- ewentualnie inne mapy anomalii grawimetrycznych według zapotrzebowania.

Interpretacja materiałów grawimetrycznych dostarczy nowych informacji o budowie strukturalnej oraz tektonice w obrębie utworów permu i triasu jako perspektywicznych z punktu widzenia pozyskania bituminów, a także dla śledzenia morfologii stropu utworów podpermskich.

W ramach monitoringu grawimetrycznego planowane są cykliczne pomiary w odstępach kilkuletnich. Umożliwią one rozpoznanie dynamiki zmian zachodzących w rozkładzie masy utworów wokół składowisk dwutlenku węgla i w ich nadkładzie. Przedmiotem analizy będą różnicowe anomalie siły ciężkości w redukcji Bouguera (potocznie nazywane anomaliami pomierzonymi). Projekt powinien zakładać przeprowadzanie pomiarów monitorujących przez cały okres eksploatacji składowiska CO2 oraz po zakończeniu, a wówczas proponowane są prace w takim samym zakresie, przy zachowaniu metodyki, lokalizacji i ilości pomiarów jak w ramach monitoring stanu początkowego. Pierwszy monitoring w trakcie eksploatacji powinien zostać przeprowadzony po 2 latach od rozpoczęcia zatłaczania, a potem co 3-4 lata. Po zakończeniu zatłaczania należy wykonywać ten sam zakres pomiarów co 5 lat.

Projektowane zdjęcie grawimetryczne dla struktury Choszczno obejmie obszar o powierzchni około 195 km2, a dla struktury Suliszewo ok. 289 km2. Łączna powierzchnia to 484 km2. Przy średnim zagęszczeniu punktów pomiarowych wynoszącym 25 pkt/1 km2 planowane jest założenie i wykonanie pomiarów na 12 100 punktach grawimetrycznych.

Obszar prac położony jest w obrębie następujących arkuszy map w skali 1 : 50 000 w układzie 92:

N-33-103B, N-33-103C, N-33-104A, N-33-104C.

Polowe prace geodezyjne

- założenie 12100 grawimetrycznych punktów pomiarowych: rozproszonych przy odległościach między punktami 150-250 m, oraz profilowych wzdłuż linii sejsmicznych przy kroku pomiarowym 200 m,
- określenie wysokości h dla 12100 punktów pomiarowych (niwelacja) z powtórzeniem pomiarów na ok. 5 % stanowisk. Średni błąd kwadratowy niwelacji nie powinien przekroczyć ±0,05 m. Niwelację należy dowiązać 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 5º (dla określenia poprawki topograficznej),
- lokalizacja punktów pomiarowych wg mapy topograficznej w skali 1:25 000 lub 1:10 000.

Pomiary grawimetryczne

- uzupełnienie istniejącej sieci grawimetrycznej o 3-4 punkty podstawowe przez wykonanie pomiarów 6-9 przęseł łączących te punkty z punktami osnowy grawimetrycznej. Możliwe też jest założenie mniejszej lub większej ilości punktów sieci grawimetrycznej. O uzupełnieniu (lub jedynie

uaktualnieniu) sieci punktów podstawowych zadecyduje kierujący pracami polowymi po przeprowadzeniu wizji terenowej,

- wykonanie 13 000 pomiarów siły ciężkości na 12 100 stanowisk pomiarowych,
- wykonanie 900 nawiązawczych pomiarów siły ciężkości na stanowiskach bazowych (podstawowych), w tym także pomiary przęseł sieci podstawowej,
- 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 ±0,025 mGal.

Prace obliczeniowe i techniczne

- określenie dla każdego stanowiska pomiarowego współrzędnych x i y w układzie 1992 na podstawie pomiarów GPS,
- obliczenie dla wszystkich punktów pomiarowych wysokości h i wartości przyspieszenia siły ciężkości g,
- opracowanie modelu rzeźby terenu i obliczenie poprawki topograficznej w strefach do 20 km dla każdego punktu grawimetrycznego,
- obliczenie dla 12 100 punktów pomiarowych wartości anomalii siły ciężkości w redukcji Bouguera dla stałej i zmiennej gęstości utworów warstwy redukowanej,
- zestawienie katalogu punktów pomiarowych zawierającego:
- współrzędne x i y w układzie 1992 [km],
- wartości przyspieszenia siły ciężkości g [mGal] w systemie IGSN 71,
- wysokości h punktów [m] dla poziomu odniesienia Kronsztadt,
- wartości anomalii w redukcji Bouguera [mGal] dla stałych i zmiennej gęstości utworów warstwy redukowanej oraz dla elipsoidy GRS 80,
- wartości sumaryczne poprawki topograficznej siły ciężkości [mGal],
- sporządzenie operatu pomiarowego.

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

Zestawienie materiałów z prac terenowych i obliczeniowych

Dane grawimetryczne z pomiarów terenowych i prac obliczeniowych dla każdego punktu pomiarowego zestawione będą, jak wspomniano wyżej w postaci katalogu, stanowiącego bardzo istotną część dokumentacji z wykonanych prac. Punkty pomiarowe, którym dwukrotnie wyznaczono współrzędne, wysokość lub przyspieszenie siły ciężkości, będą posiadały w katalogu uśrednione wartości tych parametrów.

Materiały dokumentujące wykonanie pomiarów grawimetrycznych i związanych z nimi robót geodezyjnych oraz prac obliczeniowych zestawione będą w postaci operatu pomiarowego i złożone w archiwum wykonawcy prac. W skład operatu wejdą między innymi:

- mapy dokumentacyjne (topograficzne) w skali 1:25 000 (lub 1:10 000),
- dzienniki niwelacyjne,
- dzienniki pomiarów grawimetrycznych.

PRACE GRAWIMETRYCZNE W ASPEKCIE zapewnienia bezpieczeństwa powszechnego, bezpieczeństwa pracy i ochrony środowiska

Grawimetria należy do metod przyjaznych środowisku. Wykonanie pomiaru grawimetrycznego sprowadza się do dotarcia na zaplanowane miejsce i zarejestrowania przyspieszenia ziemskiego bez najmniejszej ingerencji w środowisko. W związku z tym wykluczone jest, aby projektowane badania w jakikolwiek sposób mogły wpłynąć niekorzystnie na grunty rolne, leśne lub szatę roślinną na terenie przewidywanych prac. Uwaga ta dotyczy również powietrza atmosferycznego jak i środowiska gruntowo-wodnego.

INTERPRETACJA DANYCH GRAWIMETRYCZNYCH

Do opracowania i wykreślenia map grawimetrycznych zastosowane będzie profesjonalne oprogramowanie: program SURFER firmy Golden Software Inc. oraz programy z pakietu OASIS montaj firmy Geosoft Inc. Wszystkie procedury w ramach sporządzania map wykonywane będą po zapisaniu danych początkowych w postaci siatek wyinterpolowanych wartości anomalii. W przypadku anomalii Bouguera zostaną utworzone, w zależności od potrzeb różne siatki interpolacyjne (siatki kwadratów). Mapy anomalii Bouguera będą opracowane na podstawie wartości anomalii wyliczonych dla gęstości stałej i/lub gęstości zmiennej (wg uzgodnień).

W ramach prac interpretacyjnych uzasadnione jest opracowanie następujących map grawimetrycznych:

- anomalii rezydualnych na podstawie filtracji częstotliwościowej lub według klasycznej metody Griffina dla zadanych głębokości planowanego rozpoznania,

- anomalii regionalnych przy zastosowaniu filtracji częstotliwościowej lub metody Griffina dla zobrazowania efektu grawitacyjnego pochodzącego od podłoża,

- gradientu poziomego i dekonwolucji Eulera dla rozpoznania elementów tektoniki i granic ciał wywołujących anomalie.

Wymienione wyżej mapy zostaną sporządzone po transformacjach rozkładu anomalii Bouguera. Metody przekształcania pomierzonego pola grawitacyjnego oraz parametry transformacji zostaną wybrane po analizie danych geologiczno-wiertniczych i ukierunkowane na rozpoznanie budowy strukturalnej w założonym interwale głębokości.

Uzyskane dane grawimetryczne powinny być dostosowane do późniejszej kompleksowej interpretacji geofizycznej ukierunkowanej na dalsze rozpoznanie litologii oraz struktury i tektoniki rejonu badań.

Zmiany czasowe anomalii Bouguera

Okresowe pomiary grawimetryczne w cyklu kilkuletnim, wykonywane w ramach tzw. monitoringu grawimetrycznego doprowadzą do uzyskania anomalii Bouguera (w tych samych punktach) dla kolejnych serii pomiarowych. Różnice anomalii pomiędzy seriami (tzw. anomalie różnicowe) będą obrazowały zmiany gęstości objętościowej zachodzące w utworach skalnych zalegających pod analizowanym profilem czy rejonem badań. Analizie poddane będą różnice wartości pomiędzy daną serią i pierwszą, a także pomiędzy kolejnymi seriami, co pozwoli ocenić dynamikę zmian rozkładu masy utworów skalnych w poszczególnych interwałach czasowych (Fajklewicz, 2007).

Forma udokumentowania wyników

Opracowanie końcowe będzie zwierało:

- część tekstową, w tym:

- opis techniki i metodyki prac pomiarowych,

- zakres wykonanych prac,

- opis metodyki przetwarzania danych i interpretacji,

- omówienie wyników i ich analizę,

- część graficzną w postaci opracowanych map grawimetrycznych - skala 1:50 000 (lub inna),

- część dokumentacyjną zapisaną na CD lub DVD, zawierającą:

- katalogi danych grawimetrycznych,

- podstawową mapę anomalii Bouguera.

Wszystkie zmiany zakresu prac interpretacyjnych i formy załączników będą uzgadniane na poszczególnych etapach prac z przedstawicielem Zamawiającego.

HARMONOGRAM ORAZ KOSZTORYS PRAC

Czas realizacji planowanych prac (w pierwszej serii i każdej następnej objętej monitoringiem) wyniesie 9-10 miesięcy. Poszczególne etapy wykonane będą w następujących terminach:

- przeprowadzenie pomiarów terenowych – 9 miesięcy,

- przetwarzanie danych – 2-3 miesiące,

- opracowanie i analiza wyników, sporządzenie dokumentacji – 3-4 miesiące.

Koszt jednostkowy wykonania pomiarów i opracowania danych dla jednego punktu pomiarowego wyniesie 160 zł netto. Dla 12 100 punktów łączny koszt to 1 936 000 zł.

UWAGI KOŃCOWE

Zleceniodawcy przysługuje prawo wprowadzania zmian do projektu, łącznie ze zmianą metodyki prac, w zależności od uzyskiwanych wyników, a także prawo przerwania prac terenowych, jeśli nie gwarantują uzyskania technicznie poprawnych rezultatów, pozwalających rozwiązać postawione zadanie.

Odpowiedzialność za właściwe i ekonomiczne wykorzystanie środków technicznych przeznaczonych na prace ponosi wykonawca.

W przypadku konieczności wprowadzenia zmian metodycznych w stosunku do określonych w projekcie lub też zmiany zakresu prac w wyniku nieprzewidzianych trudności terenowych, obowiązkiem wykonawcy jest wystąpić z odpowiednio umotywowanym wnioskiem do Zleceniodawcy o ich zmianę. Zmiany o których mowa, muszą być zaakceptowane przez Zleceniodawcę.

Monitoring metodą elektromagnetyczną

Prace geoelektryczne wykonane zostaną metodą magnetotelluryczną MT/AMT (w paśmie magnetotellurycznym – MT i audiomagnetotellurycznym – AMT), oraz metodą procesów przejściowych TDEM (Time - Domain Electromagnetic). Wykorzystana zostanie aparatura geoelektryczna serii system2000.net produkcji kanadyjskiej firmy Phoenix Geophysics Ltd. Projekt prac obejmuje wykonanie prac pomiarowych wraz z przetwarzaniem i interpretacją danych wzdłuż 5 profili o łącznej długości około 100 km.

Badania MT/AMT polegają w ogólnym ujęciu na rejestracji składowych naturalnego pola elektromagnetycznego na powierzchni Ziemi i obliczeniu na ich podstawie rozkładu oporności w ośrodku geologicznym a następnie interpretacji tego rozkładu tj. powiązaniu wydzielonych kompleksów geoelektrycznych z kompleksami geologicznymi. Wspólną cechą wyróżniającą grupę metod magnetotellurycznych jest charakterystyczna konfiguracja pola źródłowego. W założeniu jest to płaska fala elektromagnetyczna padająca z góry prostopadle do powierzchni Ziemi. Metody audiomagnetotelluryczna (AMT) i magnetotelluryczna (MT) wykorzystują źródła naturalne, czyli rezonansowe drgania jonosfery wzbudzone przez zmienne natężenie wiatru słonecznego oraz odległe wyładowania atmosferyczne w strefie okołorównikowej.

Metoda procesów przejściowych TDEM (zwana też TEM – Transient Electromagnetic) podobnie jak CSAMT wykorzystuje sztucznie wygenerowane pole elektromagnetyczne. Penetrację ośrodka geologicznego umożliwia wykorzystanie zjawiska indukcji elektromagnetycznej. Zmienne w czasie pole magnetyczne jest wytwarzane na powierzchni ziemi przy użyciu pętli (loop), czyli przewodnika odpowiednio ukształtowanego umieszczonego na powierzchni ziemi. Pole elektromagnetyczne źródeł impulsowych w tzw. strefie bliskiej nie zależy od odległości nadajnik odbiornik, dlatego pomiary może realizować pętla odbiorcza w pętli nadawczej, co daje przewagę w metodyce pomiarowej w stosunku do innych metod np.: elektrooporowej czy CSAMT. Interwał głębokościowy interpretacji wyników pomiarów wynosi tutaj najczęściej od dziesiątków do ok. 2000 metrów (i więcej) i zależy m. in. od rozmiaru pętli nadawczej, mocy nadajnika i rozkładu oporności w ośrodku geologicznym.

Zakres oraz cel prac

Celem projektowanych prac elektromagnetycznych jest monitoring składowiska przed rozpoczęciem składowania CO2, w czasie eksploatacji składowiska i po jej zakończeniu. Prace elektromagnetyczne będą zatem koncentrowały się na rozpoznaniu budowy geologiczno-strukturalnej rejonu projektowanych prac, pod kątem zbadania własności geoelektrycznych potencjalnego kolektora jurajskiego (dolna jura - Pliensbach) na głębokości 1000 - 1500, jak również rozpoznania tektoniki, a tym samym wskazania kierunku rozwoju stref zaburzonych tektonicznie, spękanych i przepuszczalnych, które mogłyby być potencjalną drogą ucieczki CO2.

Terenowe prace magnetotelluryczne obejmą wykonanie 400 sondowań metodą MT/AMT wzdłuż pięciu profili o łącznej długości około 100 kilometrów z zadaniem kroku pomiarowego wynoszącym około 250 m,

jak również wykonanie sondowań parametrycznych MT/AMT w pobliżu czterech otworów wytypowanych do zatłaczania CO2. Ponadto ww. profilach wykonane zostaną profilowania TDEM z możliwym wariantem pomiarów w miejscu sondowań magnetotellurycznych (co 250 m) lub zagęszczających (co 50-100 m) w otoczeniu otworów wiertniczych.

Profile zlokalizowane będą tak, aby dwa z nich przechodziły przez otwory wiertnicze w których planuje się zatłaczanie CO2 a pozostałe, zlokalizowane pomiędzy nimi, stanowiły wypełnienie obszaru w celu jego przestrzennej, trójwymiarowej wizualizacji i interpretacji.

Charakterystyka dotychczasowych prac elektromagnetycznych w rejonie badań

W obszarze projektowanych prac nie wykonywano dotychczas głębokich badań elektromagnetycznych w tym magnetotellurycznych, metodami procesów przejściowych. Na południowy zachód od wskazanego obszaru wykonano w 2011 roku prace magnetotelluryczne w ramach projektu ”Ocena potencjału, bilansu cieplnego i perspektywicznych struktur geologicznych dla potrzeb zamkniętych systemów geotermicznych (Hot Dry Rocks) w Polsce” finansowanego przez Ministerstwo Środowiska. W ramach ww. projektu wykonano 320 sondowań MT/AMT z krokiem pomiarowym od 500 do 1000 metrów. Celem prac było rozpoznanie budowy geologicznej utworów paleozoicznych.

Wpływ prac na środowisko naturalne i obiekty budowlane

Metodyka pomiarów magnetotellurycznych nie wymaga prac ziemnych (typu wykopy, wiercenia) czy prac strzałowych, dzięki czemu problem ochrony środowiska naturalnego przy ich realizacji w zasadzie nie występuje. Najistotniejsze elementy środowiska geologicznego: warunki hydrogeologiczne i struktura warstwy przypowierzchniowej w trakcie oraz po zakończeniu pomiarów pozostają nienaruszone. Oddziaływanie projektowanych prac magnetotellurycznych dotyczyć będzie tylko:

- zmian powierzchni terenu: niewielkie szkody mogą powstać jedynie w uprawach rolnych przy instalowaniu układów pomiarowych polegającym na rozwinięciu kabli o długości 75 m (długość pojedynczego dipola) i uziemieniu elektrod oraz zakopaniu sond magnetycznych w płytkich dołkach, które są lokalizowane na nieużytkach lub polach uprawnych aktualnie niewykorzystanych. Szkody tego typu są usuwane na bieżąco poprzez przywrócenie stanu pierwotnego miejsc uziemień. Dojazdy do projektowanych profili realizowane będą z wykorzystaniem istniejącej sieci dróg, co umożliwia ograniczenie szkód w uprawach rolniczych i leśnych.

- zanieczyszczenia powietrza spalinami: samochody będą powodowały krótkotrwałe zanieczyszczenie spalinami, ale nie większe niż przy normalnym ruchu kołowym na drogach dojazdowych. Wynika to ze specyfiki prac polowych, rozwinięcie i zwinięcie układu pomiarowego wymaga tylko dojazdu i dowiezienia sprzętu i ludzi.

- zagrożenia hałasem emitowanym w minimalnym stopniu przez pracujące silniki samochodowe.

Badania metodą CSAMT na profilach pomiarowych nie odbiegają swoją metodyką a zatem i wpływem na środowisko naturalne od pomiarów MT/AMT. Natomiast istotne różnice istnieją w trakcie wykonywania badań w miejscu lokalizacji tzw. układu prądowego. Układ prądowy, będący źródłem fali elektromagnetycznej zbudowany jest z dipola o długości do kilku kilometrów. Są to dwie grupy elektrod stalowych połączonych kablem do zlokalizowanego w środku tego układu transmitera prądu TXU-30. Transmiter zasilany jest generatorem prądotwórczym o mocy ok. 40 kW. Należy więc zasygnalizować, iż w trakcie cyklu pomiarowego trwającego ok. 1 godziny może występować zagrożenie hałasem spowodowane pracą generatora (ok. 70 dB). Planuje się wykonywanie 2-3 cykli pomiarowych dziennie. Metodyka pomiarów CSAMT pozwala jednak na lokalizowanie układu prądowego (TXU-30 + generator) w miejscach gdzie ich praca nie będzie uciążliwa dla środowiska naturalnego, tj. ludzi i zwierząt.

W przypadku metody procesów przejściowych (TDEM) układ pomiarowy zarówno nadajnik jak i odbiornik tworzą kable ułożone bezpośrednio na powierzchni ziemi. Praca generatora i transmitera może powodować ewentualne, minimalne zagrożenie hałasem, jest ono tożsame jak w przypadku metody CSAMT.

Podsumowując należy stwierdzić, iż planowane prace elektromagnetyczne oddziaływać będą na wszystkie elementy środowiska w stopniu nikłym, w sposób krótkotrwały i przejściowy.

Technika oraz metodyka prac geoelektrycznych (EM)

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.

W pracach terenowych wykorzystane zostaną:

- odbiorniki typu V8-6R,

- odbiorniki typu RXU-3ER,

- odbiornik typu MTU-A,

- cewki magnetyczne typu AMTC-30, MTC-50 i MTC-50A,

- antena odbiorcza MTEM-AL,

- transmiter TXU-3,

- inne podzespoły aparatury (kable, GPS, prądnice etc.).

Sondowania punktowe – profilowe i parametryczne (MT/AMT)

Jedną z metod wykorzystaną w badaniach będzie metoda sondowań magnetotellurycznych w paśmie magnetotellurycznym – MT i audiomagnetotellurycznym – AMT (**Fig. 1.1.18_72**). Krok pomiarowy punktów podstawowych (5-cio składnikowych: Ex, Ey, Hx, Hy i Hz) wynosił będzie, w zależności od warunków topograficznych 250 metrów.

W pracach terenowych wykorzystane zostaną:

- odbiorniki typu V8-6R lub MTU-5A
- cewki magnetyczne typu AMTC-30,
- cewki magnetyczne typu MTC-50,

Prace terenowe będą polegały 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 0.01 – 10000 Hz. Czas rejestracji dla omawianych badań, na jednym punkcie pomiarowym wynosić będzie wynosił ok. 16 - 36 godzin, w zależności od warunków pomiarowych (poziomu zakłóceń).

Podstawowy układ pomiarowy sondowań MT/AMT składał się będzie z odbiornika typu V8 lub MTU-5a, 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 środka dipoli elektrycznych. Dipole elektryczne zbudowane będą z kabla ekranowanego typu CX-75 i pary uziemień w postaci elektrod niepolaryzujących. Dipole elektryczne i czujniki magnetyczne podłączone będą bezpośrednio do odbiornika. 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.

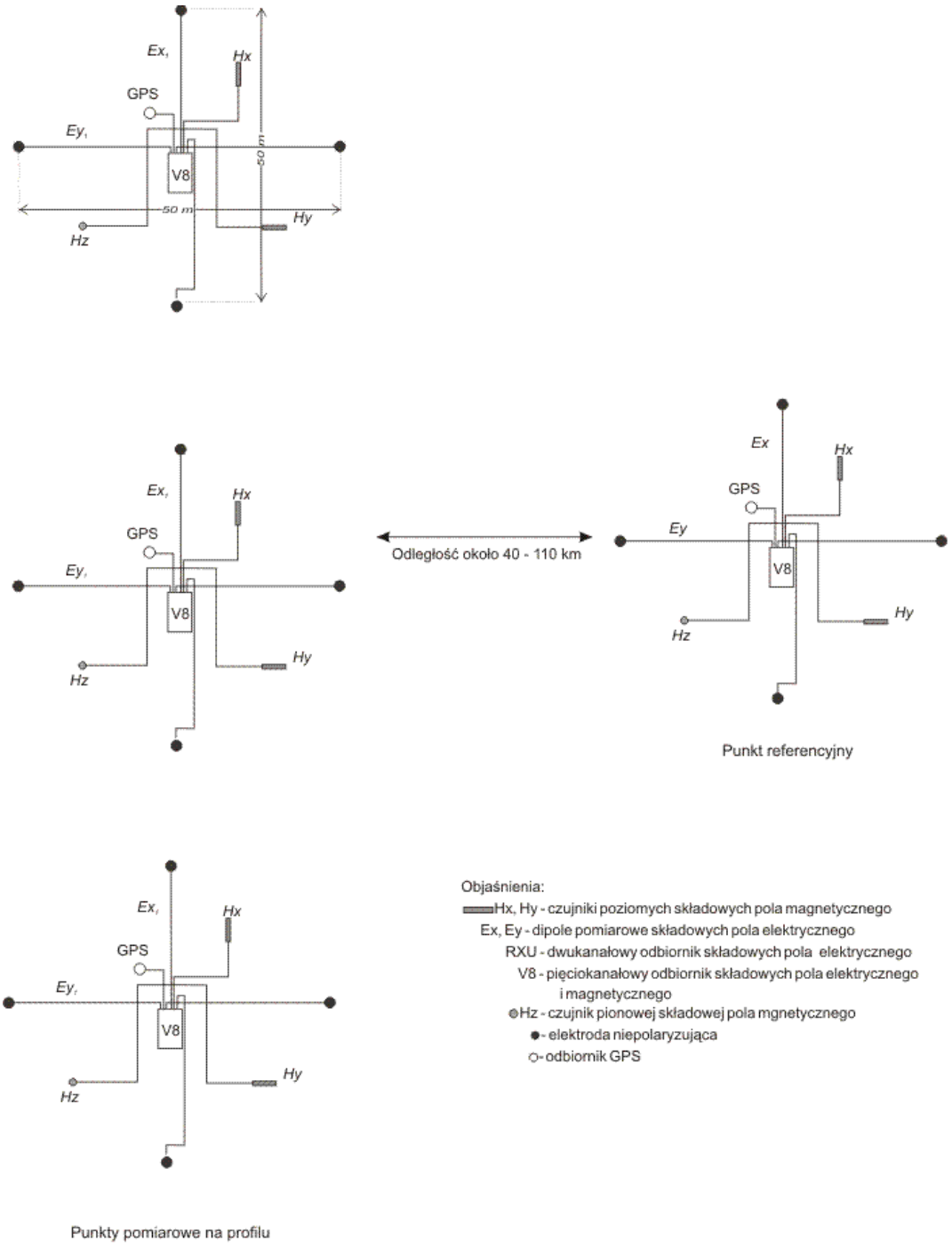


Fig. 1.1.18_72 Schemat układu pomiarowego sondowań AMT/MT

Pomiary metodą 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 podłączoną do niego pętlą odbiorczą MTEM-AL (**Fig. 1.1.18_73**).

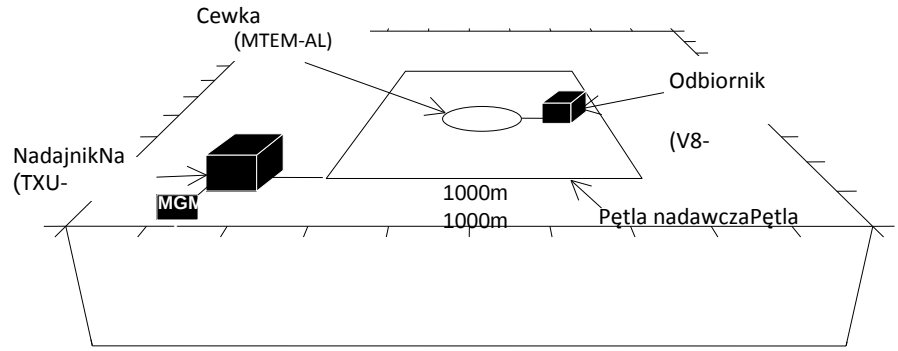


Fig. 1.1.18_73 Typowy układ pomiarowy dla metody TDEM

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 kilometra, 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 odbywać się będzie w dwóch etapach. Etap pierwszy to tzw. pre-processing obejmujący także kontrolę jakości i wykonywany będzie bezpośrednio w trakcie prac polowych. W etapie drugim, właściwym, 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 sondowań MT/AMT możliwe będzie także modelowanie 3D pozwalające na przestrzenną analizę zmienności oporności w ośrodku geologicznym.

Harmonogram prac elektromagnetycznych

W przypadku prac MT/AMT/TDEM planuje sie wykonanie pięciu profili o kierunkach S-N i łącznej długości około 100 km. Krok pomiarowy dla prac MT/AMT wynosić będzie 250 m. W przypadku prac TDEM możliwy jest wariant z pomiarami w miejscu sondowań magnetotellurycznych (co 250 m) lub zagęszczające (co 50-100 m) w otoczeniu otworów wiertniczych. W sumie wykonane zostanie około 400 punktów pomiarowych MT/AMT/TDEM.

Po wykonaniu prac opisanych powyżej prac wstępnych proponuje się przeprowadzenie regularnego (np. w odstępie 2-3 lat) monitoringu w punktach wytypowanych na podstawie pierwszego etapu i stanowiących przynajmniej 30% jego zakresu.

Monitoring metodą elektrooporową

Przedmiotem projektu będą nowatorskie w Polsce badania niezbędne do opracowania i wdrożenia usługi, bezpiecznego i skutecznego rozpoznania skutków ewentualnej migracji dwutlenku węgla w utworach czwartorzędowych.

Prace zrealizowane zostaną za pomocą bezinwazyjnych metod geofizycznych, opartych o dwie metody geoelektryczne, tj. metodę pionowych sondowań geoelektrycznych (SGE) i tomografii elektrooporowej (ERT).

Zakres rzeczowy prac badawczych wykonanych w ramach projektu obejmuje:

- inwentaryzację danych archiwalnych i opracowanie kryteriów wyboru polowych stanowisk badawczych na potrzeby zaprojektowania badań polowych;

- zaprojektowanie i wykonanie badań polowych w postaci pionowych sondowań elektrooporowych i tomografii elektrooporowej w promieniu 500 m od planowanego otworu;

- optymalizację processingu wyników badań geofizycznych;

- opracowanie szczegółowego przestrzennego modelu ośrodka geologicznego w otoczeniu otworu w granicy utworów czwartorzędowych

- określenie związków pomiędzy parametrami geofizycznymi a własnościami gruntu i wód gruntowych, oraz określenie ewentualnie dróg migracji dwutlenku węgla w utworach nieprzepuszczalnych;

- określenie miejsc do ewentualnego monitoringu.

CEL BADAŃ

Z uwagi na wymogi bezpieczeństwa, w rejonie podziemnego zbiornika dwutlenku węgla należy rozważyć występowanie przypowierzchniowych dróg migracji i wtórnych kolektorów gazu.

W przypadku planowanego zbiornika, strop jury i utworów trzeciorzędowych sięga stosunkowo płytko i przykryty jest serią osadów czwartorzędowych pochodzenia lodowcowego i rzecznego, o dużej zmienności facjalnej. Piaski rzeczne i fluwioglacjalne mogą być miejscem płytkiego nagromadzenia dwutlenku węgla w razie nieprzewidzianej, horyzontalnej migracji z głównego zbiornika, a także drogami migracji lateralnej.

Potencjalnymi płytkimi horyzontami izolującymi są poziomy iłów warwowych i glin zwałowych występujące na terenie planowanego zbiornika. Poziomy te jednak bywają porozcinane współczesnymi i kopalnymi dolinami rzecznymi, wypełnionymi osadami piaszczystymi i żwirami.

W przypadku zaistnienia płytkiej migracji dwutlenku węgla, stanowiłyby one drogi migracji pomiędzy wtórnymi kolektorami, a także umożliwiały migrację do powierzchni ziemi.

Dlatego zasadne jest rozpoznanie płytkiej budowy geologicznej, ze szczególnym uwzględnieniem występowania dolinnych rozcięć erozyjnych (współczesnych i kopalnych) oraz występowania warstw izolujących.

Badania płytkiej budowy geologicznej pozwoli na prawidłowe rozmieszczenie składowych systemu monitoringu.

Projekt zakłada przeprowadzanie pomiarów monitorujących przez cały okres eksploatacji składowiska Co2 oraz po zakończeniu w takim samym zakresie prac, przy zachowaniu metodyki, lokalizacji i ilości pomiarów jak monitoring stanu początkowego. Pierwszy monitoring w trakcie eksploatacji powinien zostać przeprowadzony po 2 latach od rozpoczęcia zatłaczania a potem co 3 lat. Po zakończeniu zatłaczania należy wykonywać ten sam zakres pomiarów co 5 lat.

OPIS METODY

Metody geofizyczne-geoelektryczne bazują na zjawisku rozchodzenia się prądu elektrycznego w środowisku gruntowo-wodnym.

Dla niniejszego przedsięwzięcia proponuje się wykonać badania w wariancie tomografii elektrooporowej (ERT), oraz pionowych sondowań geoelektrycznych (SGE).

Obydwie metody należą do grupy metod geoelektrycznych wykorzystujących zróżnicowanie przewodności/oporu elektrycznego ośrodka geologicznego. Są to metody powszechnie stosowane w rozpoznaniu utworów czwartorzędowych.

W zmianach wartości oporu elektrycznego odzwierciedlają się dwa najistotniejsze czynniki geologiczne: zróżnicowanie litologii i tektonika.

Utwory geologiczne o dużej zawartości materiału ilastego (np. gliny, iły, margle), charakteryzują się wyraźnie obniżonymi wartościami oporów elektrycznych, w stosunku do utworów piaszczystych.

Zastosowanie metod geofizycznych – elektrooporowych umożliwi rozpoznanie przestrzenne ośrodka geologicznego, w szczególności wydzielenie wysokooporowych utworów piaszczystych, piaszczysto żwirowych, należących do utworów przepuszczalnych i utworów niskooporowych (gliniastych, ilastych) zaliczanych do utworów nieprzepuszczalnych. Wiedza o przestrzennym położeniu tych utworów określi ew. drogi migracji dwutlenku węgla do powierzchni ziemi.

Badania elektrooporowe

Badania elektrooporowe w wersji SGE są najczęściej stosowaną metodą geofizyczną w zagadnieniach związanych z problematyką rozpoznania osadów czwartorzędowych. Pozwalają na wydzielenie głębokości zalegania oraz określenie oporności właściwej kompleksów litologicznych. Korelacja wyinterpretowanych kompleksów elektrooporowych z opornościami typowymi dla poszczególnych typów litologicznych pozwala na interpretację geologiczną wyników badań.

Metoda sondowań geoelektrycznych-elektrooporowych (SGE) polega na wykorzystaniu zjawiska przepływu stałego prądu elektrycznego przez ośrodek geologiczny, które umożliwia określenie zróżnicowania oporu elektrycznego różnych typów litologicznych skał, składających się na warstwy ośrodka geologicznego, z uwzględnieniem warunków ich występowania.

Sondowania SGE obejmują pomiary oporności elektrycznej ośrodka przy zastosowaniu zmiennych długości (rozstawów) układu pomiarowego. Bezpośrednimi wielkościami podlegającymi pomiarom są: natężenie prądu „I" w obwodzie zasilającym „AB", spadek napięcia „V" w obwodzie pomiarowym „MN".

Na podstawie analitycznych związków między zmierzonym oporem pozornym a wartościami oporu rzeczywistego i miąższościami poszczególnych warstw istnieje możliwość określenia budowy geologicznej.

Sondowania najczęściej wykonuje się w czteroelektrodowym symetrycznym układzie Schlumbergera.

Maksymalne rozstawy elektrod zasilających należy dobrać tak, aby uzyskać zasięg głębokościowy gwarantujący sięgnięcie do spągu utworów czwartorzędowych.

Przyjmuje się, iż głębokość (zasięg głębokościowy metody) w przybliżeniu można opisać zależnością H=AB/6. Przez AB rozumiemy maksymalny rozstaw elektrod zasilających.

Tomografia elektrooporowa

Tomografia elektrooporowa, jest jedną z młodszych metod geoelektrycznych, powstałych niejako poprzez połączenie sondowań i profilowań geoelektrycznych.

W tomografii elektrooporowej pomiary mogą odbywać się na całej długości profilu w jednym procesie kontrolowanym przez aparaturę pomiarową. Wszystkie elektrody rozmieszczane są przed rozpoczęciem pomiarów wzdłuż całego badanego odcinka w stałych odległościach względem siebie. W trakcie pomiarów system mikroprocesorowy sukcesywnie uaktywnia odpowiednie grupy elektrod zgodnie z wybranym przez operatora układem pomiarowym. W efekcie wyniki profilowania rejestrowane są wzdłuż rozstawu pomiarowego ze szczegółowością odpowiadającą odległości rozmieszczonych elektrod.

Metoda ERT posiada wysoką szczegółowość pomiarów, pozwalającą na quasi ciągłe śledzenie zmian oporności lub przewodności elektrycznej badanego ośrodka, posiada też możliwość swobodnego wyboru i przełączania schematów układów pomiarowych bez konieczności zmiany położenia elektrod w istniejącej linii profilowania spośród układów najczęściej stosowanych w badaniach elektrooporowych. Pomiar oporności wzdłuż rozstawu pomiarowego odbywa się automatycznie pod kontrolą oprogramowania firmowego zapisanego w pamięci aparatury.

Zasięg głębokościowy metody tomografii elektrooporowej jest pochodną długości stosowanych rozstawów pomiarowych oraz w pewnym stopniu topografii terenu. Przyjmuje się iż zasięg głębokościowy metody jest wynosi ok. 1/5 długości rozstawu.

W badaniach elektrooporowych wykonanych na potrzeby niniejszego przedsięwzięcia rozstaw elektrod powinien wynosić od 5 do 10 m wzdłuż linii profilu.

ZAŁOŻENIA METODYCZNE PROJEKTOWANYCH BADAŃ.

Projektowane badania obejmują prace terenowe oraz analizę wyników i ich interpretację geologiczną:

W przypadku prac terenowych przewiduje się wykonanie dla każdego z wyznaczonych do zatłaczania otworów następujący zakres prac:

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

2) W rejonie każdego otworu zatłaczającego przewiduje się wykonanie badań metodą tomografii elektrooporowej. Przewiduje się wykonanie 10 równoległych profili o długości 1000 m, odległych od siebie o 100 m. Badania takie powinny objąć 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.

Na podstawie wykonanych pomiarów powinien zostać stworzony model przestrzenny uwzględniający występowanie potencjalnych wtórnych kolektorów i dróg migracji w pobliżu otworów zatłaczających oraz w ich otoczeniu w miejscach występowania potencjalnych dróg płytkiej migracji.

Geofizyczne metody elektrooporowe, z uwagi na głębokość wymaganej prospekcji, oraz jednoznaczność rozróżniania skał porowatych od nieprzepuszczalnych doskonale nadają się do przeprowadzenia proponowanych badań.

Badania geofizyczne powinny zostać powiązane z wykorzystaniem niezbędnych otworów piezometrycznych, potrzebnych do kalibracji i weryfikacji geofizyki

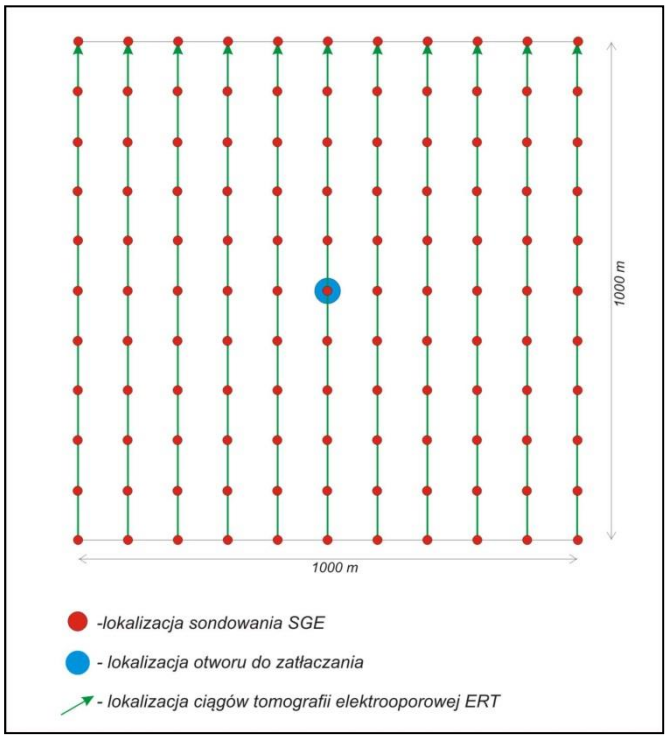


Fig. 1.1.18_74 Schemat badań geofizycznych przy otworach zatłaczających

PRACE DOKUMENTACYJNE

Proponowane prace dokumentacyjne będą składać się z trzech etapów: przygotowawczego, akwizycji danych oraz etapu interpretacji pomiarów i interpretacji geologicznej.

Etap przygotowawczy

Na podstawie map topograficznych zostanie wyznaczona siatka pomiarowa obejmująca, w zależności od przyjętego wariantu prac, rejon otworów zatłaczających lub cały obszar składowiska z zagęszczeniem siatki pomiarowej w rejonach otworów zatłaczających.

W sąsiedztwie otworów zatłaczających (kwadrat o boku 1 km ze środkiem w miejscu otworu zatłaczającego) siatka pomiarowa zostanie wyznaczona co 100 m i profilami pomiarowymi tomografii elektrooporowej również co 100 m. Założona siatka zostanie przeanalizowana i zmodyfikowana pod kątem możliwości wykonania pomiarów. Na podstawie materiałów topograficznych zostaną wyliczone współrzędne topograficzne punktów pomiarowych, które posłużą do lokalizacji w terenie z użyciem odbiorników GPS.

Akwizycja danych

Pomiary SGE zostaną wykonane w miejscach zaplanowanych przy pomocy standardowej procedury sondowań geoelektrycznych, symetrycznym układem Schlumbergera, o maksymalnym rozstawie linii zasilającej AB do 320 m, zapewniającym zasięg głębokościowy nie mniejszym niż 50 m., z użyciem

stałoprądowej cyfrowej aparatury typu AGD-04 zasilanej akumulatorami z przetwornicą prądu stałego i typowym osprzętem pomiarowym, na który składają się elektrody uziemiające, oraz kable pomiarowe i podłączeniowe.

W metodzie tomografii elektrooporowej wykorzystana zostanie aparatura ARES produkcji czeskiej firmy GF Instruments. Pomiary wykonane zostaną w układzie elektrod wg. schematu Schlumbergera. Wytyczone profile pomierzone zostaną z odstępem elektrod wzdłuż linii profilu wynoszącym 5 m. W pomiarach zasięg głębokościowy rozpoznania oporności ośrodka wyniesie do 70-80 m głębokości względem powierzchni terenu. W metodzie tomografii elektrooporowej pomiar oporności wzdłuż rozstawu pomiarowego odbywa się automatycznie pod kontrolą oprogramowania firmowego zapisanego w pamięci aparatury.

Interpretacja

Interpretacja uzyskanych rezultatów, krzywych pomiarowych SGE wykonana zostanie metodą modelowania matematycznego z wykorzystaniem specjalistycznego oprogramowania komputerowego IPI2win. W rezultacie interpretacji określone zostaną granice warstw różniących się opornością elektryczną i wartości tej oporności w poszczególnych, wydzielonych warstwach.

Do przetwarzania danych tomografii elektrooporowej wykorzystany będzie program Res2Dinv firmy Geotomo Software. Wyniki pomiarów metodą tomografii elektrooporowej, standardowo przedstawiane są w postaci przekrojów izoliniowych, obrazujących zmiany oporności w badanym ośrodku w układzie 2D: odległość wzdłuż linii profilowania i głębokość względem powierzchni badań.

Na podstawie prac archiwalnych i otworów geologicznych, określone zostaną szacunkowe przedziały oporności odpowiadające kompleksom litologicznym. Przyporządkowanie to będzie podstawą do interpretacji geologicznej rezultatów badań SGE i ERT.

Na podstawie danych geofizycznych zaproponowany zostanie przestrzenny model płytkiej budowy geologicznej, zaprezentowany jako seria przekrojów geofizycznych z interpretacją geologiczną, oraz jako baza danych GIS.

HARMONOGRAM ORAZ KOSZTORYS PRAC

Rozpoznanie budowy geologicznej przy otworach zatłaczających:

- SGE w siatce co 100 m (121 SGE), w sumie ilość otworów zatłaczających x 121 SGE, 500 zł za sondowanie – ilość otw. x 121 x 500

- Ilość otworów zatłaczających, profile ERT co 100 m (11 km ERT), w sumie ilość otworów zatłaczających x 11 km ERT, 8000 zł za 1 kmb profilu.

Proponowane prace geoelektryczne w tym systemie badań przy czterech otworach zatłaczających wyniosły by ok. 594 000 zł.

Przewidywany okres prac terenowych ok. 2 miesiące, interpretacja danych pomiarowych 2 miesiące, opracowanie dokumentacji 1 miesiąc – łącznie 5 miesięcy.

Cena obejmuje stworzenie przestrzennego modelu płytkiej budowy geologicznej.

Monitoring metodą sejsmiki 2D

Planowane badania mają umożliwić właściwe wykartowanie antyklin Choszczno-Suliszewo, tektoniki deformującej horyzonty będące przedmiotem badań oraz w szczególności uszczelnienia i wyżej leżącego nadkładu. Dokładne odwzorowanie struktury uskoków jest kluczowe, ponieważ będzie ono pomocne przy oszacowaniu pojemności zaproponowanego zbiornika. Analizowany interwał to zasadniczo kompleks od dolnego toarku (uszczelnienie), przez pliensbach do synemuru i hettangu, którego strop występuje dla lokalizacji zatłaczania na głębokości 1000 - 1200 m p.p.t. Parametry akwizycji i opracowania wyników proponowanej sejsmiki wysokorozdzielczej 2D scharakteryzowano poniżej. Wymagane są testy źródeł, tj. testy sygnału generowanego przez wibratory (sweepu), ilości sweepów, ilości wibratorów, długości sygnału, szerokości pasma i długości taperów.

Faza ta obejmuje badania niezbędne do dokładniejszego rozpoznania struktur potencjalnych składowisk.

Proponuje się realizację następujących prac:

- Wykonanie uzupełniającego zdjęcia sejsmicznego 2D (10 profili, w sumie 250 km długości, wraz z processingiem i interpretacją) w rejonie struktury Choszczno-Suliszewo (**Fig. 1.1.18_49**) w środkowej jurze, o parametrach ukierunkowanych na zbiornik dolnojurajski, eliminujących wpływ tłumienia nadległego kompleksu węglanowego górnej jury;

- Reprocessing i reinterpretacja archiwalnych profili sejsmicznych (w szczególności z lat 1990tych i 1980tych) w rejonie struktury w jurze, w sumie około 250 km profili, według metodyki analogicznej jak dla nowych profili;

- Uaktualnienie modelu geologicznego struktury oraz scenariuszy zatłaczania CO2 w oparciu o wyniki nowych badań (oraz reprocessingu i reinterpretacji starych).

Proponowane pomiary sejsmiczne 2D miałyby następujące

Parametry rejestracji:

- typ sweepu: liniowy, 2vib x 4sweep
- interwał wzbudzania 25 m
- pasmo częstotliwości: 8-120 Hz,
- czas trwania sweepu: 12s
- długość rejestracji: 4 s,
- krok próbkowania: 2 ms,
- notch filter: wyłączony,
- filtr dolny: 3 Hz,

- filtr górny: antyaliasyjny 3/4 Nyquista, minimalnofazowy,
- tapery: początkowy: 0,3 s, końcowy: 0,3 s,
- drive level: 80 %,
- sweepowanie stacjonarne.

Dla spełnienia w/w wymagań, nowe pomiary sejsmiczne powinny mieć dużą szerokość pasma (zarówno na niskim jak i na wysokim końcu spektrum częstotliwości). Metodyka akwizycji wymaga wystarczającej elastyczności aby zapewnić dostateczne wytłumienie szumów otoczenia. Jest to szczególnie ważne tam, gdzie dolna jura zalega płycej przez co efektywna krotność pokrycia byłaby dużo niższa niż wartość nominalna.

Rozpoznanie strefy małych prędkości (SMP):

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

Proponowany schemat przetwarzania (i reprocessingu) 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);
- Tłumienie 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 prędkości co ok. 1 km;
- Sprawdzanie i korekta wiązania na krzyżówkach;
- Automatyczna korekta poprawek statycznych;
- Sprawdzanie i korekta wiązania na krzyżówkach;
- DMO;
- Końcowe analizy prędkości co 0,5 km;
- Analiza mutingu zmiennego wzdłuż profilu;
- Wprowadzenie poprawek kinematycznych i mutingu;
- Skalowanie amplitud (1 okno lub długie AGC);
- Suma końcowa;
- Sprawdzenie i ewentualna korekta wiązania na krzyżówkach;
- Migracja czasowa po składaniu;
- Korekta widma sygnału;
- Filtracja częstotliwościowa;
- Poprawa stosunku sygnał/zakłócenie;
- Skalowanie amplitud tras;
- Migracja czasowa przed składaniem;
- Migracja głębokościowa po składaniu.

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

Propozycja programu monitoringu parametrów kolektorów i uszczelnienia na podstawie planowanych prac z zakresu sejsmiki 4D dla obiektu Grodzisk-Ujazd-Bukowiec-Paproć (INiG)

(Halina Jędrzejowska-Tyczkowska, Krystyna Żukowska, Irena Irlik)

Realizacja niniejszego zadania, sformułowanego następująco: „Wykonanie programu monitoringu parametrów zbiornikowych i uszczelniających dla obiektu Grodzisk-Ujazd-Bukowiec-Paproć (fragment Niecki Poznańskiej)", praktycznie rozumiana jest jako opracowanie i przedstawienie programu monitoringu powyższego obszaru.

W dokumentacji przedstawiono jedną, a raczej jedyną, możliwą wersję realizacji zadania dla konkretnych uwarunkowań związanych z dostępnością danych.

Charakterystyka wybranego obszaru badań i materiałów polowych

Sytuacja obszaru badań pokazana jest na **Fig. 1.1.18_75** (z wykonanego pod kierunkiem W. Szotta, 2011) za pomocą błękitnej linii obramowania, otaczającej analizowany rejon.

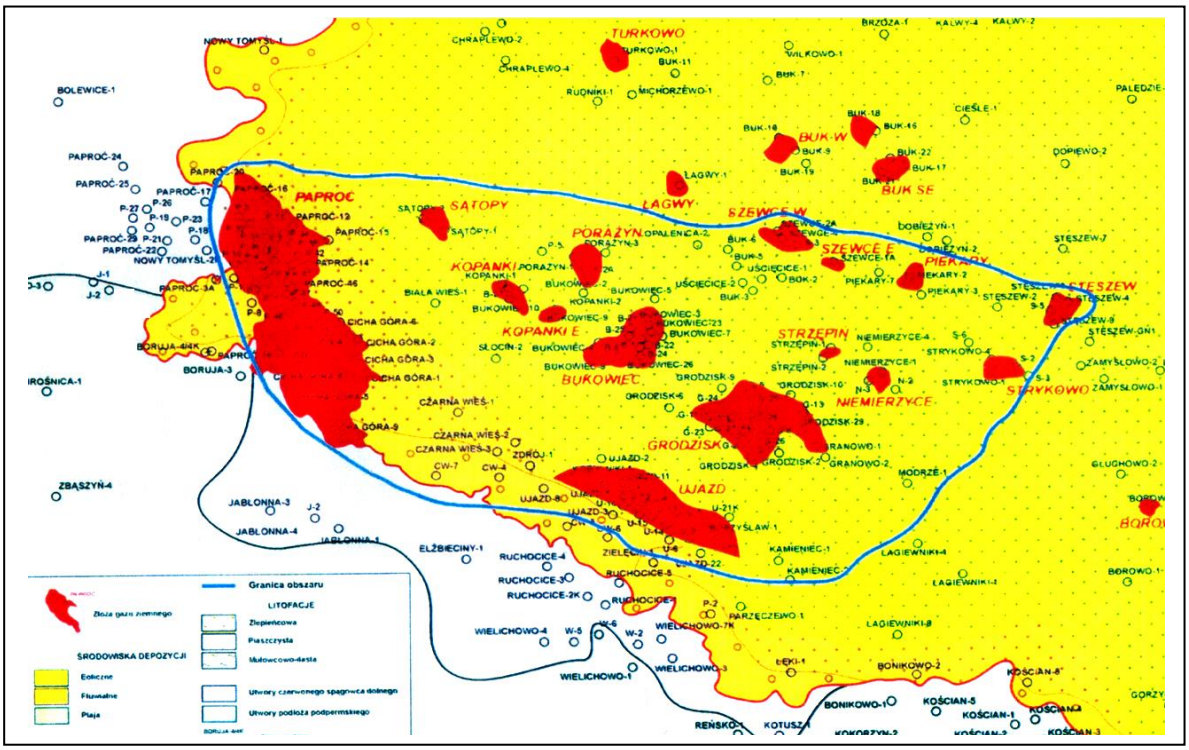


Fig. 1.1.18_75 Fragment mapy niecki poznańskiej z zaznaczonymi granicami omawianego obszaru

Płn.-zachodnia strefa to rejon złoża Paproć, eksplorowany już od roku 1986 ponad osiemdziesięcioma otworami. Złoże zlokalizowane jest w strefie krawędziowej basenu czerwonego spągowca. Strefa najbardziej wysunięta na płd.-zachód to obiekt złożowy Czarna Wieś – Parzęczewo, zlokalizowany w strefie wyklinowania utworów górnego czerwonego spągowca na Wyniesienie Wolsztyńskie. Ogólną orientację geograficzną oraz lokalizację złóż pokazano na **Fig. 1.1.18_76** i **Fig. 1.1.18_77.**

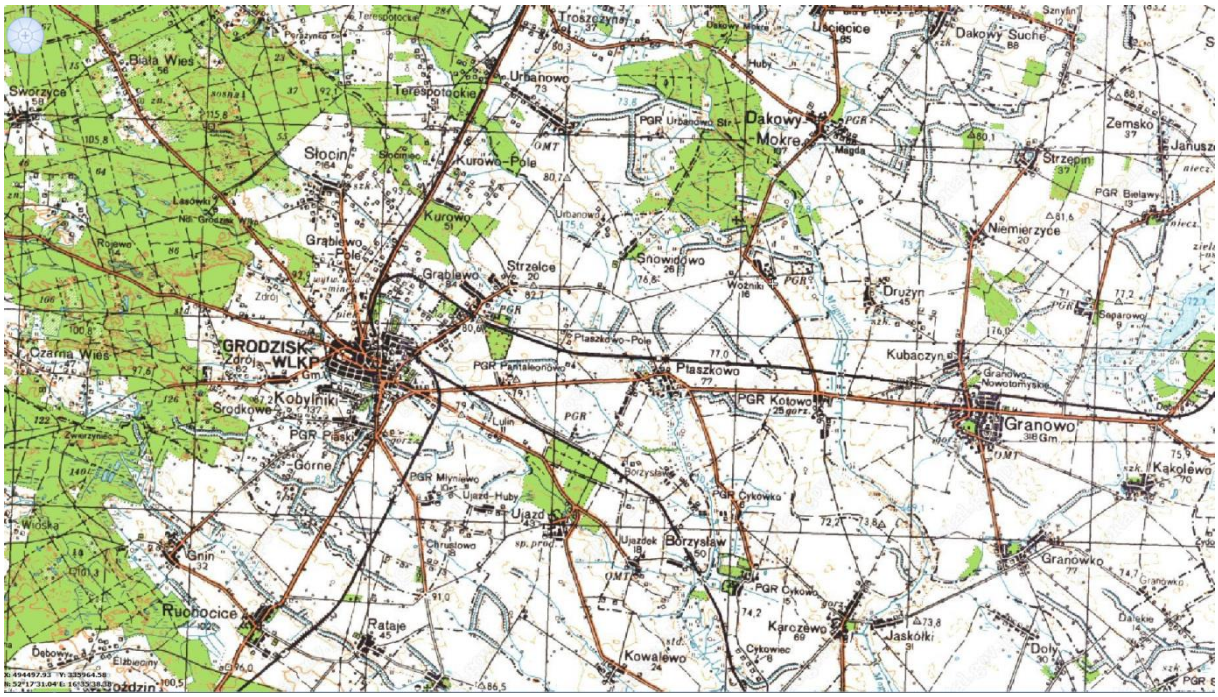


Fig. 1.1.18_76 Orientacja geograficzna złóż

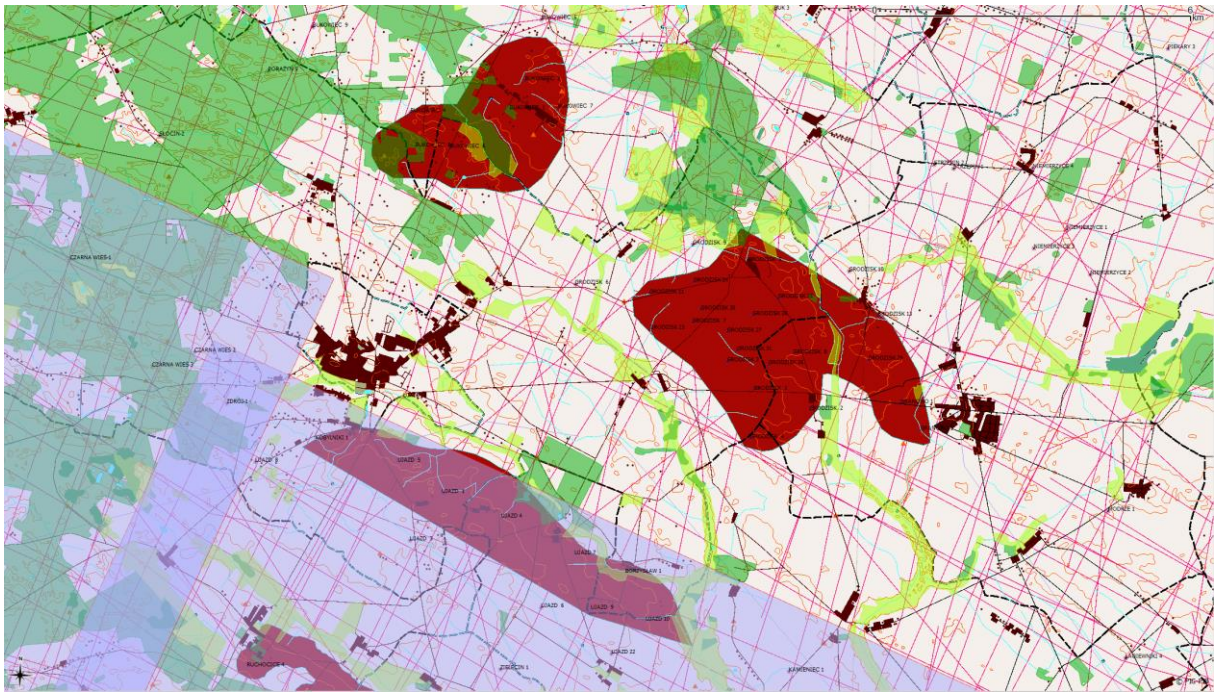


Fig. 1.1.18_77 Lokalizacja rejonu złóż

Wg koncepcji sekwestracji w wymienionym fragmencie Niecki Poznańskiej proponuje się, wykorzystać wyczerpane obiekty złożowe w formacji czerwonego spągowca w strefie zamknięcia północno-zachodniego przy lokalizacji strefy zatłaczania w strefie południowo-wschodniej, która ze względu na stosunkowo niski stopień penetracji geologicznej budzi zastrzeżenia odnośnie szczelności formacji do zatłaczania.

Przestrzenne przekroje przez bryłę modelu wzdłuż jego głównych osi przedstawiono poniżej za autorami wcześniejszego etapu opracowania (W. Szott, 2011). Głębokość spągu górnego czerwonego spągowca na wymienionym obszarze to interwał głębokości od ok. 2400 m na zachodzie do ok. 2900 m na wschodzie. Dość zbliżony jest rozkład głębokości w kierunku prostopadłym do wymienionego - od ok. 3050 m na północy do ok. 2300 m na południu. Te formacje warto zachować w pamięci, przesądzają bowiem bezpieczeństwo składowania CO2 związane z grubością pokrywy skalnej nad składowiskiem.

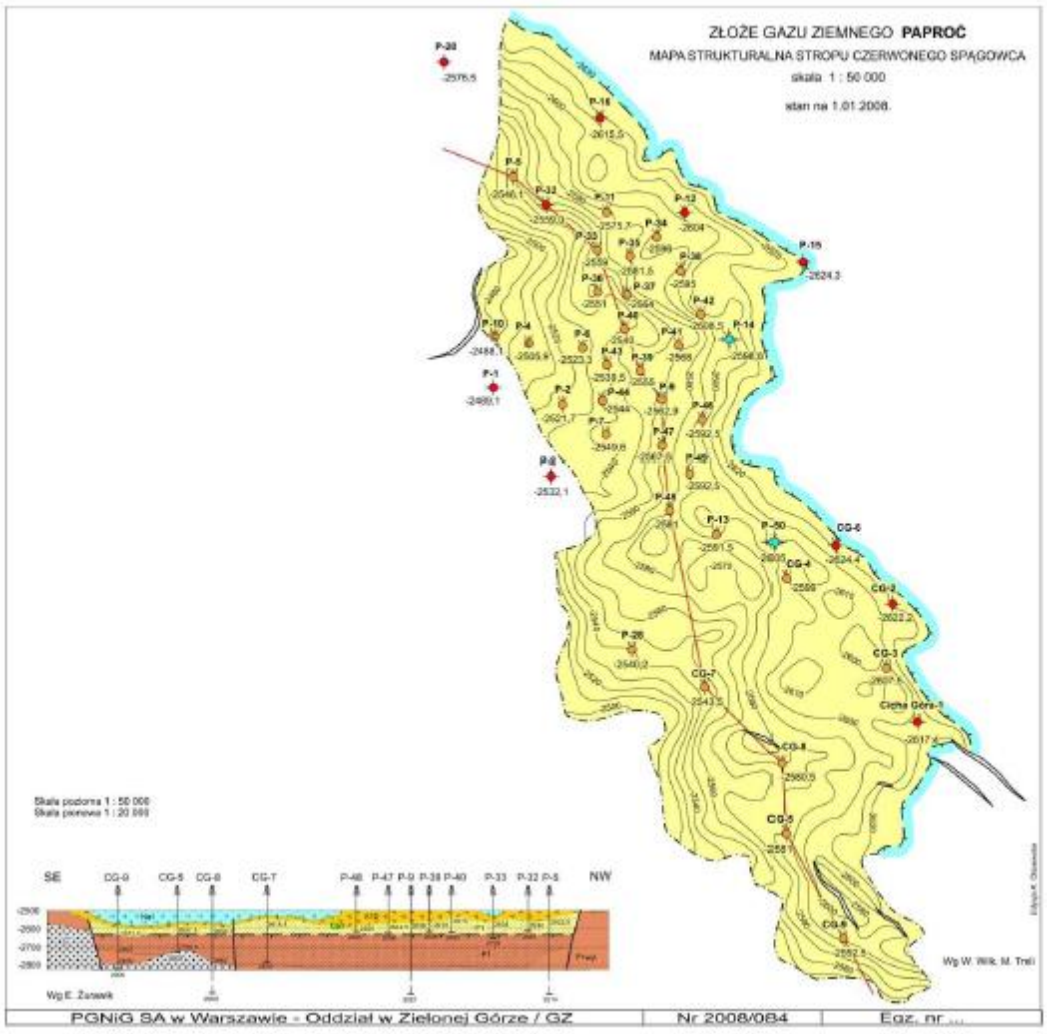


Fig. 1.1.18_78 Mapa strukturalna stropu złoża Paproć

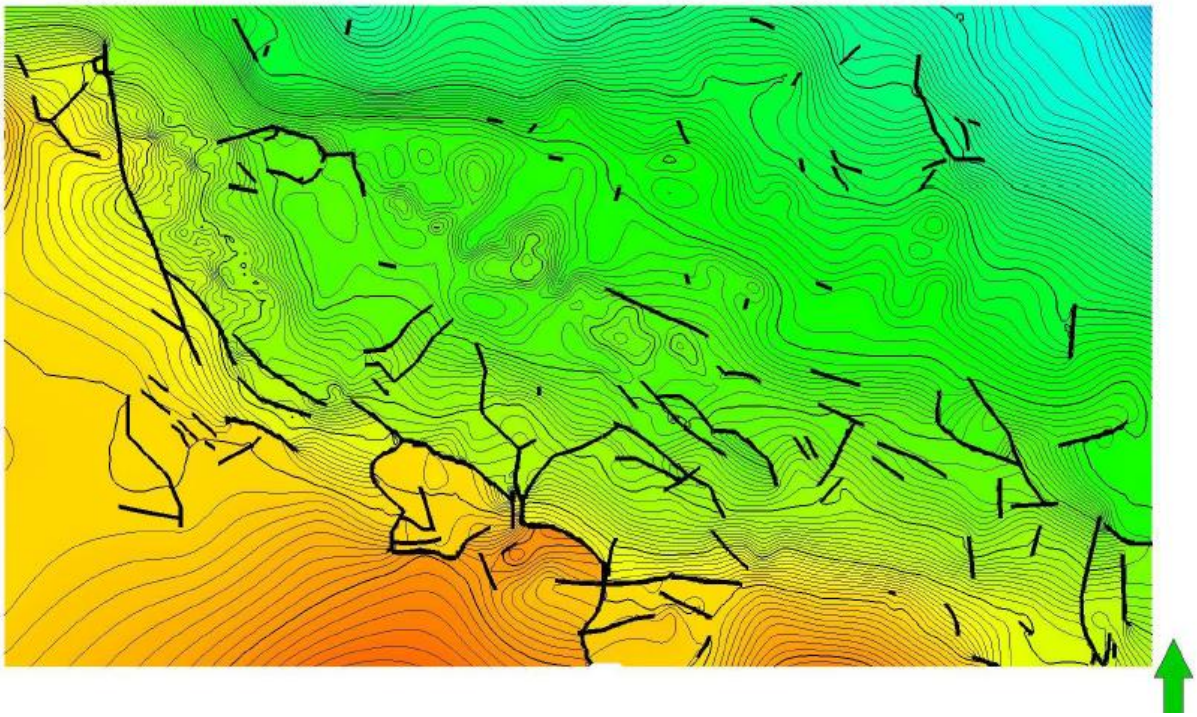


Fig. 1.1.18_79 Szczegółowa mapa strukturalna stropu czerwonego spągowca

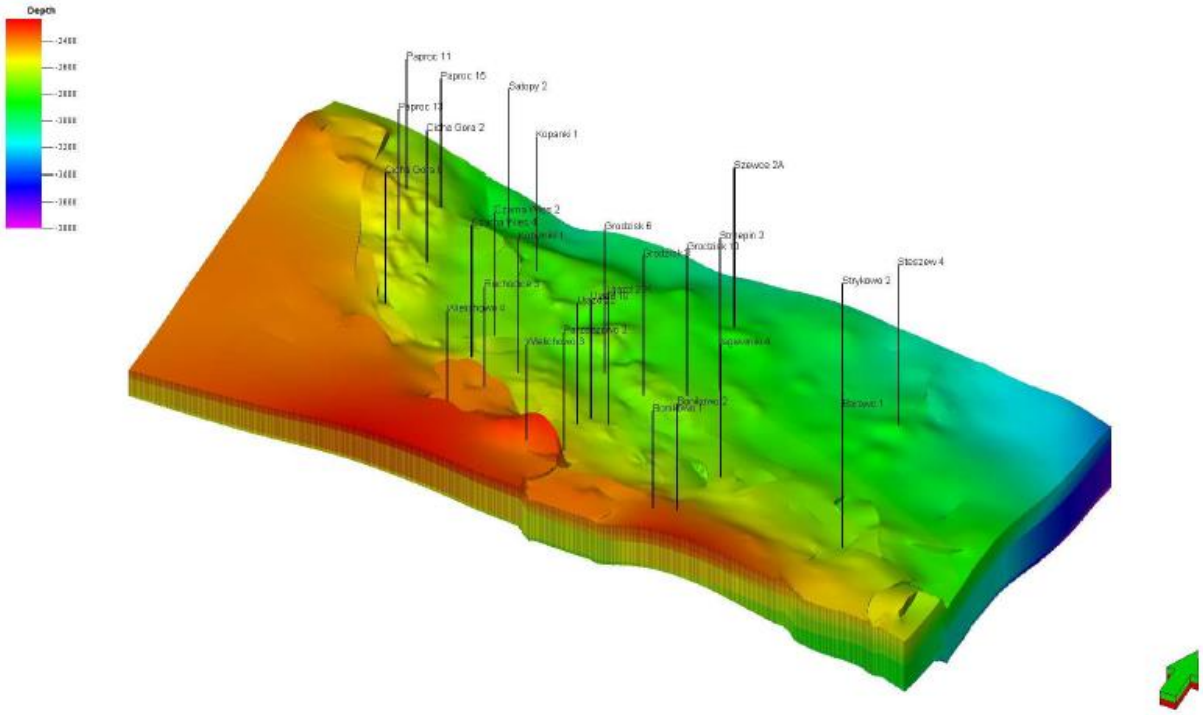


Fig. 1.1.18_80 Przestrzenny widok bryły modelu od strony południowo-wschodniej

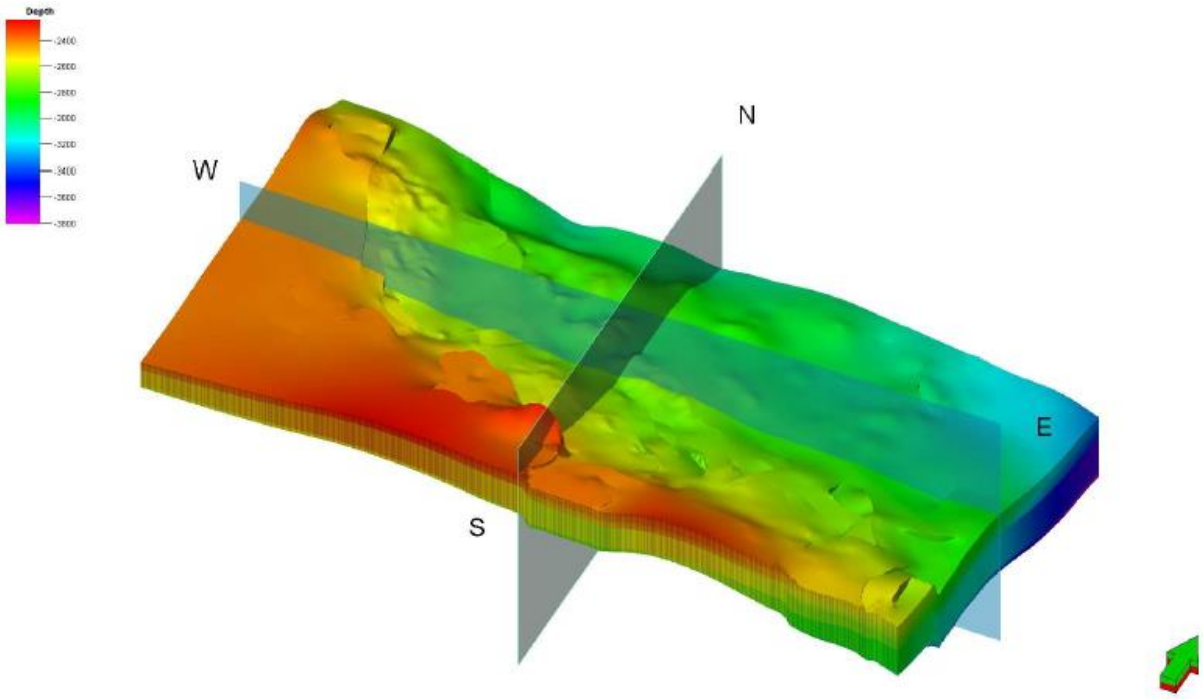


Fig. 1.1.18_81 Przestrzenny przekrój bryły modelu wzdłuż jego głównych osi

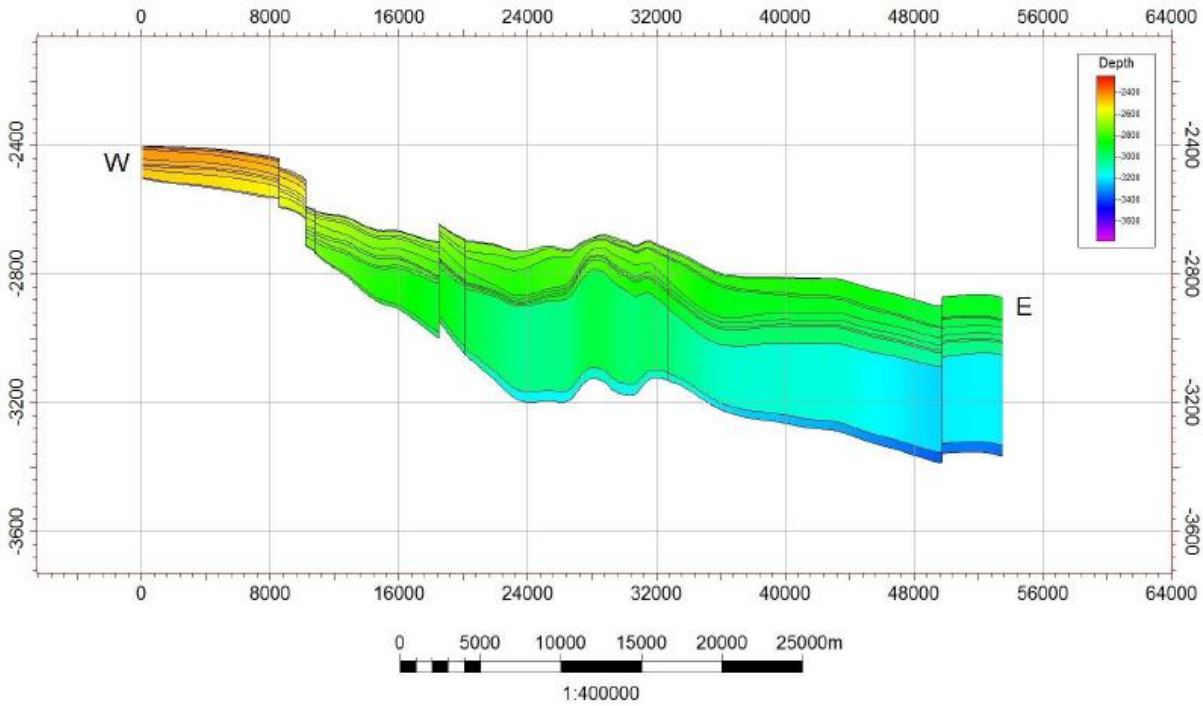


Fig. 1.1.18_82 Przekrój pionowy w płaszczyźnie W-E bryły modelu

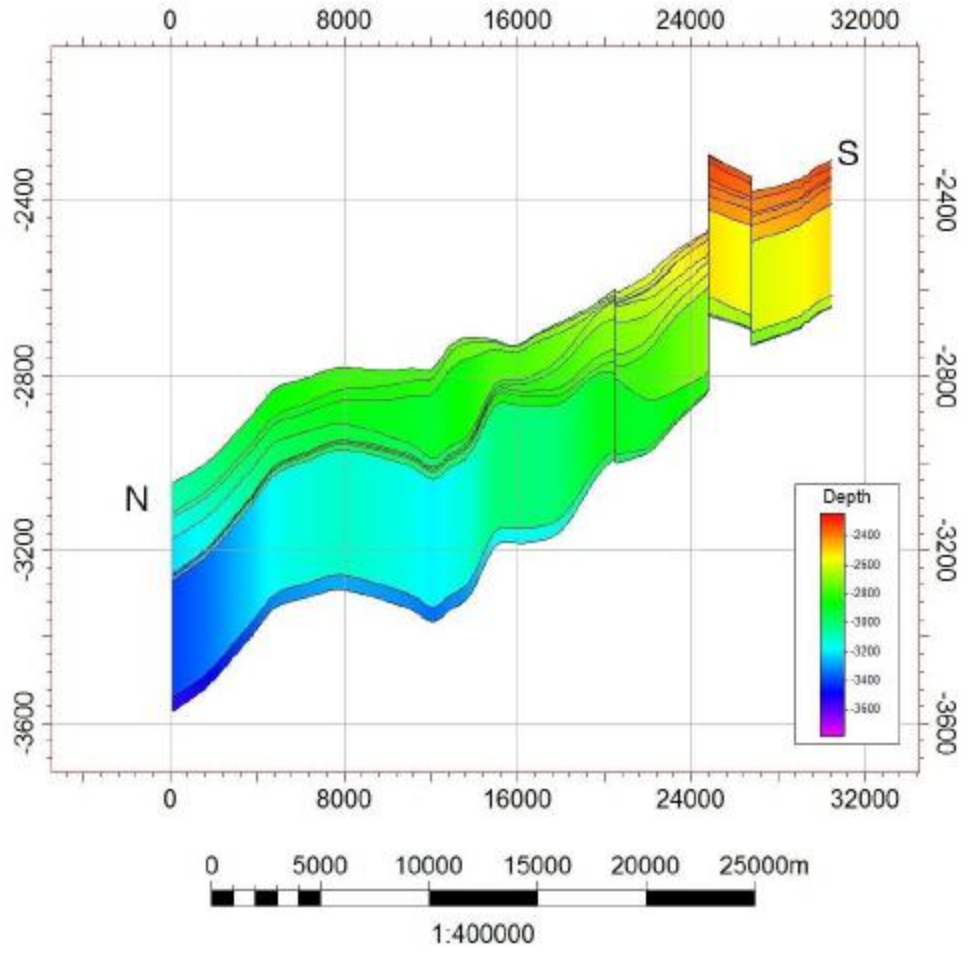


Fig. 1.1.18_83 Przekrój pionowy w płaszczyźnie N-S bryły modelu

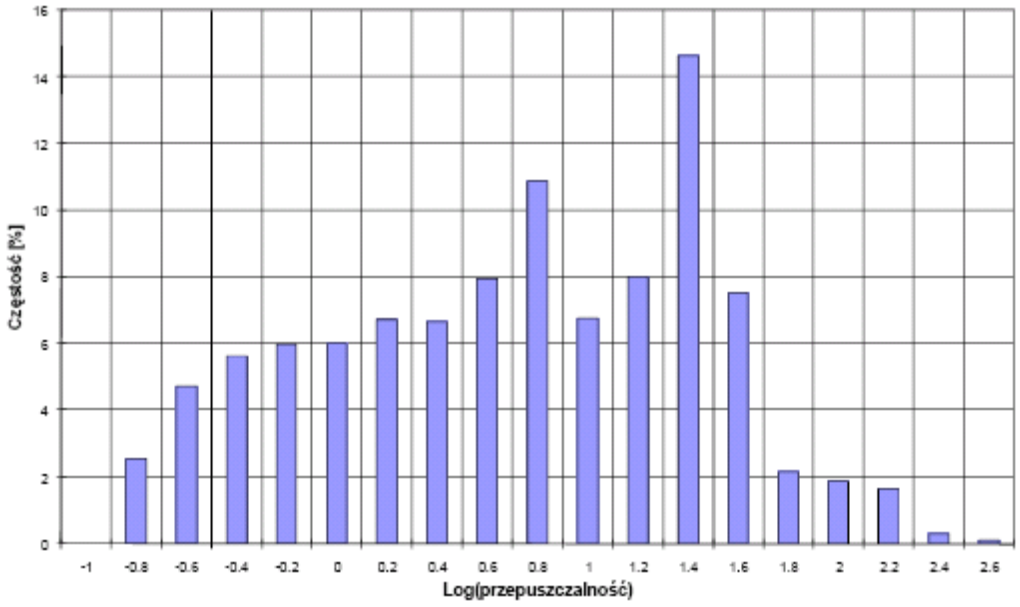


Fig. 1.1.18_84 Histogramy przepuszczalności

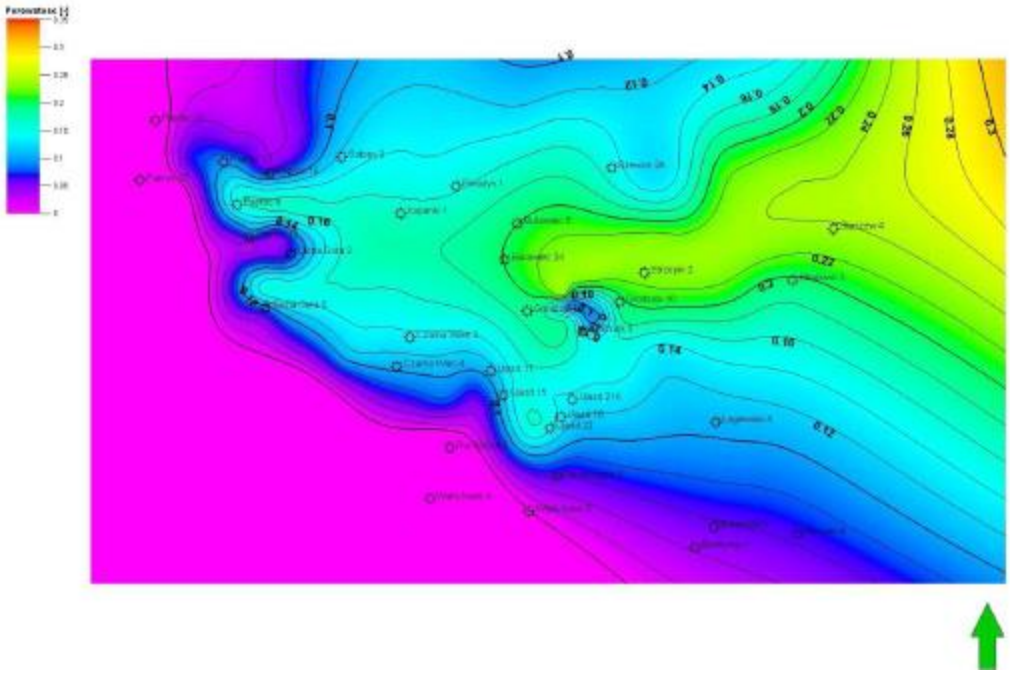


Fig. 1.1.18_85 Porowatość efektywna warstwy k=2 formacji czerwonego spągowca w analizowanym obszarze niecki poznańskiej

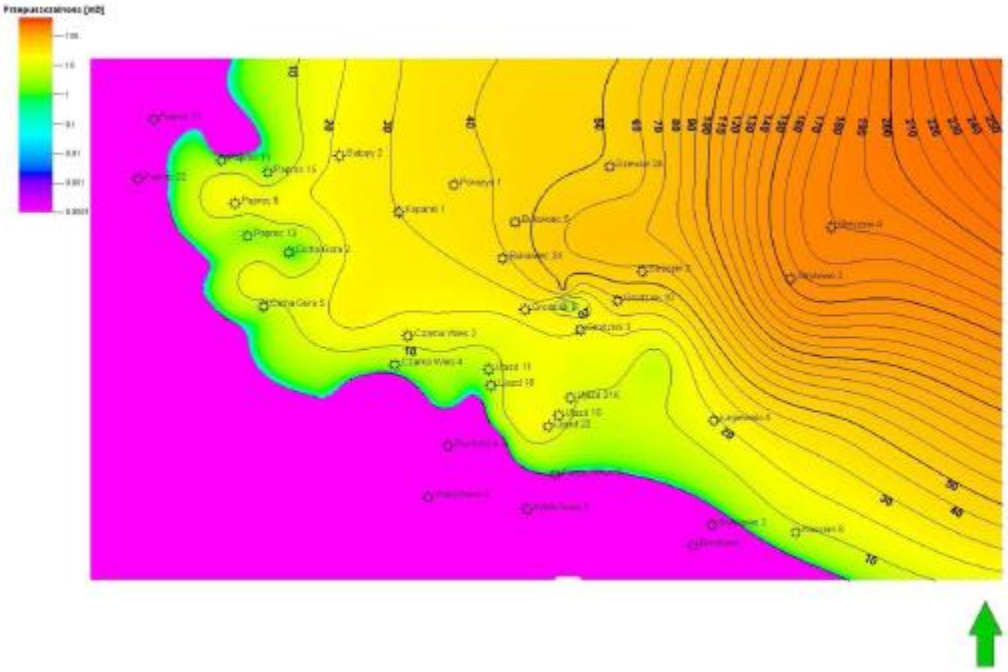


Fig. 1.1.18_86 Przepuszczalność warstwy k=2 formacji czerwonego spągowca w analizowanym obszarze niecki poznańskiej

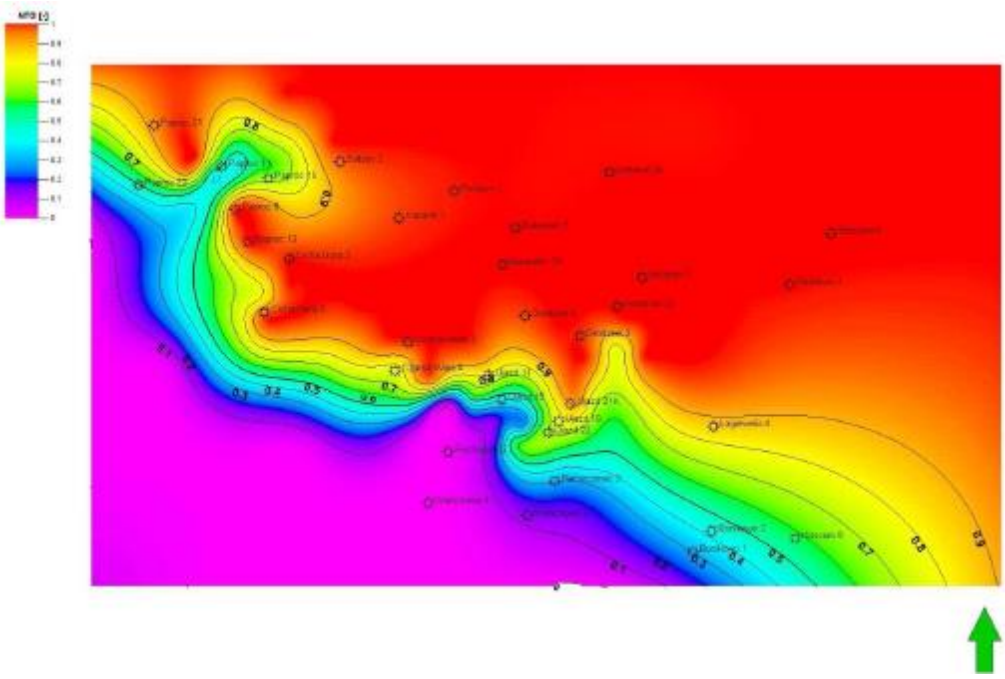


Fig. 1.1.18_87 Stosunek NTG w warstwie k=1 formacji czerwonego spągowca w analizowanym obszarze niecki poznańskiej

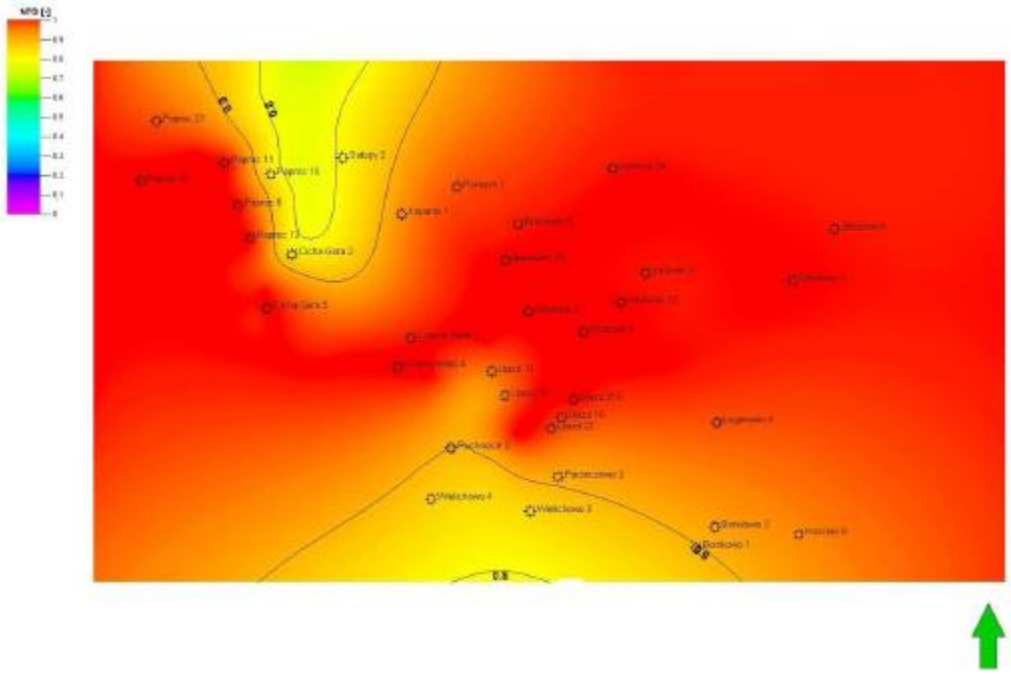


Fig. 1.1.18_88 Stosunek NTG w warstwie k=2 formacji czerwonego spągowca w analizowanym obszarze niecki poznańskiej

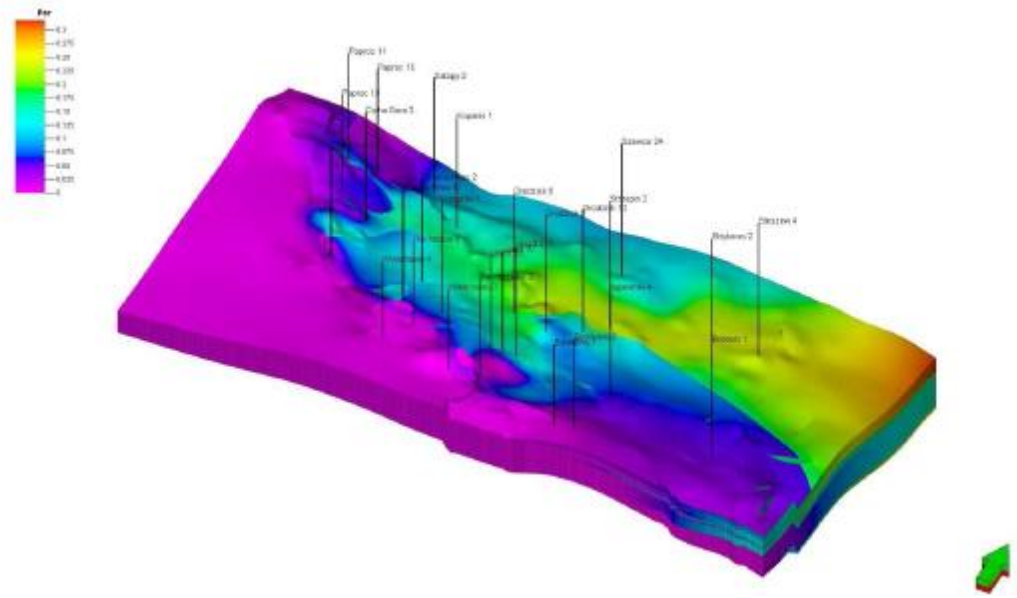


Fig. 1.1.18_89 Widok bryły modelu z rozkładem porowatości

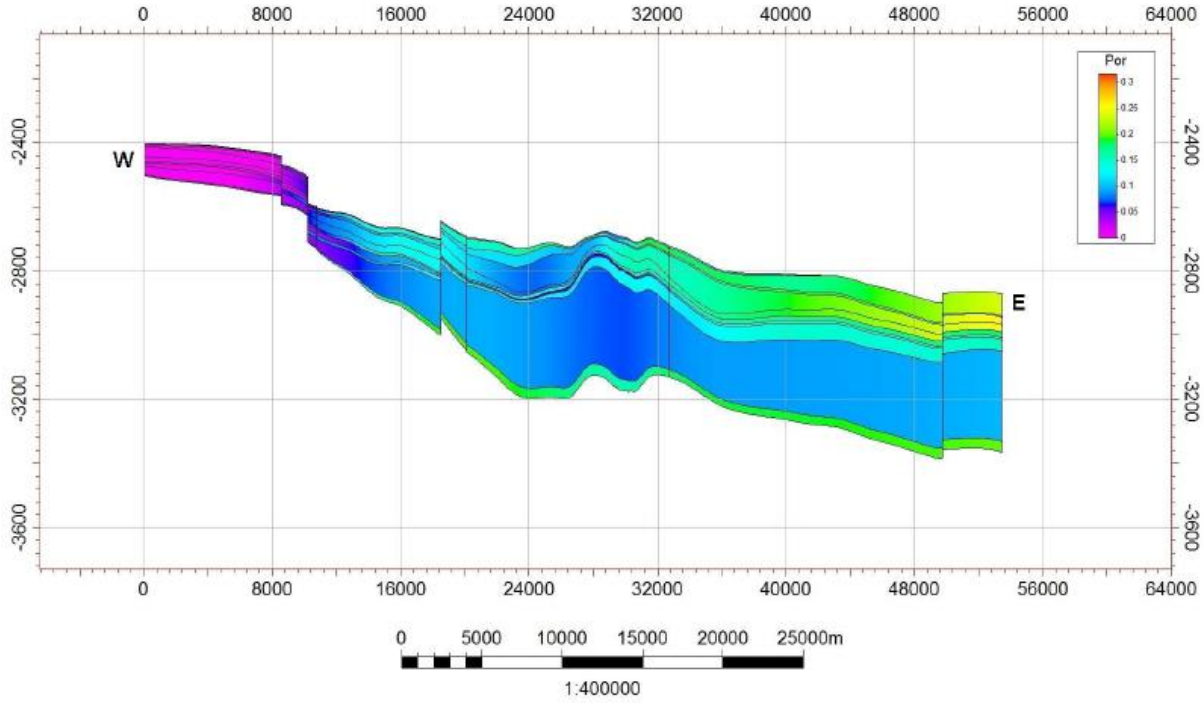


Fig. 1.1.18_90 Przekrój pionowy bryły modelu w płaszczyźnie W-E z rozkładem porowatości

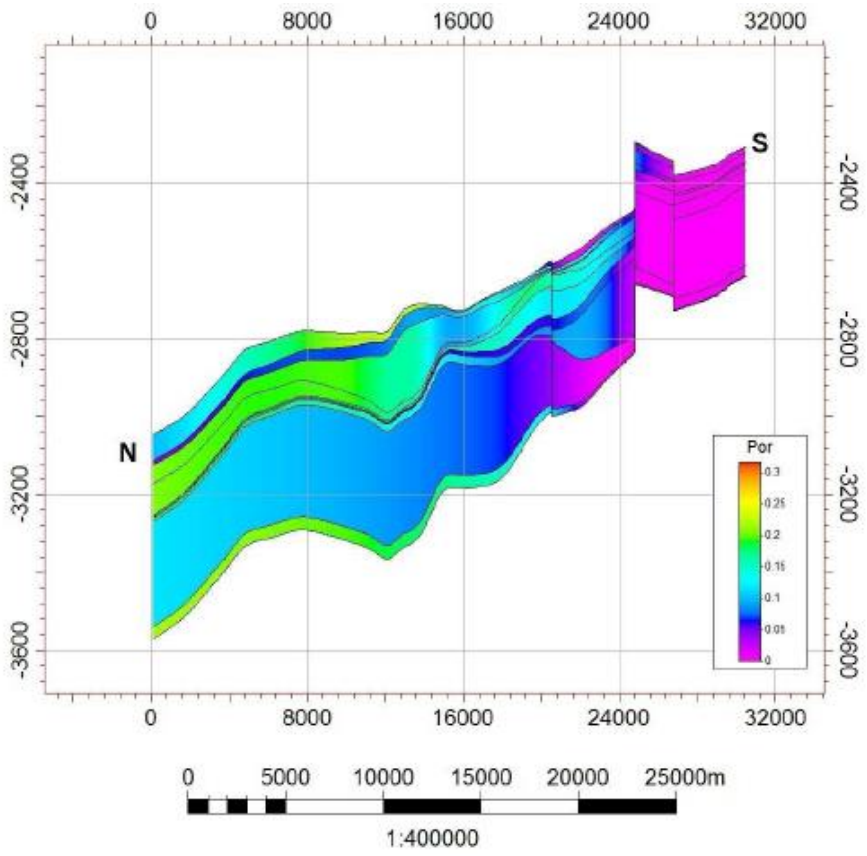


Fig. 1.1.18_91 Przekrój pionowy bryły modelu w płaszczyźnie N-S z rozkładem porowatości

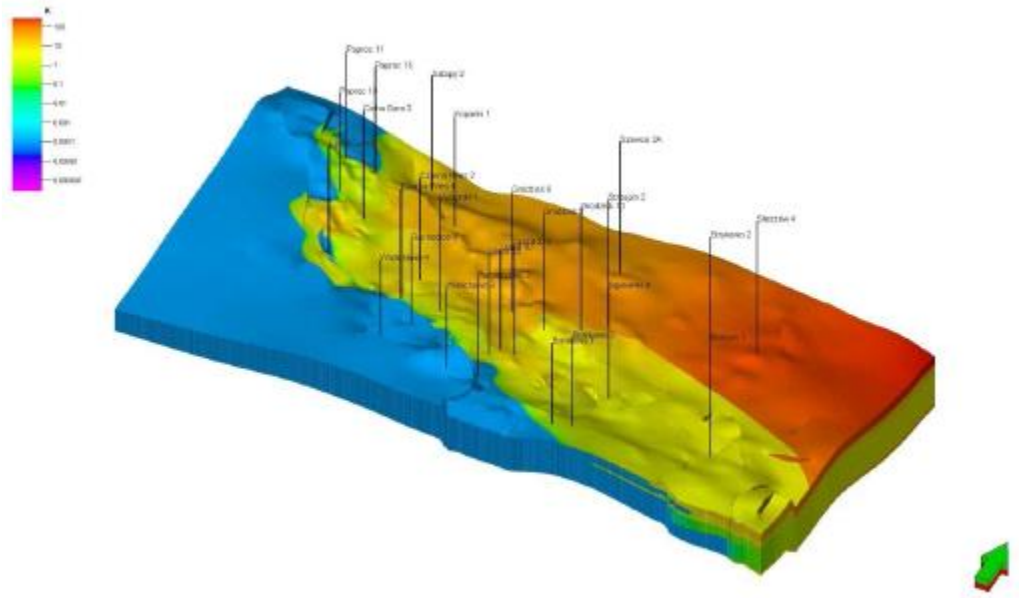


Fig. 1.1.18_92 Widok bryły modelu z rozkładem przepuszczalności

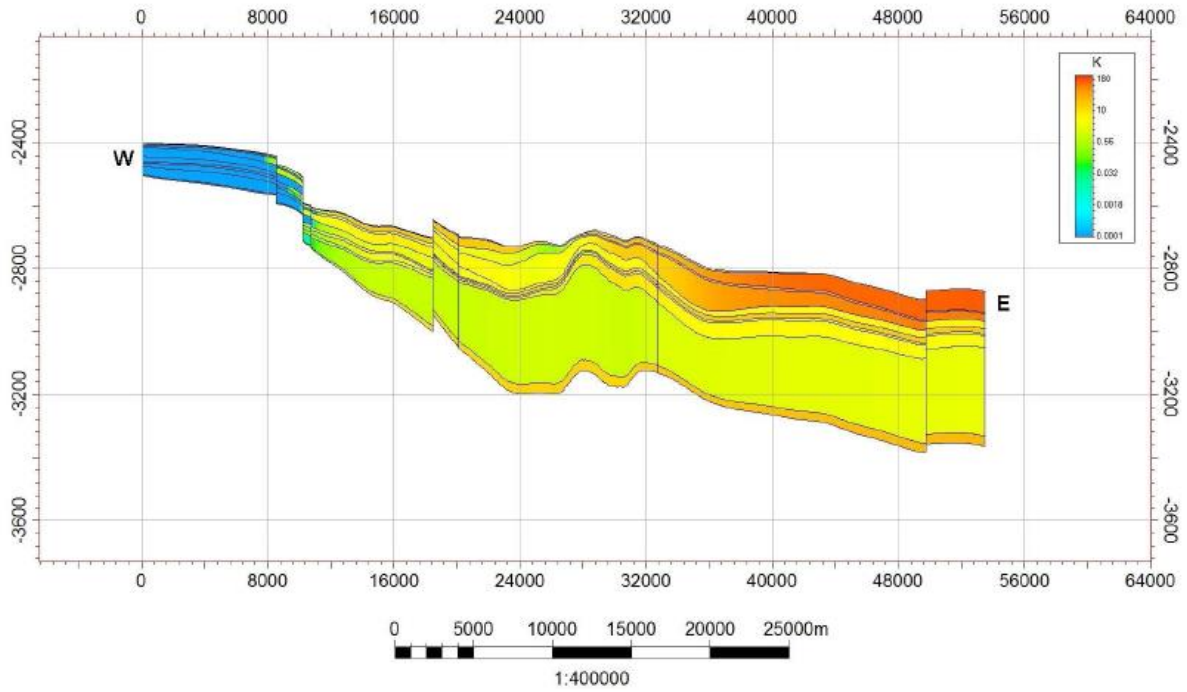


Fig. 1.1.18_93 Przekrój pionowy bryły modelu w płaszczyźnie W-E z rozkładem przepuszczalności

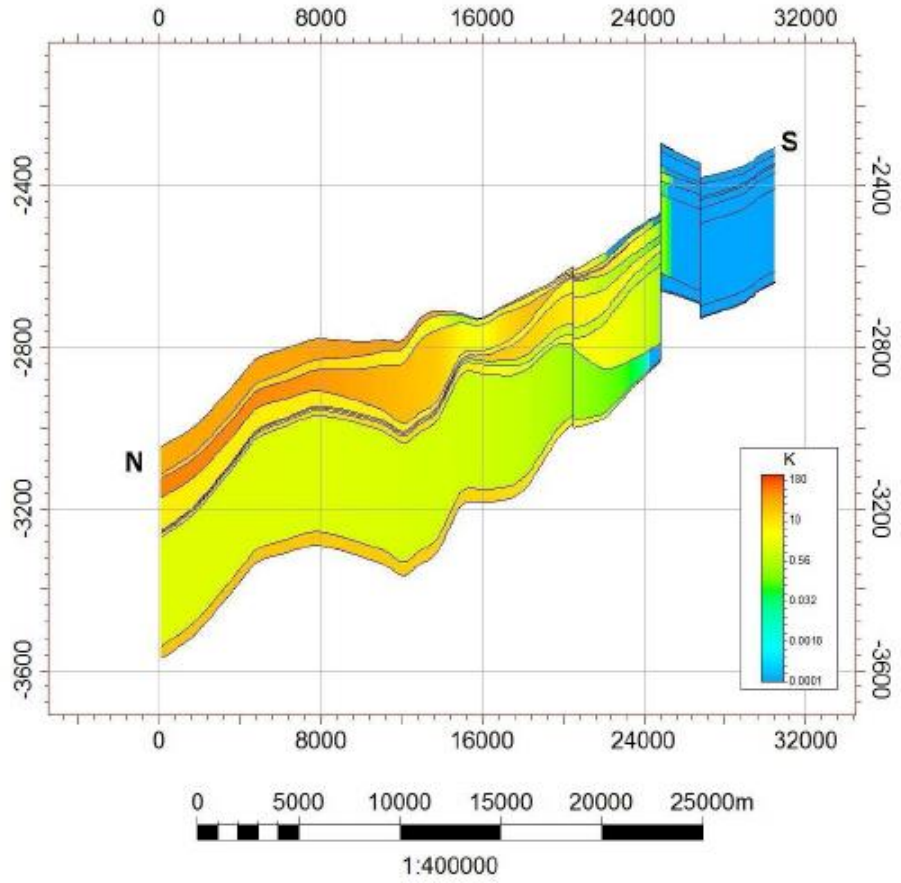


Fig. 1.1.18_94 Przekrój pionowy bryły modelu w płaszczyźnie N-S z rozkładem przepuszczalności

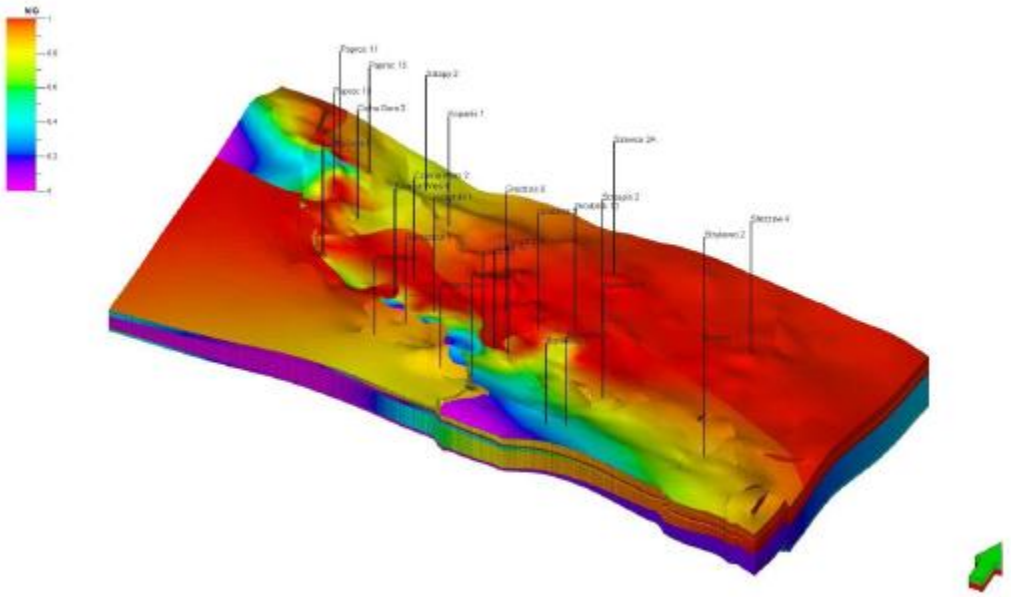


Fig. 1.1.18_95 Widok bryły modelu z rozkładem NTG

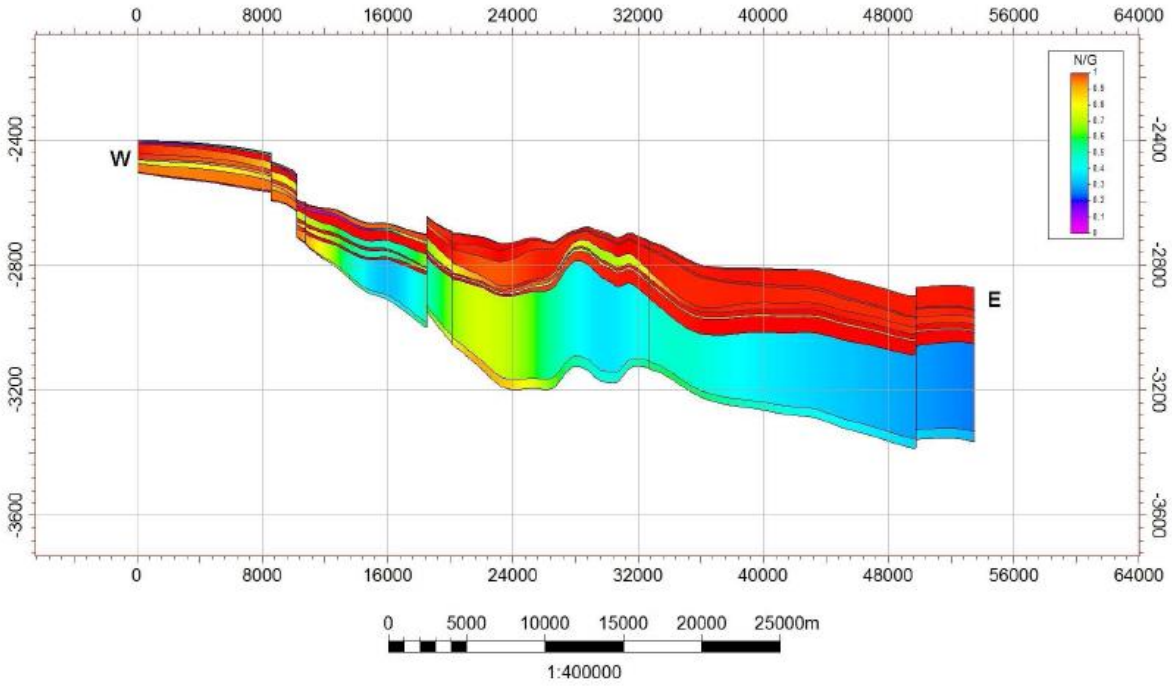


Fig. 1.1.18_96 Przekrój pionowy bryły modelu w płaszczyźnie W-E z rozkładem NTG

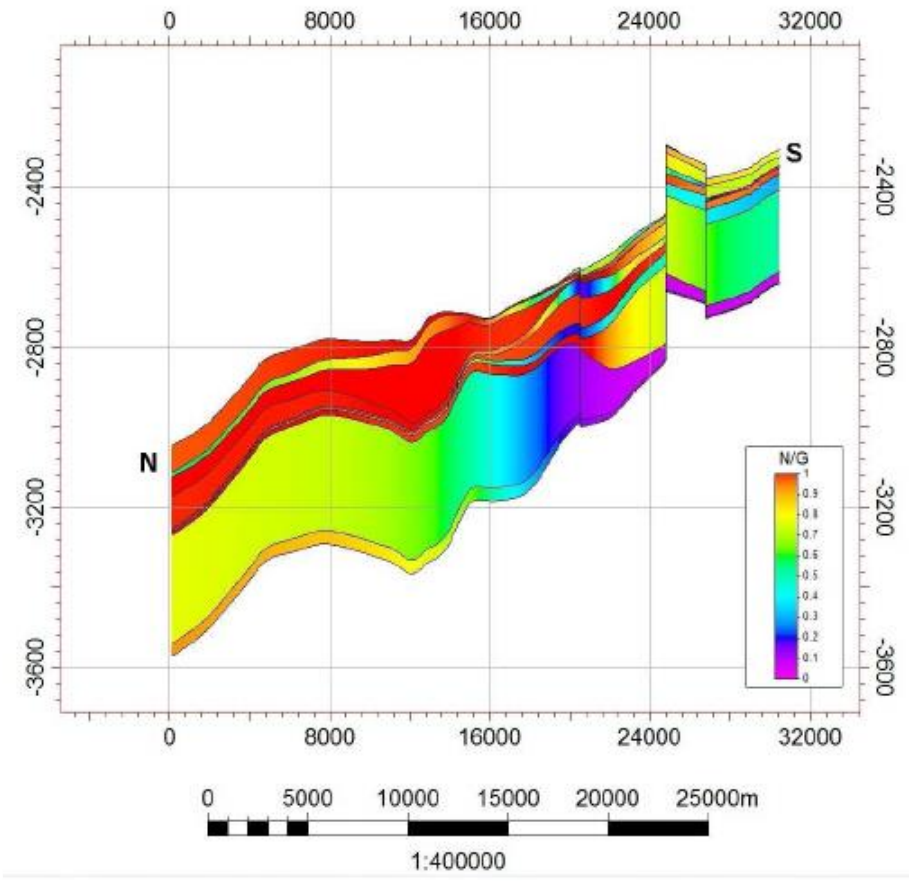


Fig. 1.1.18_97 Przekrój pionowy bryły modelu w płaszczyźnie N-S z rozkładem NTG

Jak wynika jednoznacznie z przytoczonych wyżej figur, przedstawione modele charakteryzują się zbyt niską szczegółowością, aby mogły być podstawą do zaprezentowania rzetelnego programu monitoringu efektu zatłaczania CO2 do formacji skalnych.

Przedmiotem monitoringu jest bowiem śledzenie i analizowanie przemieszczania się frontu „bańki gazowej" w formacji przeznaczonej na składowisko oraz zmian parametrów ośrodka odpowiedzialnych za bezpieczny przebieg sekwestracji. Bezpieczny w sensie oddziaływania na środowisko (wytrzymałość ośrodka, zagrożenie dla akwenów oraz wód wgłębnych) i społeczeństwo.

Dlatego do przedstawienia niniejszego programu monitoringu wykorzystano ideę studium wykonalności, która stosowana jest przy realizacji sejsmiki 4D, uznawanej za najbardziej poprawną technologię monitoringu.

Zaproponowana metodyka zostanie przedstawiona poniżej.

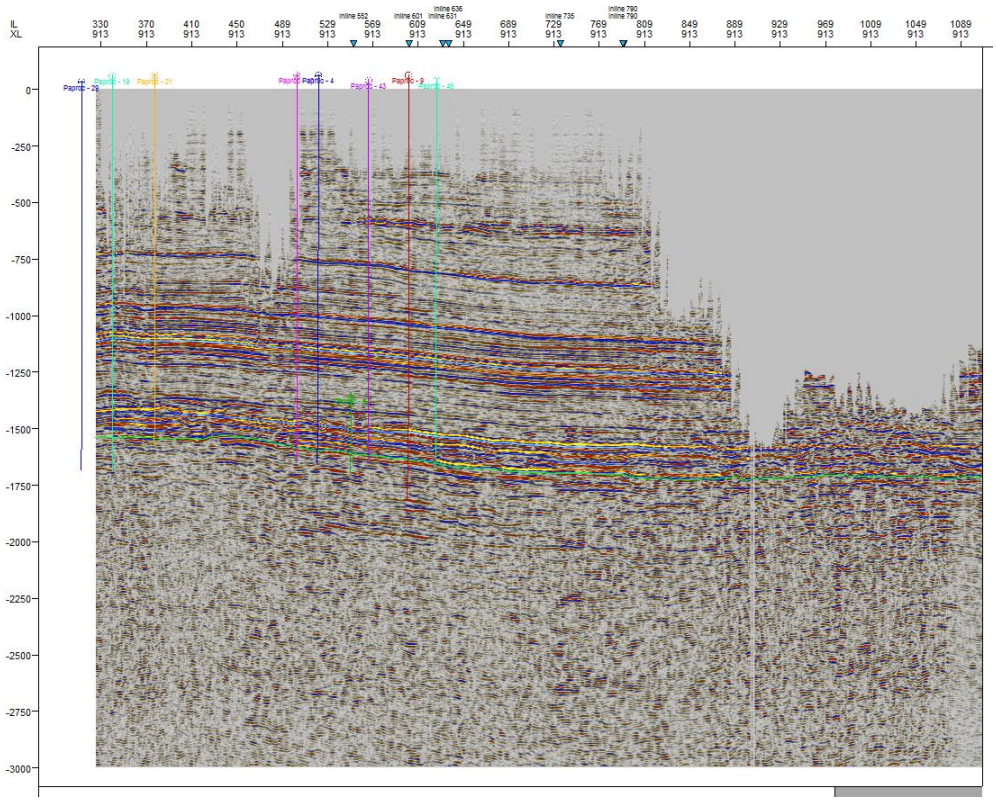


Fig. 1.1.18_98 Profil sejsmicznyXL913, otwory: P-29, P-19, P-21, P-10, P-4, P-43, P-9, P-46

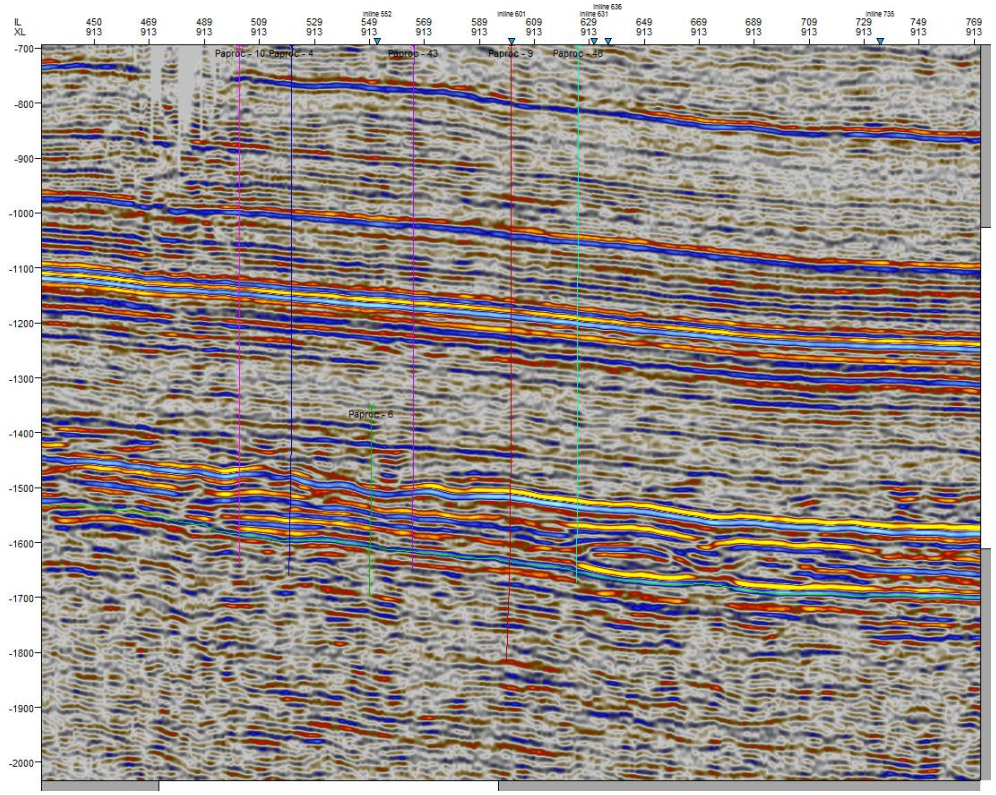


Fig. 1.1.18_99 Profil sejsmiczny XL913, otwory: P-10, P-4, P-6, P-43, P-9, P-46 - zoom

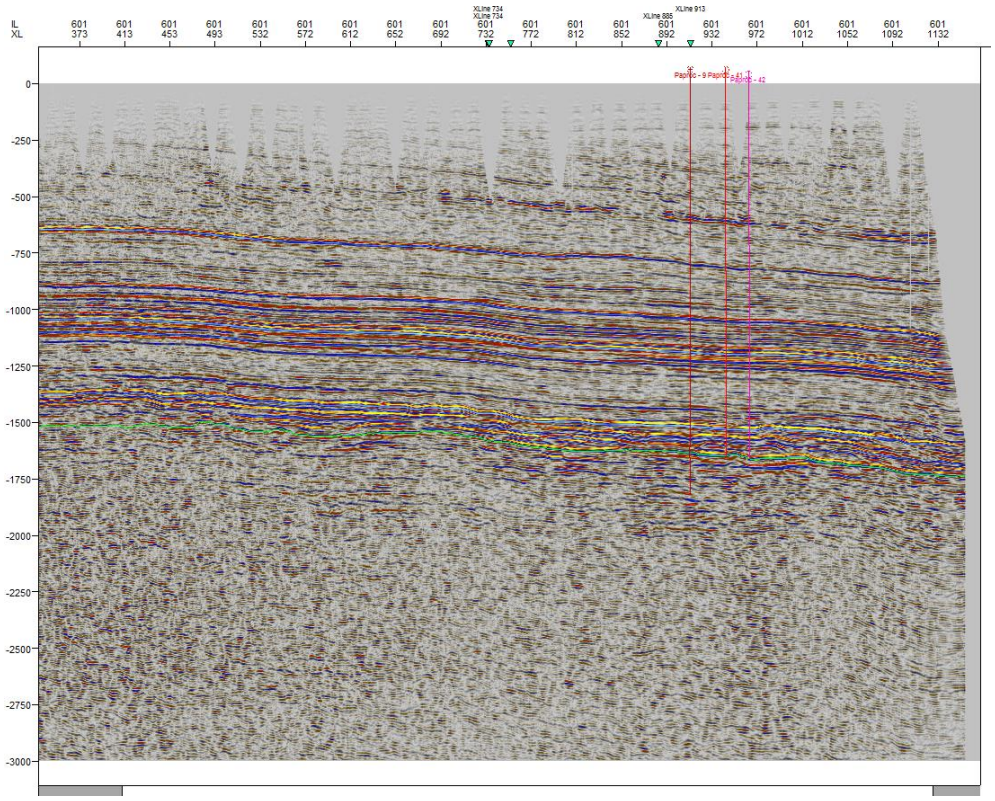


Fig. 1.1.18_100 Profil sejsmiczny IL601; otwory: P-9, P-41, P-42

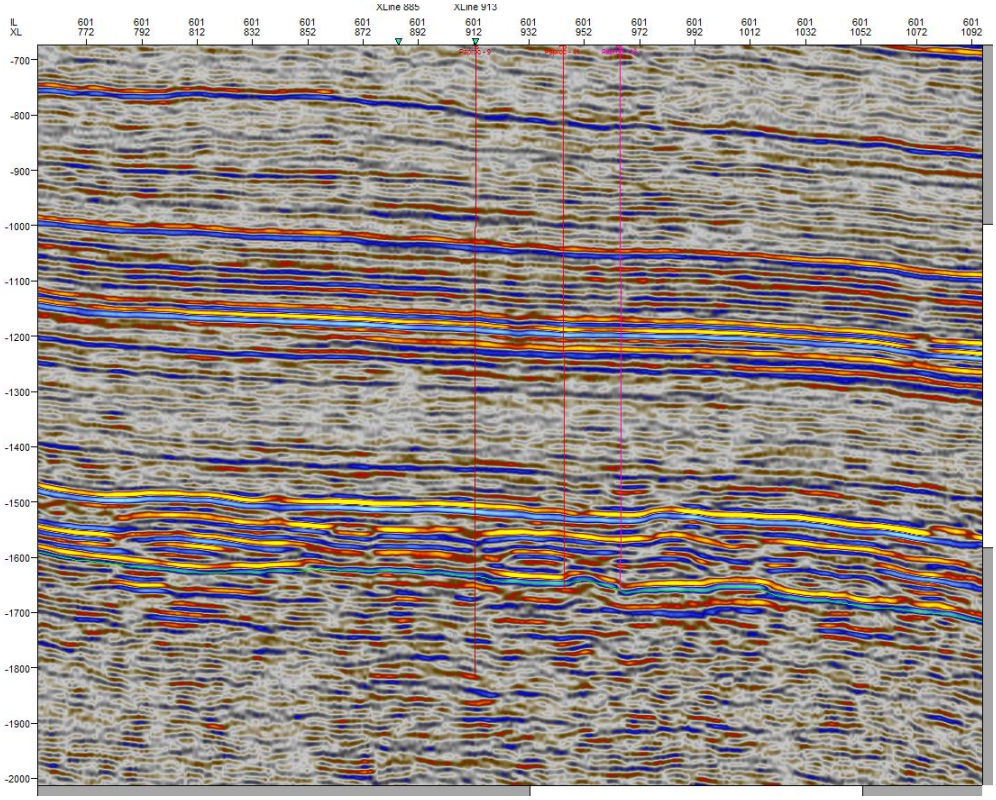


Fig. 1.1.18_101 Profil sejsmiczny IL601; otwory: P-9, P-41, P-42 -zoom

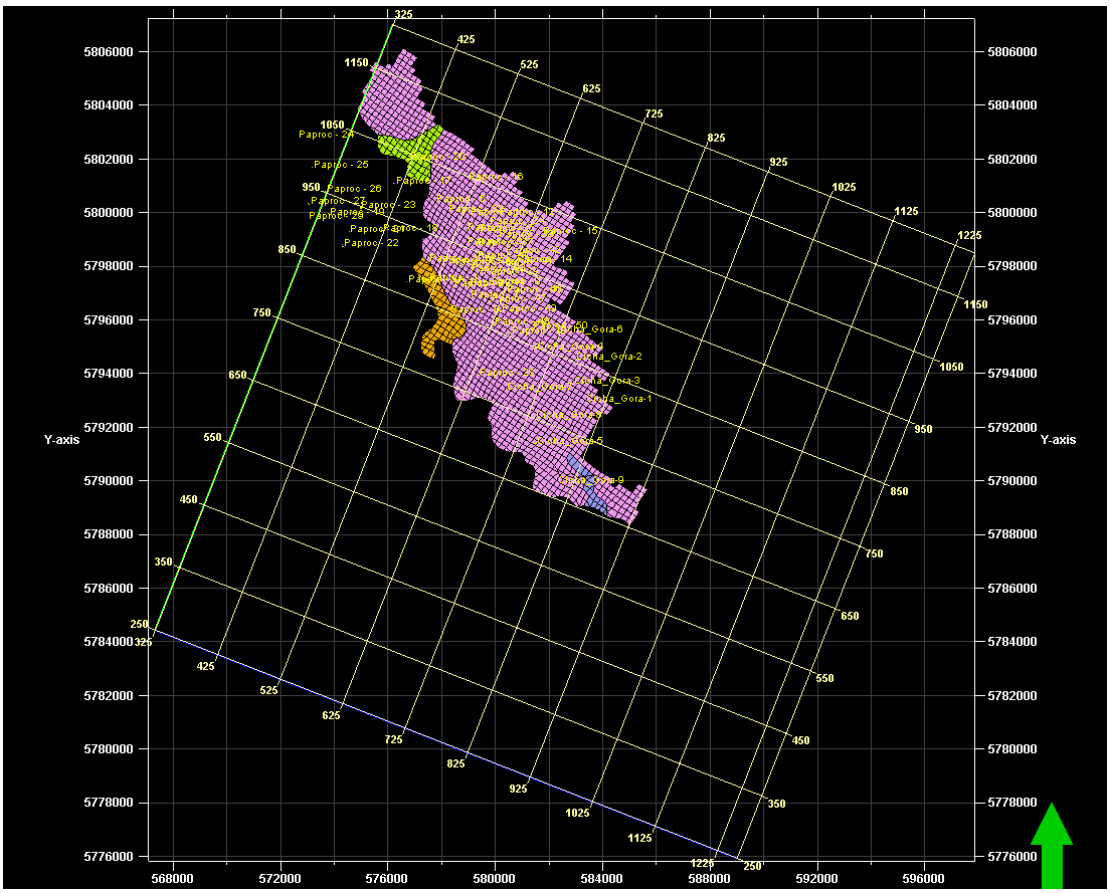


Fig. 1.1.18_102 Powierzchnia złoża Paproć na tle zdjęcia sejsmiki 3D

Wybrane informacje charakteryzujące złoże Paproć [wg Sowiżdżał K., 2009].

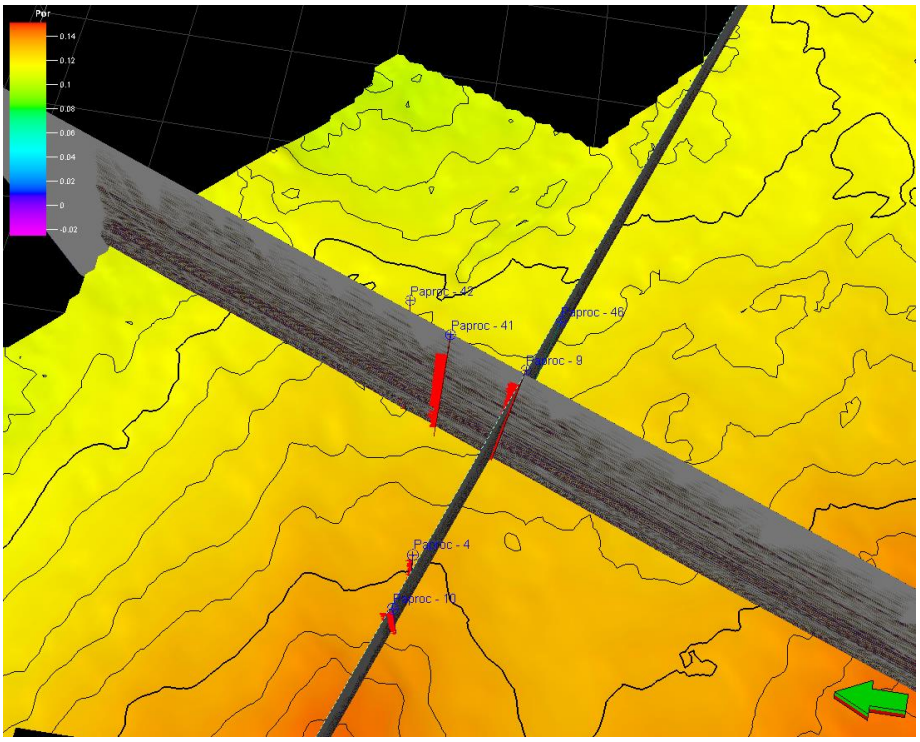


Fig. 1.1.18_103 IL601, XL913 i otwory w odległości <100 m od profili

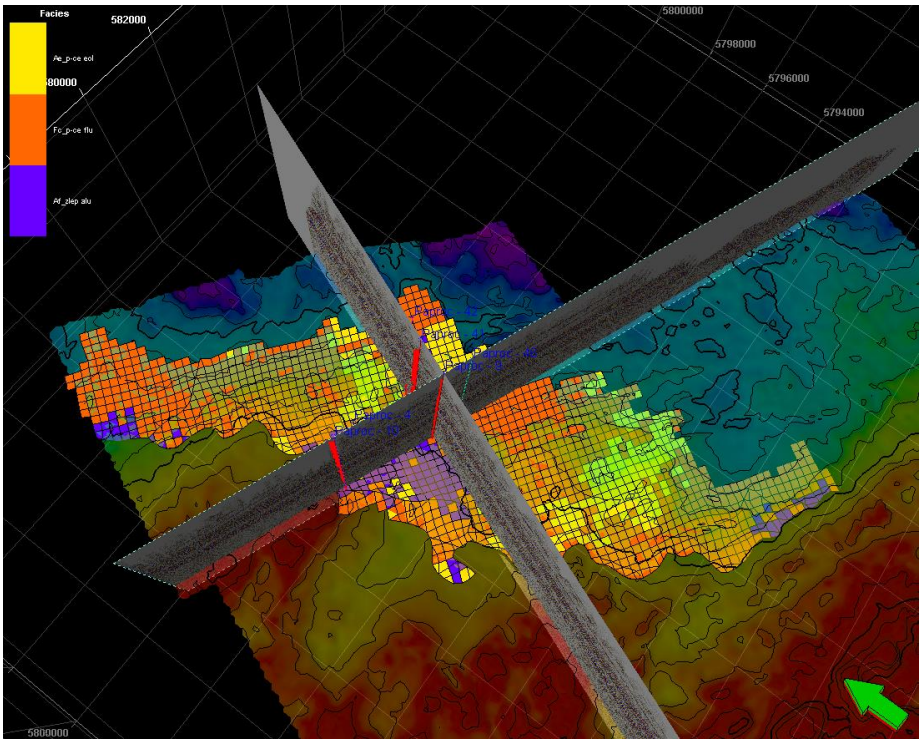


Fig. 1.1.18_104 IL601, XL913 i otwory w odległości <100 m od profili; zarys złoża Paproć

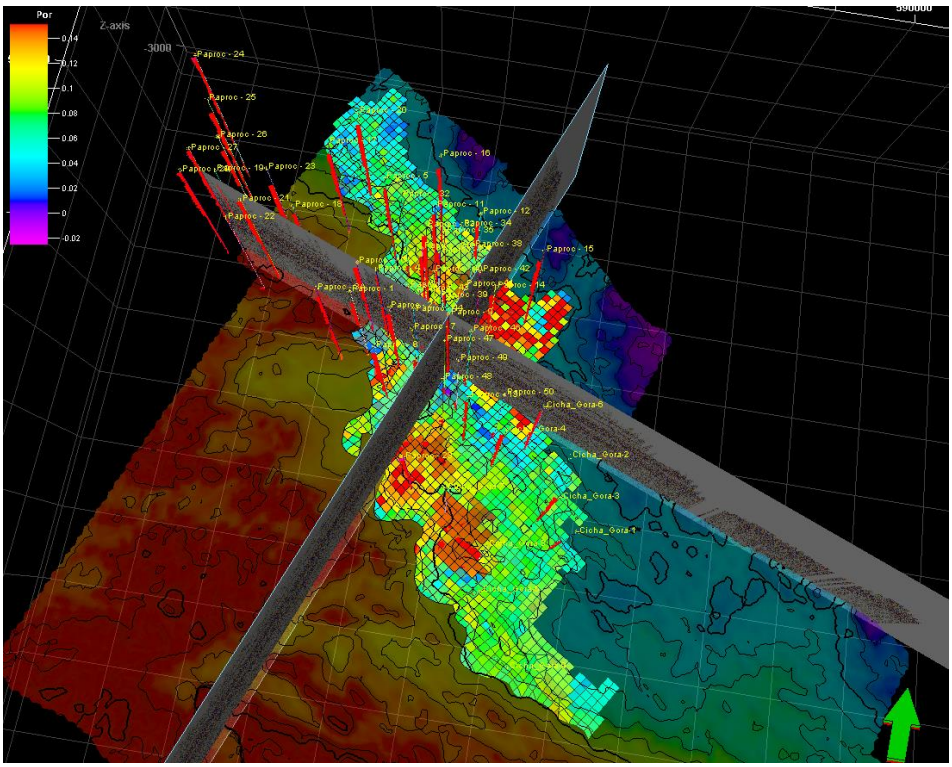


Fig. 1.1.18_105 Profile sejsmiczne, powierzchnia Zsp, zarys złoża Paproć

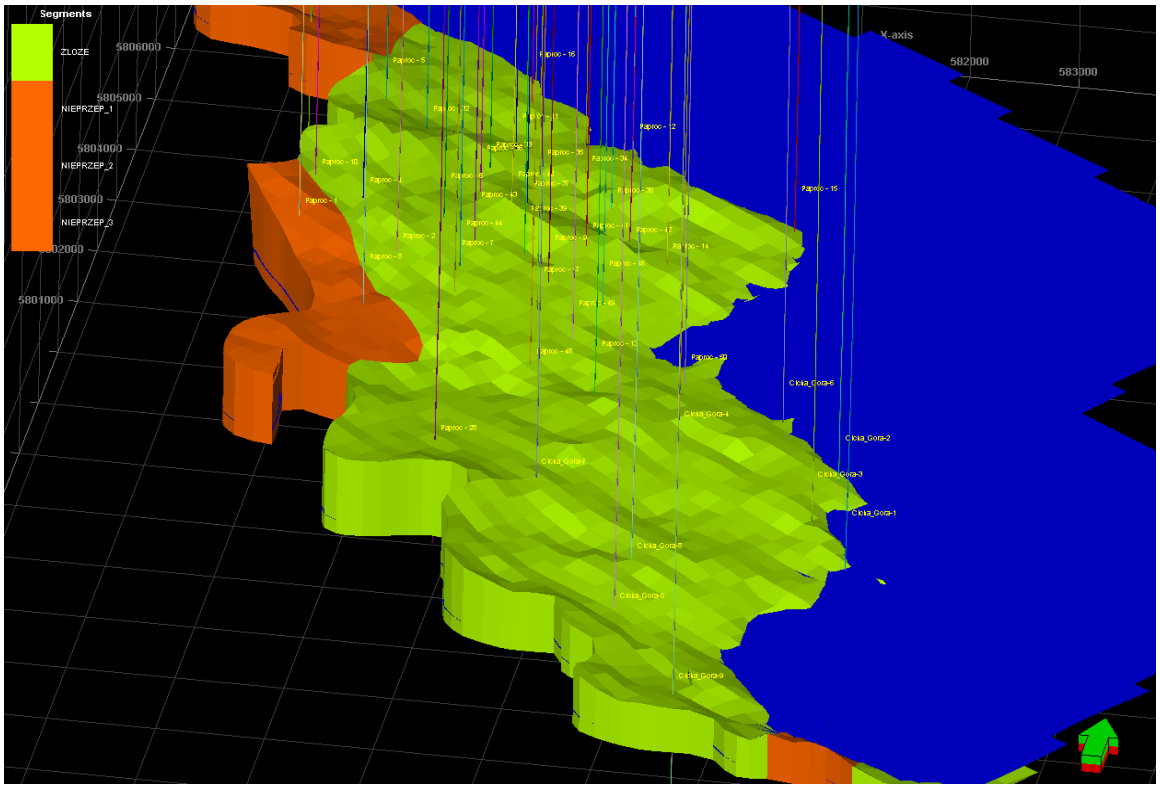


Fig. 1.1.18_106 Nieprzepuszczalne segmenty modelu złoża Paproć wraz z płaszczyzną konturu wody złożowej

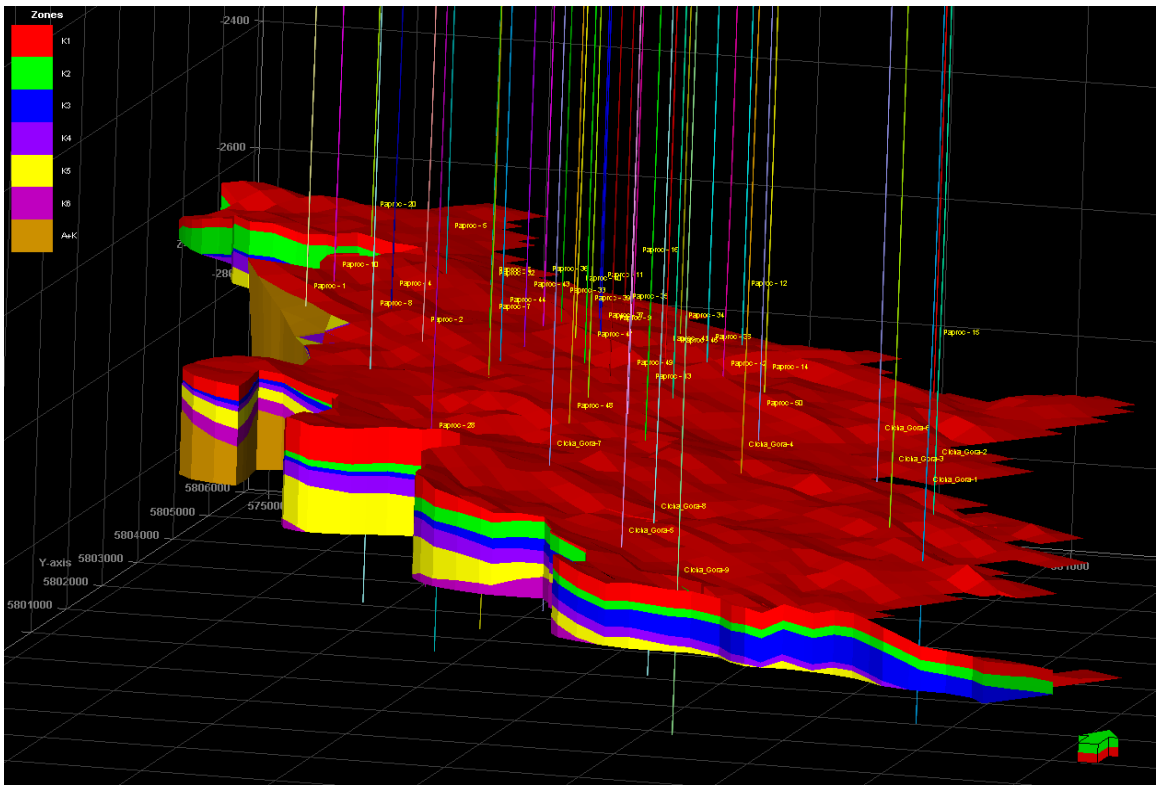


Fig. 1.1.18_107 Wizualizacja podziału modelu na kompleksy osadowe PAPROĆ

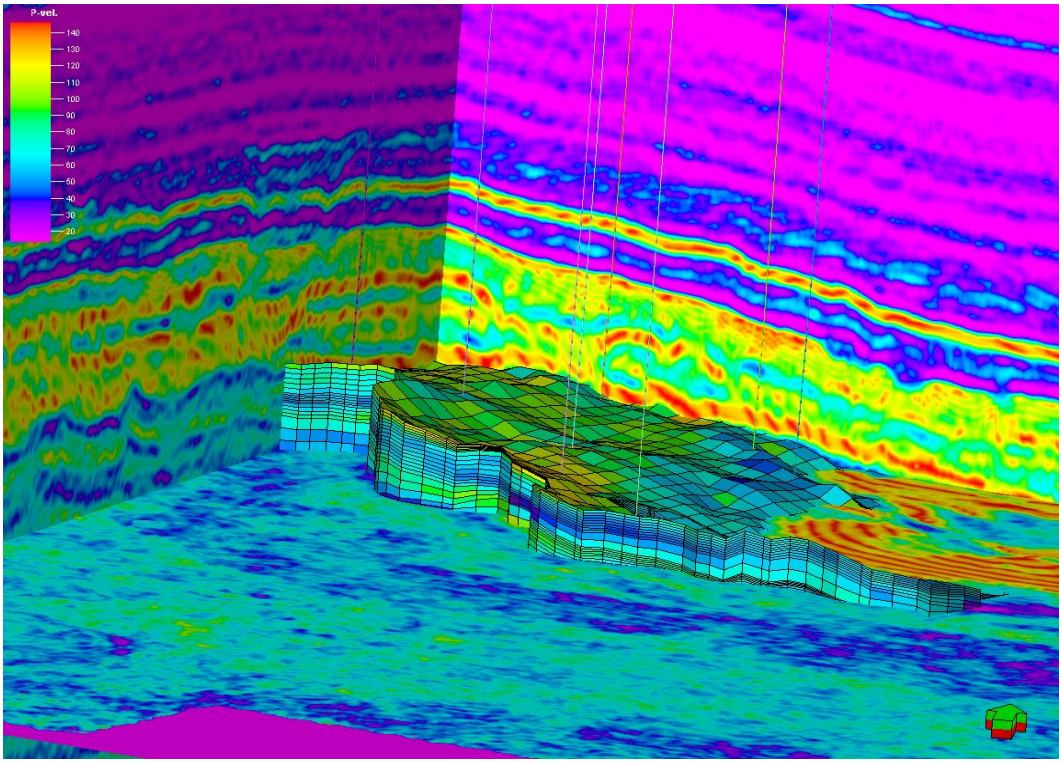


Fig. 1.1.18_108 Wynik zastosowania procedury resampling na głębokościowym wolumenie wyniku inwersji sejsmicznej

Wybrane informacje charakteryzujące złoże Czarna Wieś – Parzęczewo [wg Leśniak G., Sowiżdżał K., 2010]

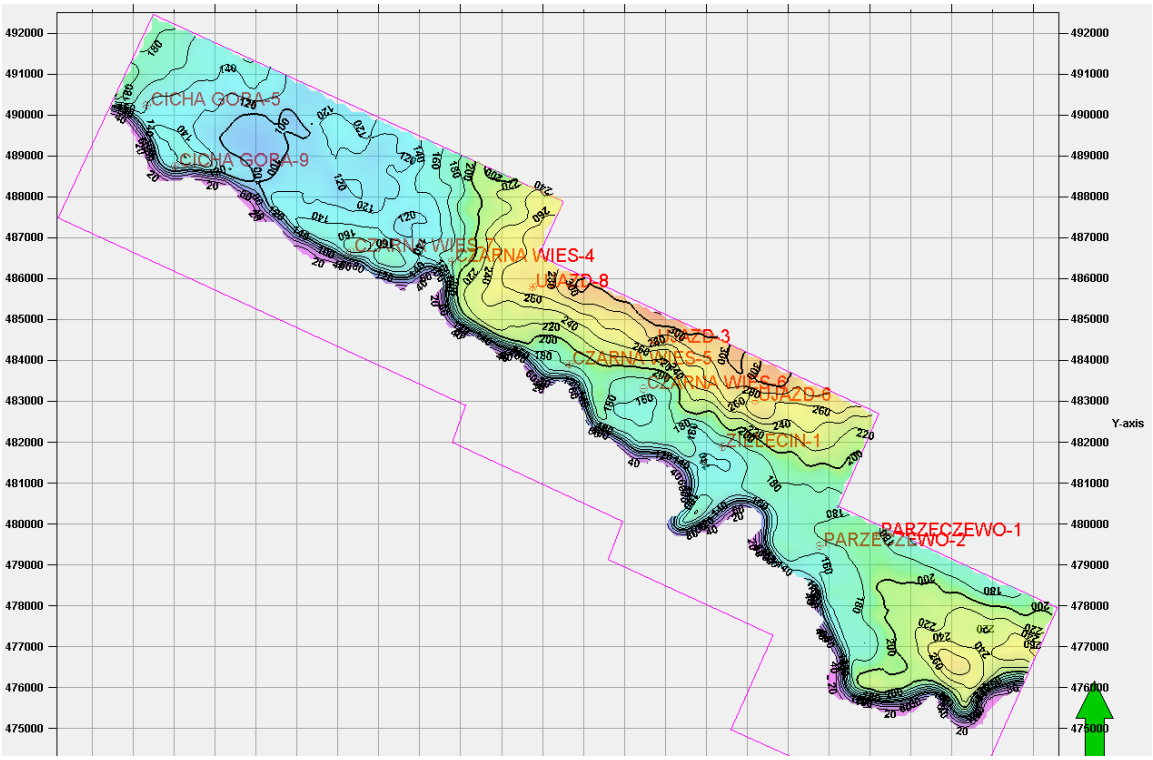


Fig. 1.1.18_109 Parzęczewo - Czarna Wieś – mapa miąższości czerwonego spągowca górnego

Tab. 1.1.18_18 Zestawienie danych z otworów wiertniczych

Otwór wiertniczy	Seria osadowa czerwonego spągowca (wg miary geof.)	Miąższość osadów górnego czerwonego spągowca	Zespoły depozycyjne	Podłoże serii osadowej górnego czerwonego spągowca
Czarna Wieś-4	2689.5 – 2800.0	> 110.5	E, F, A	-
Czarna Wieś-5	2648.5 – 2830.0	> 181.5	E, F, A	-
Czarna Wieś-6	2655.6 – 2801.0	> 145.4	E, F, A	-
Czarna Wieś-7	2675.0 – 2830.0	> 155.0	E, F, A	-
Parzęczewo-1	2613.0 – 2871.0	258.0	E, F, A	karbon
Parzęczewo-2	2559.5 – 2737.0	> 177.5	E, F, A	-
Ujazd-3	2683.0 – 2960.0	277.0	E, F, A	dolny czerw. spąg.
Ujazd-6	2662.5 – 2902.0	> 239.5	E, F, A	-
Ujazd-8	2704.5 – 2824.0	> 119.5	E, F, A	-
Zielęcin-1	2647.5 – 2805.0	157.5	E, F, A	dolny czerw. spąg.

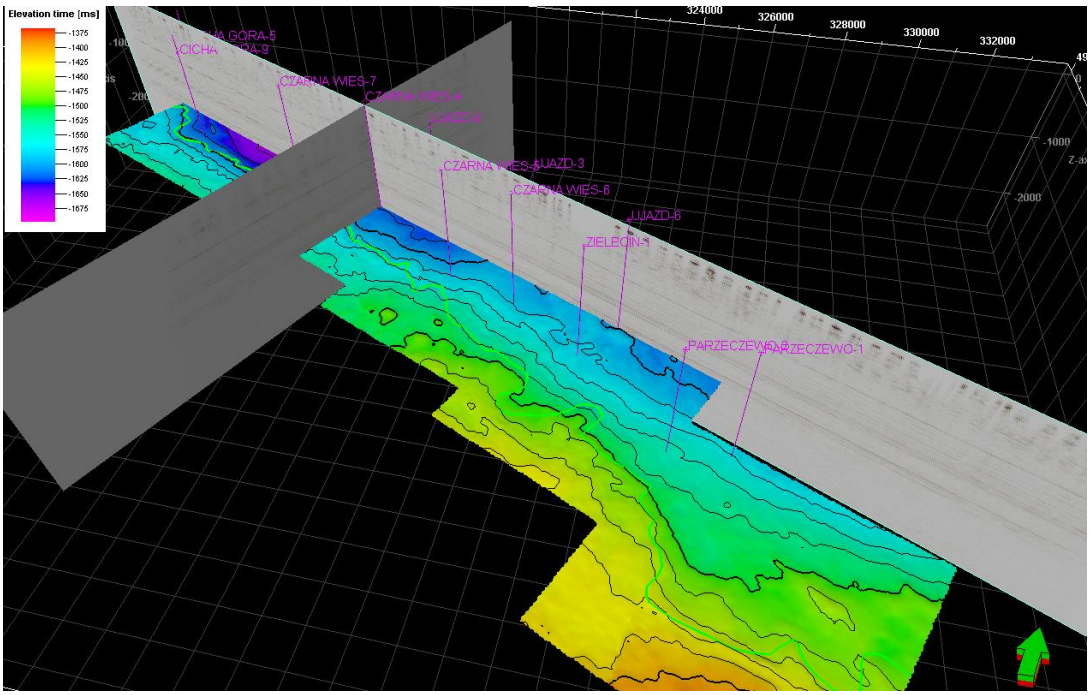


Fig. 1.1.18_110 Zsp_time; otwory

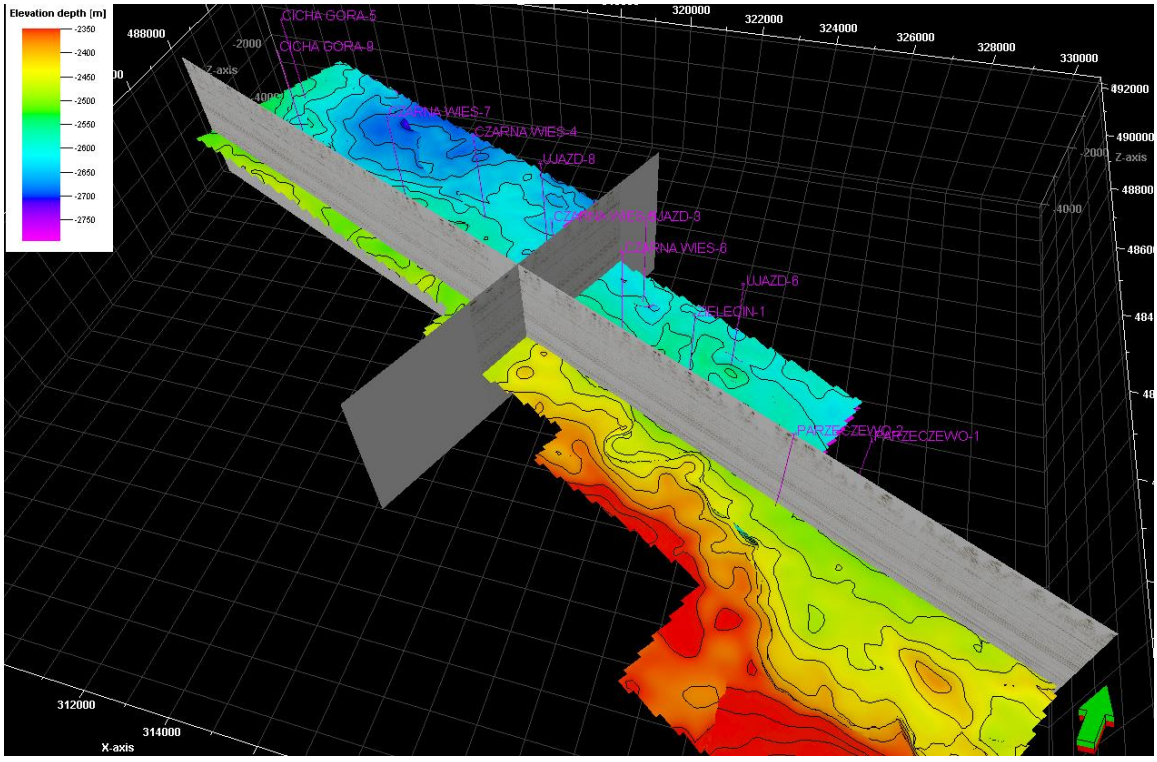


Fig. 1.1.18_111 Zsp_depth; otwory

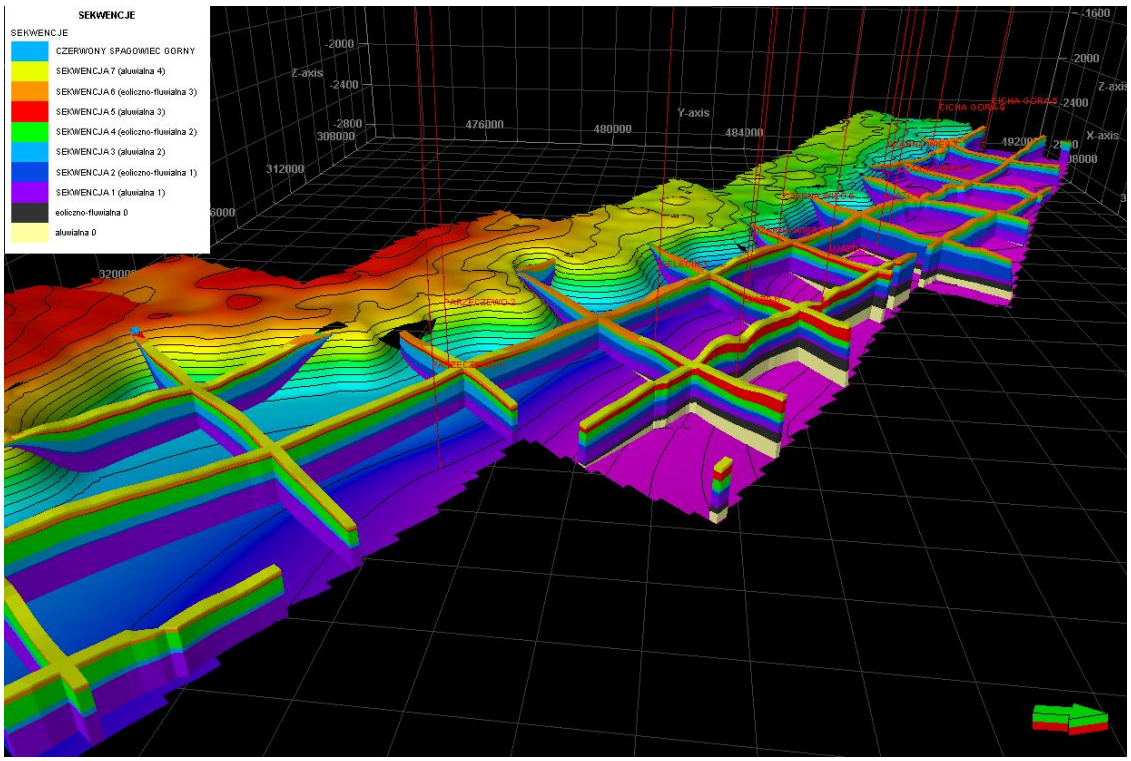


Fig. 1.1.18_112 Sekwencje osadowe górnego czerwonego spągowca

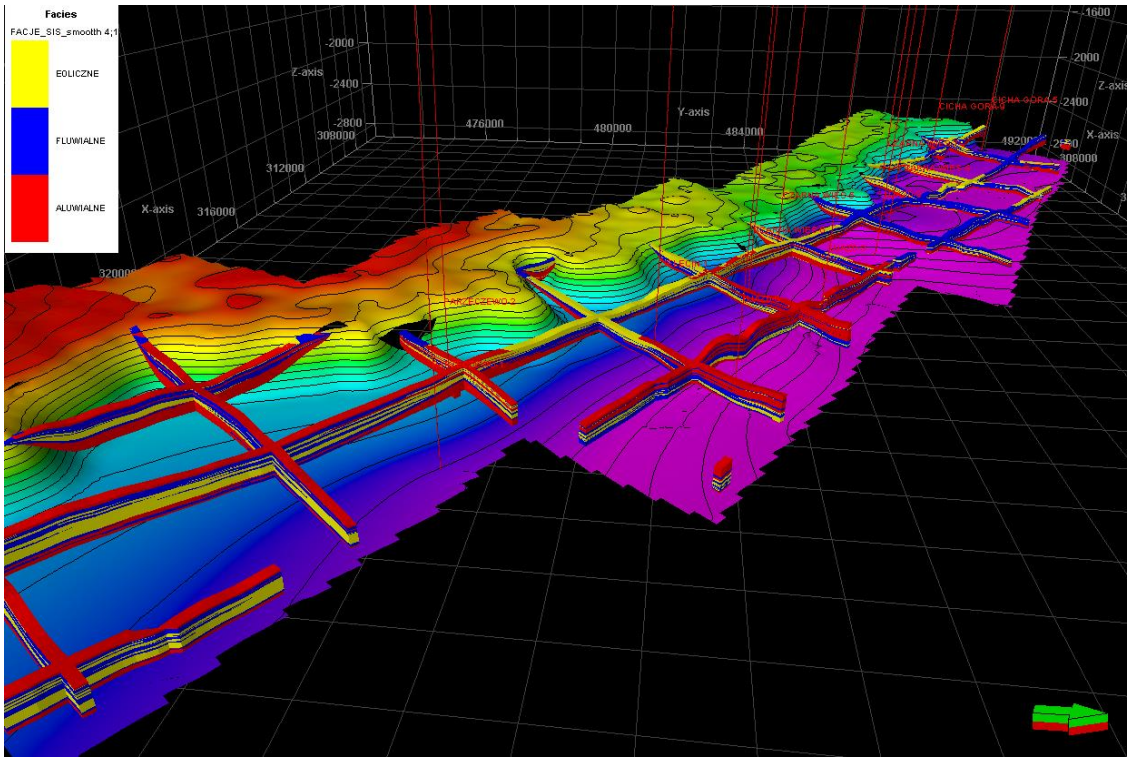


Fig. 1.1.18_113 Model facjalny P1

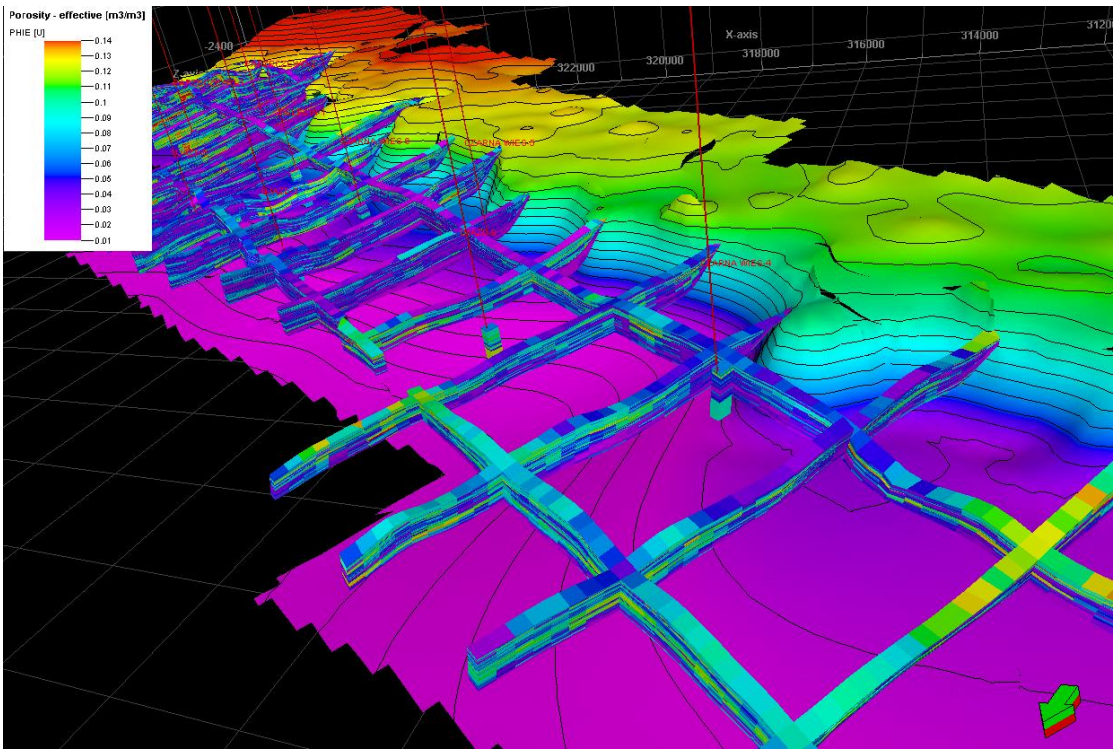


Fig. 1.1.18_114 Model porowatości efektywnej

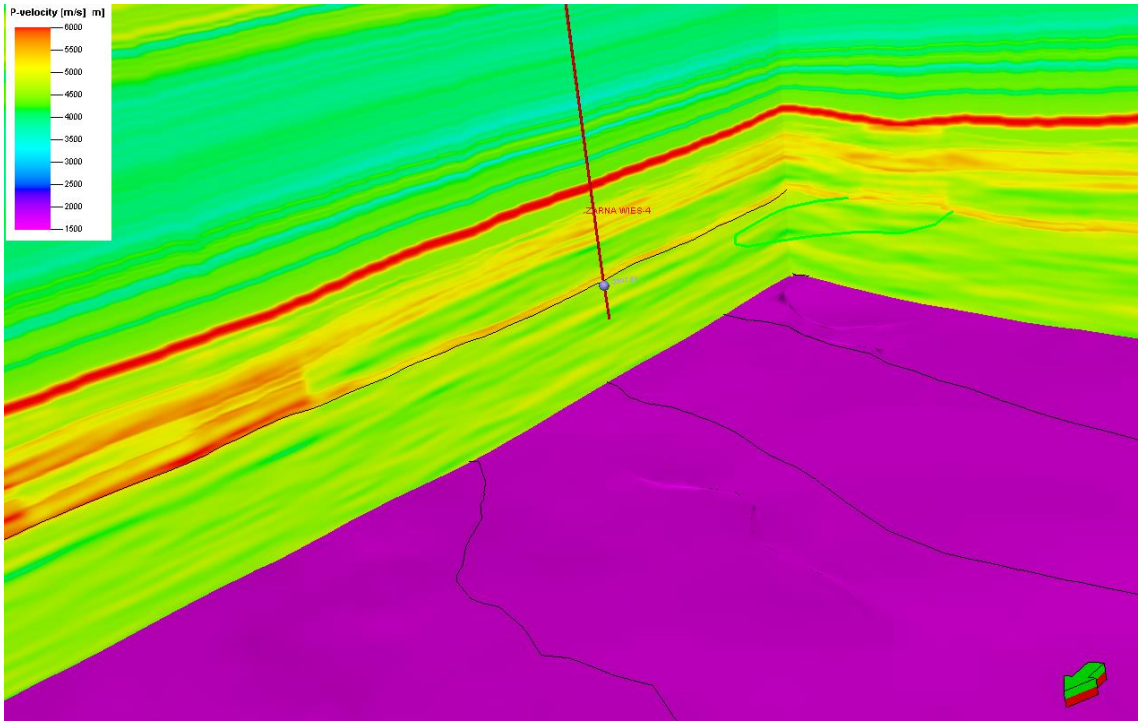


Fig. 1.1.18_115 P-velocity-time

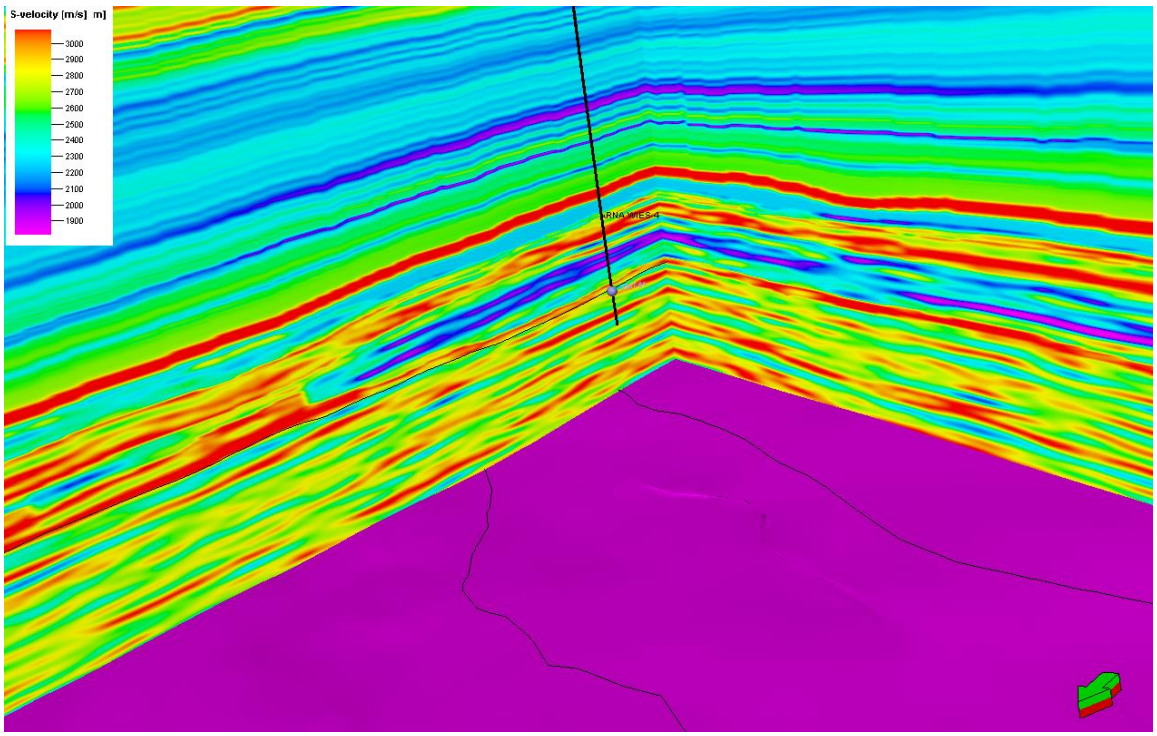


Fig. 1.1.18_116 S-velocity-time

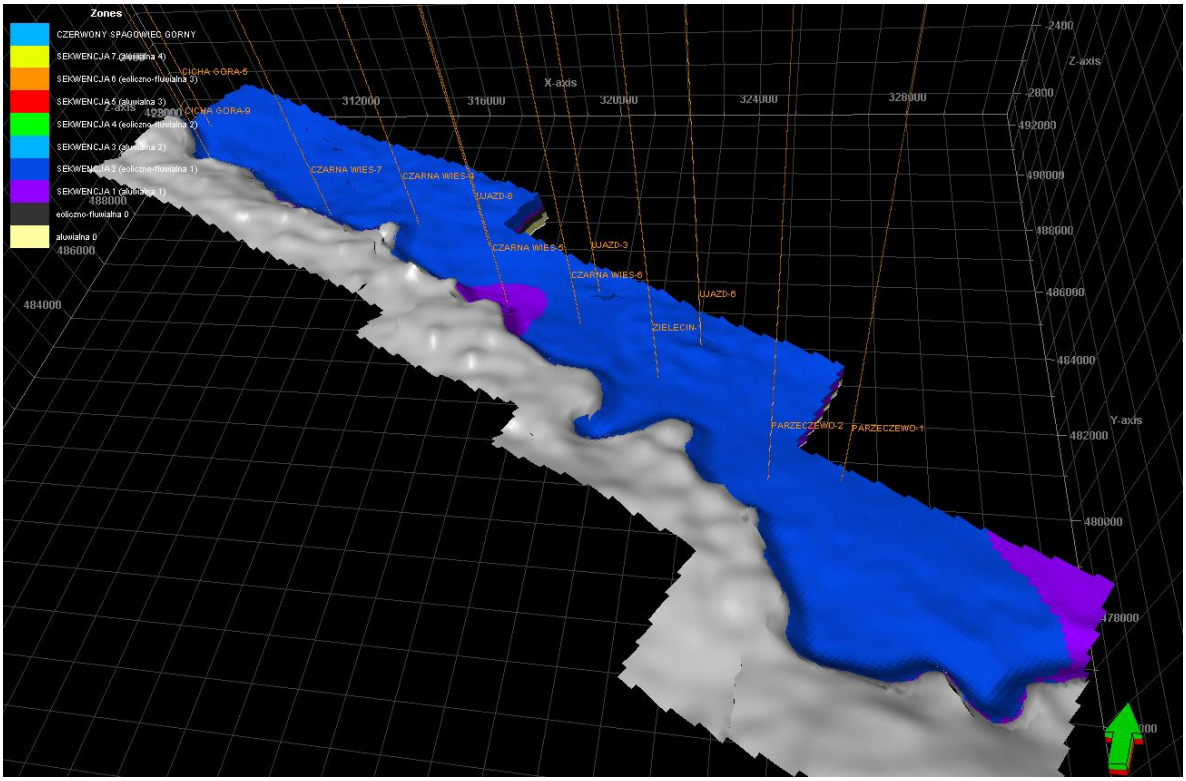


Fig. 1.1.18_117 Mapa zasięgu sekwencji depozycyjnej 2 - eoliczno-fluwialnej EF1- Parzeczewo-Czarna Wieś

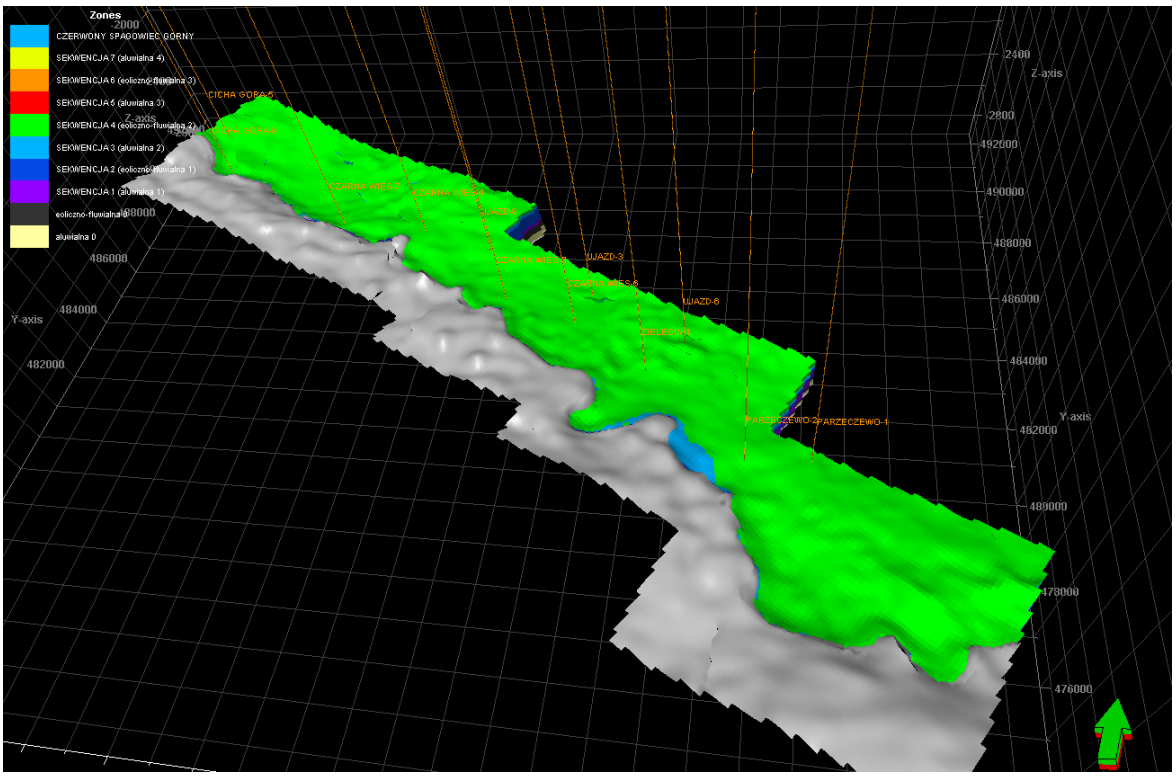


Fig. 1.1.18_118 Mapa zasięgu sekwencji depozycyjnej 4 - eoliczno-fluwialnej EF2. Parzeczewo-Czarna Wieś

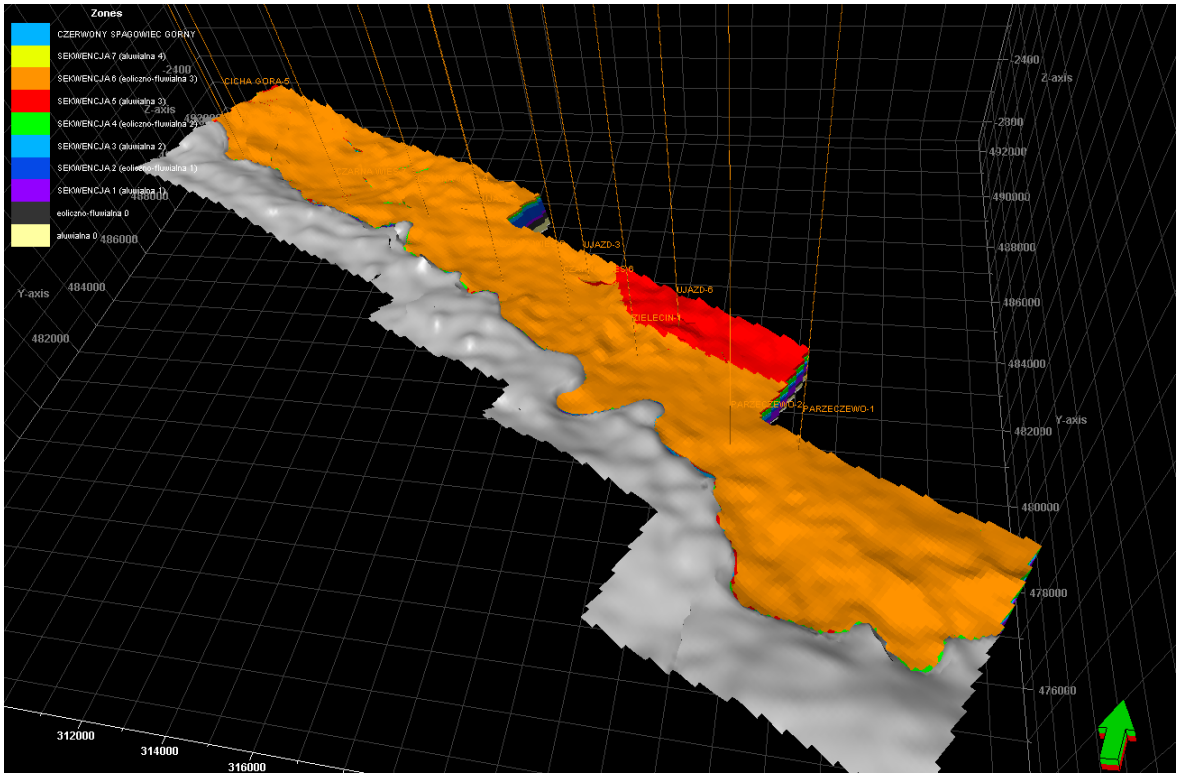


Fig. 1.1.18_119 Mapa zasięgu sekwencji depozycyjnej 6 - eoliczno-fluwialnej EF3. Parzeczewo-Czarna Wieś

Metodyka oceny wykonalności monitoringu w zadaniach CARBON CAPTURE SEQUESTRATION (CCS) z wykorzystaniem analizy sejsmicznego pola falowego

Dla przedstawienia zaproponowanej koncepcji wybrano dwa rejony stosunkowo dobrze rozpoznanych złóż w utworach czerwonego spągowca, a mianowicie złoża Paproć, zlokalizowanego na przeciwległym końcu przekątnej złoża Czarna Wieś.

Wykonano tu projekty sejsmiki 3D oraz stosunkowo liczne pomiary profilowań otworowych, jak też analiz laboratoryjnych. Dane sejsmiczne i wybrane profile sejsmiczne stanowiły podstawę do budowy szczegółowych modeli geologicznych, facjalnych i petrofizycznych, na podstawie których sporządzono sejsmiczne modele numeryczne, testowane drogą modelowania matematycznego w aspekcie prognozowania i możliwości obserwowania zmian wynikających z substytucji płynów złożowych.

Zaproponowaną metodykę najlepiej charakteryzuje poniższy schemat logiczny.

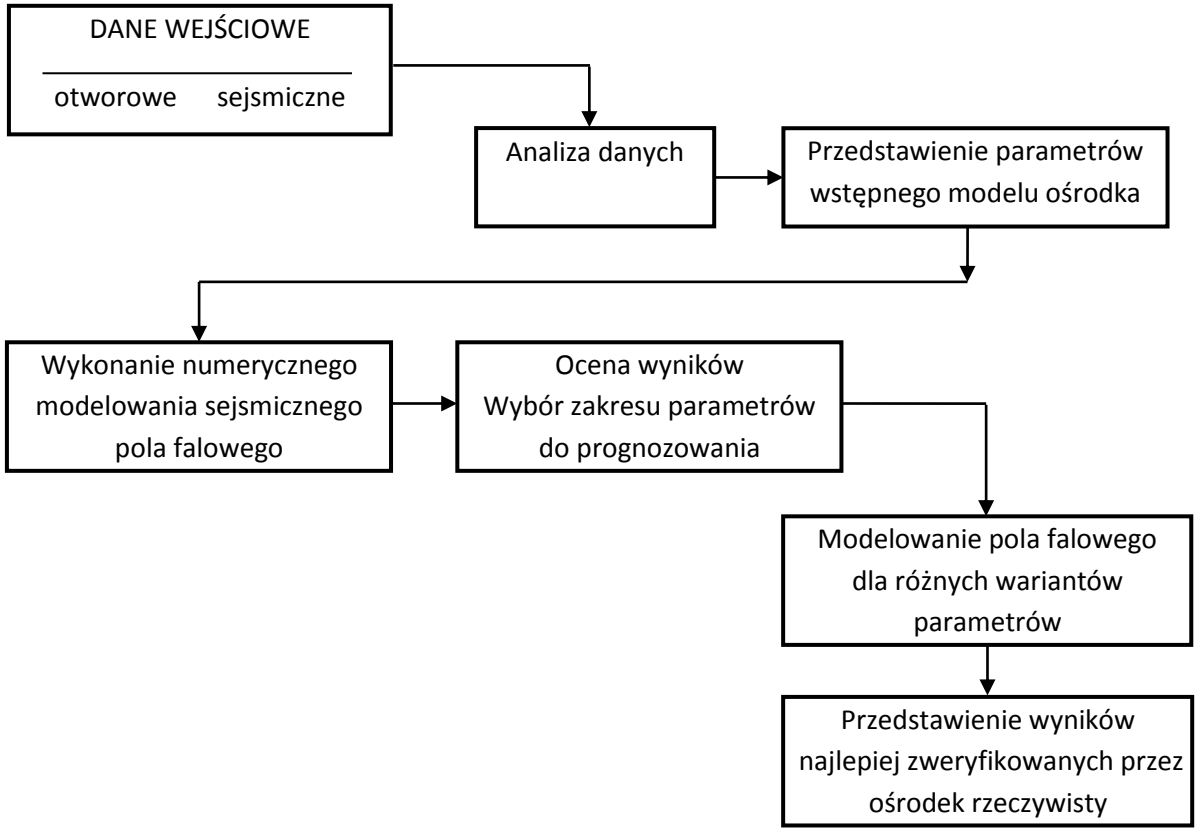


Fig. 1.1.18_120 Schemat logiczny przedstawiający zaproponowaną metodykę badań

Przedstawienie wyników interpretacji danych sejsmicznych w postaci umożliwiającej numeryczne modelowanie pola falowego

Założona w projekcie koncepcja oceny programu monitoringu sejsmicznego, efektów zatłaczania CO2 do formacji „składowiskowej", zakłada znajomość szczegółowego modelu geologicznego, pozwalającego określić parametry niezbędne do przeprowadzenia modelowania numerycznego. Parametrami tymi są:

dla modelu strukturalnego – geometria granic, miąższość warstw, prędkości fal podłużnych (i poprzecznych, o ile to możliwe) oraz gęstości w rozważanych w modelu warstwach;

dla modelu facjalnego – oprócz wymienionych wyżej uwzględnić należy dodatkowo takie parametry jak porowatość oraz przepuszczalność [Jędrzejowska-Tyczkowska H., Sejsmicznie konsystentne estymatory złoża węglowodorów, 2003].

Przedstawione w niniejszym opracowaniu rozwiązanie ma charakter metodyczny – przedstawiono algorytm logiczny – umożliwiający wykonanie obliczeń, wyekstrahowano z danych sejsmicznych podstawowe parametry oraz wykonano i zinterpretowano obliczenia. Zaprezentowano wariant stosunkowo najprostszy, wykorzystujący koncepcję Gassmanna, tzw. fluid substitution.

Praktyczna realizacja polegała na różnicowaniu parametrów fizycznych warstwy proponowanej jako składowisko, obliczanie kolejnych wariantów pól falowych i ocenę pojawiających się zmienności.

Do oceny jakościowej rejonu wykorzystano dane opracowane w INiG, dla rejonu Paproć „Petrofizyczny model złoża Paproć" – kierownik zadania Krzysztof Sowiżdżał, 2009; natomiast dla rejonu Czarna Wieś – Parzęczewo wykorzystano dane z tematu „Diageneza i rozwój facjalny utworów czerwonego spągowca w rejonie Czarna Wieś – Parzęczewo" – kierownik zadania Grzegorz Leśniak, 2010.

Ważniejsze wybrane informacje dla rejonu Paproć pokazano wcześniej, w Rozdziale 1, od szkicu wykonanych profili poczynając. Przedstawiono też dwa krzyżujące się, wzajemnie prostopadłe, profile sejsmiczne, dla których wykonano bardziej szczegółowe analizy ilościowe.

Podobnie zaprezentowano pewien zasób informacji dla rejonu Czarna Wieś – Parzęczewo, które umożliwiają ogólne zapoznanie się z ewentualną formacją składowiskową – wzrost miąższości czerwonego spągowca górnego od płn.-zach. (obiekty Cicha Góra, Δh ~130 m) ku płd.-wsch. (obiekty Czarna Wieś, Parzęczewo; Δh ~180 -240 m). Do szczegółowych analiz w tym rejonie wybrano dwa profile - IL1086 oraz XL701. W tym rejonie głębokość spągu cechsztynu waha się od 2600 m na płn.-zach. do 2350 m na płd.-wsch., co odpowiada podwójnemu czasowi sejsmicznemu od 1670 ms do 1370 ms. Wymienione dane, łącznie z modelem sekwencji osadowych i modelem porowatości, każą się skoncentrować na facjach eoliczno-fluwialnych (prędkości fali P rzędu 4000-5000 m/sek, zaś fali S rzędu 2600-2800 m/sek).

Mapy zasięgu sekwencji eoliczno-fluwialnych wskazują na stosunkowo tutaj jednorodny proces sedymentacyjny, co w aspekcie sekwestracji może stanowić akcent pozytywny.

Analizy laboratoryjne rdzeni wskazują na porowatość rzędu 7-12 %. Biorąc więc pod uwagę bezpieczną miąższość nadkładu – powyżej 2 tys. m miąższość formacji > 100 ms oraz stosunkowo dobrą porowatość formacji, uznać można analizowany obszar za pozytywnie zweryfikowany jako potencjalne składowisko.

Zgoła różnym jest możliwość monitorowania efektów sekwestracji. Tu odpowiedzieć trzeba na pytanie, czy zmiana typu fluidu nasycającego na CO2 znajdzie odzwierciedlenie w obrazie pola falowego?

Zagadnienia te zostaną przedstawione poniżej.

Modelowanie numeryczne uproszczonych modeli ośrodka

Przedstawione na poprzednich figurach modele ukierunkowują obliczenia na dwie strefy:

- rejon złoża Paproć

- rejon złoża Czarna Wieś.

Dla obydwu obiektów zbudowano na podstawie danych otworowych uproszczone modele geologiczne i obliczono pole falowe sterowane rzeczywistym obrazem sejsmicznym. Dla każdego z modeli obliczono refleksyjność ośrodka, jest to bowiem właściwość która decyduje o możliwości śledzenia określonych faktów na sekcji sejsmicznej.

Stratygrafię otworów Paproć-4 i Czarna Wieś-4 przedstawiono wg informacji z bazy danych.

Stratygrafia otworu Paproć-4

PELNY PROFIL

Well identifier	Surface	X	Y	Z	MD
Paproc - 4	Q+Tr	577974	5798119	73,6	0
Paproc - 4	K	577973,34	5798119	-151,4	225
Paproc - 4	J2	577972,98	5798119	-234,4	308
Paproc - 4	J1	577972,83	5798119	-267,4	341
Paproc - 4	TRe	577971,26	5798119	-628,89	702,5
Paproc - 4	Tk3G	577970,33	5798119	-841,39	915
Paproc - 4	Tk3T	577969,86	5798119	-949,39	1023
Paproc - 4	Tk3D	577969,49	5798119	-1033,39	1107
Paproc - 4	Tk1	577969,27	5798119	-1084,89	1158,5
Paproc - 4	Tm3	577968,92	5798119	-1163,39	1237
Paproc - 4	Tm2	577968,78	5798119	-1196,38	1270
Paproc - 4	Tm1	577968,52	5798119	-1255,38	1329
Paproc - 4	Tp3	577967,78	5798119	-1425,38	1499
Paproc - 4	Tp2	577967,27	5798119	-1542,88	1616,5
Paproc - 4	Tp1	577966,6	5798119	-1695,38	1769
Paproc - 4	IP	577965,13	5798119	-2033,37	2107
Paproc - 4	Na4	577965,09	5798119	-2042,37	2116
Paproc - 4	I4	577964,96	5798119	-2070,87	2144,5
Paproc - 4	Na3	577964,95	5798119	-2074,87	2148,5
Paproc - 4	A3	577963,02	5798119	-2171,35	2245
Paproc - 4	I3	577962,6	5798119	-2183,34	2257
Paproc - 4	A2G	577962,52	5798119	-2185,34	2259
Paproc - 4	Na2	577962,48	5798119	-2186,34	2260
Paproc - 4	A2	577957,42	5798118	-2282,19	2356
Paproc - 4	Ca2	577956,59	5798117	-2298,67	2372,5
Paproc - 4	A1G	577954,51	5798116	-2345,11	2419
Paproc - 4	Na1G	577953,14	5798115	-2379,07	2453
Paproc - 4	A1S	577952,11	5798115	-2410,05	2484
Paproc - 4	Na1D	577951,07	5798114	-2441,03	2515
Paproc - 4	A1D	577949,98	5798114	-2471,01	2545
Paproc - 4	Ca1	577948,77	5798114	-2503,98	2578
Paproc - 4	P1	577948,71	5798114	-2505,48	2579,5
Paproc - 4	Ps	577948,71	5798114	-2505,48	2579,5
Paproc - 4	Pa	577944,11	5798113	-2613,88	2688
Paproc - 4	PaG	577944,11	5798113	-2613,88	2688
Paproc - 4	PaW	577943,5	5798113	-2626,86	2701
Paproc - 4	C	577942,59	5798113	-2644,34	2718,5

Stratygrafia otworu Czarna Wieś-4

Well identifier	Surface	X	Y	Depth	MD
CZARNA WIES-4	Q+Tr	315783,9	486410,5	91,6	0
CZARNA WIES-4	J1	315784	486409,8	-164,4	256
CZARNA WIES-4	TRe	315784,2	486408,2	-544,89	636,5
CZARNA WIES-4	Tk3G	315784,3	486406,6	-905,39	997
CZARNA WIES-4	Tk3T	315784,4	486406,1	-1015,39	1107
CZARNA WIES-4	Tk3D	315784,5	486405,7	-1117,89	1209,5
CZARNA WIES-4	Tk1	315784,5	486405,4	-1192,38	1284
CZARNA WIES-4	Tm3	315784,5	486405	-1280,38	1372
CZARNA WIES-4	Tm2	315784,6	486404,9	-1311,88	1403,5
CZARNA WIES-4	Tm1	315784,6	486404,6	-1365,88	1457,5
CZARNA WIES-4	T1	315784,7	486403,4	-1646,38	1738
CZARNA WIES-4	Tp3	315784,7	486403,9	-1525,88	1617,5
CZARNA WIES-4	Tp1	315784,8	486402,8	-1796,38	1888
CZARNA WIES-4	IP	315785,1	486399,6	-2127,86	2219,5
CZARNA WIES-4	Na4	315785,1	486399,4	-2140,35	2232
CZARNA WIES-4	I4	315785,2	486399	-2166,35	2258
CZARNA WIES-4	Na3	315785,2	486398,9	-2169,85	2261,5
CZARNA WIES-4	A3	315784,6	486398,3	-2269,34	2361
CZARNA WIES-4	I3	315784,3	486398,3	-2298,84	2390,5
CZARNA WIES-4	A2G	315784,3	486398,3	-2300,34	2392
CZARNA WIES-4	Na2	315784,3	486398,3	-2304,34	2396
CZARNA WIES-4	A2	315783,8	486398,3	-2356,34	2448
CZARNA WIES-4	Ca2	315783,7	486398,3	-2370,34	2462
CZARNA WIES-4	A1G	315783,3	486398,3	-2413,34	2505
CZARNA WIES-4	Na1G	315783	486398,3	-2447,83	2539,5
CZARNA WIES-4	A1S	315783	486398,3	-2456,33	2548
CZARNA WIES-4	Na1D	315782,8	486398,3	-2474,33	2566
CZARNA WIES-4	A1D	315781,4	486398,3	-2574,32	2666
CZARNA WIES-4	Ca1	315780,8	486398,2	-2596,81	2688,5
CZARNA WIES-4	P1	315780,8	486398,2	-2597,81	2689,5

Sekwencję obliczeń relacjonują figury od **Fig. 1.1.18_121** do **1.1.18_125** dla otworu Paproć-4 (w podstawowym 12-sto warstwowym wariancie, model 1, kalibrowanym profilami sejsmicznymi IL601 oraz XL913). Imitację efektów zatłaczania przedstawiają obliczenia dla modelu 2 w wariancie 16-sto warstwowym –**Fig. 1.1.18_126** do **Fig. 1.1.18_129**.

Uzupełniającej informacji dostarczyły wyniki pomiarów w otworze Paproć-9 i na tej podstawie zbudowane modele (**Fig. 1.1.18_130**, **1.1.18_131, 1.1.18_132**) – jest to jedyna tu informacja poniżej stropu czerwonego spągowca.

Analogiczną sekwencję obliczeniową wykonano na podstawie danych otworowych z otworu Czarna Wieś-4 oraz profili sejsmicznych IL1086 oraz XL701. Uwagę skupiono na in-linie 1086. Stworzono 4 modele numeryczne zróżnicowane w zakresie prędkości akustycznych poniżej spągu

cechsztynu (model 1 – **Fig. 1.1.18_134 i 1.1.18_135**; model 2 – **Fig. 1.1.18_136 i 1.1.18_137**; model 3 – **Fig. 1.1.18_138 i 1.1.18_139**; model 4 – **Fig. 1.1.18_140 i 1.1.18_141**).

Dla wszystkich modeli przedstawiono kolekcje tras sejsmicznych w wersji zero-offsetowej, obliczonych przy założeniu różnej rozdzielczości pola falowego, wyrażonej poprzez częstotliwość dominującą sygnału sejsmicznego. Wykonany eksperyment obliczeniowy obejmuje częstotliwości w zakresie 10-70 Hz, z krokiem 10 Hz.

Charakterystykę akustyczną ośrodka odpowiedzialną za tworzenie się odbić sejsmicznych, a więc i możliwość odtworzenia budowy przedstawiono za pomocą rozkładów prędkości i współczynników odbicia (**Fig. 1.1.18_142, Fig. 1.1.18_143 i Fig. 1.1.18_144**). Obliczono je dla całego profilu stratygraficznego w oknie czasowym 180 – 1700 ms dla otworu Paproć-4 i w oknie 1622-1700 ms dla prognozowanej formacji składowiskowej (**Fig. 1.1.18_142**).

Analogicznie dla otworu Paproć-9 w oknach 234-1728 ms oraz 1404-1728 ms (do spodu otworu – **Fig. 1.1.18_143**) i Czarna Wieś-4 w oknach 34-1990 ms oraz 1800-1990 ms (**Fig. 1.1.18_144**).

Dla prędkości przyjęto krok obliczeń równy 200 m/sek, tak aby zauważyć niewielkie zmiany prędkości.

Otwór: PAPROĆ-4
Rejon: Paproć
Poziom odniesienia: wylot otworu 70. m n.p.m.
Krzywa czerwona: średnie prędkości kompleksowe

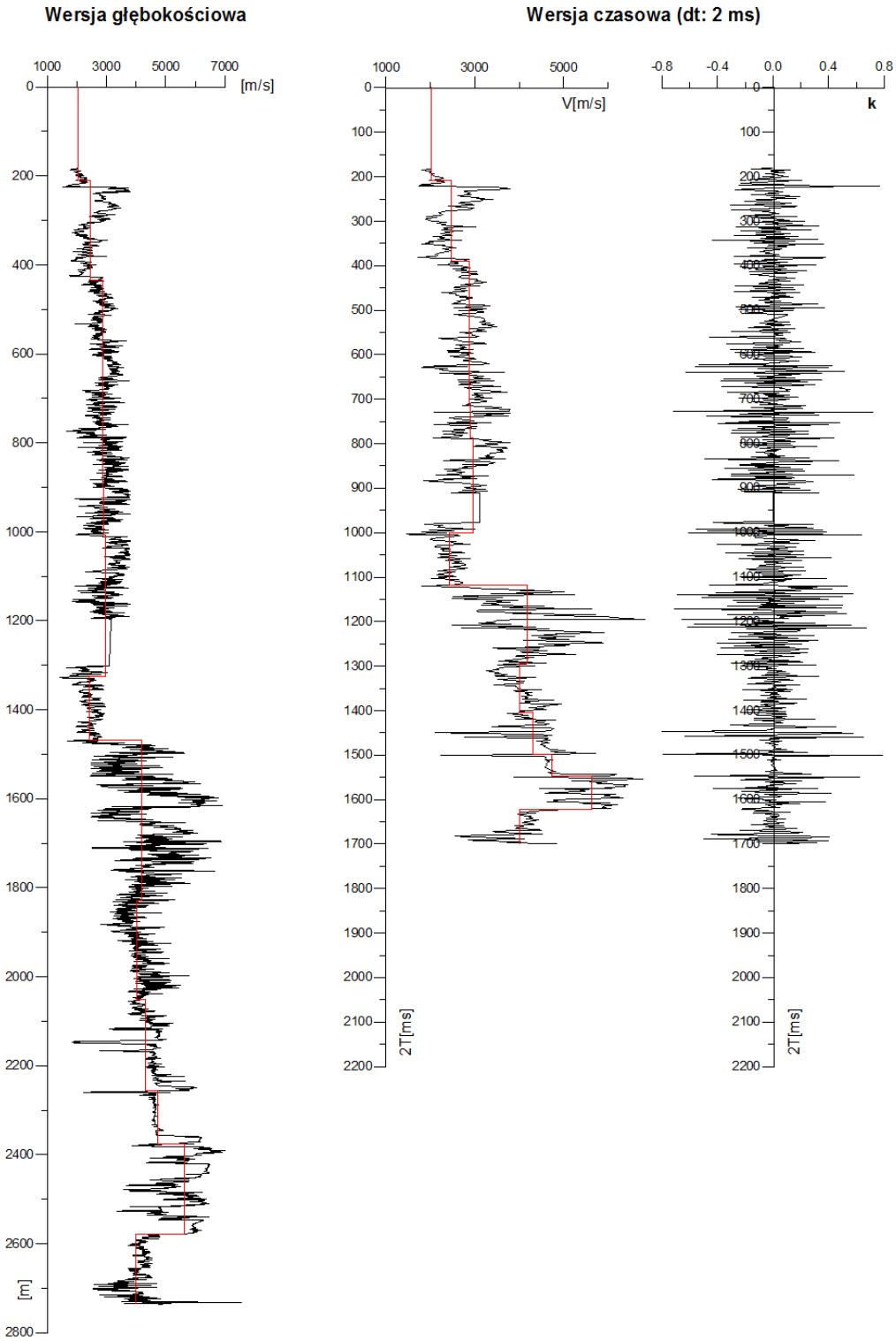
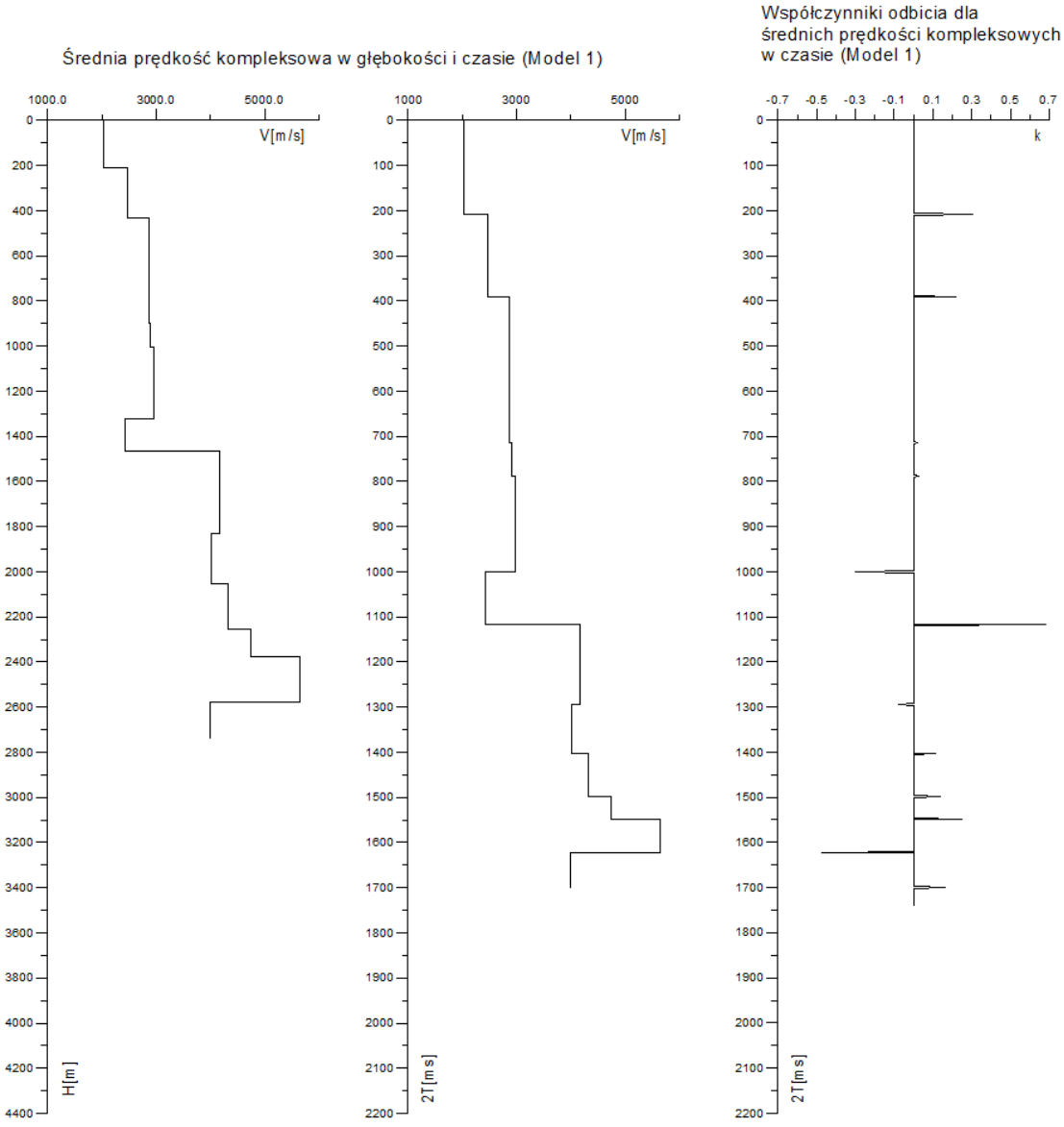


Fig. 1.1.18_121

Profil: IL601 - MODEL 1

Otwór: PAPROĆ-4
Rejon: Paproć
Poziom odniesienia: wylot otworu 70. m n.p.m.
Dt: 2 ms



Otwór Paproć-4, Model 1

Nr w-wy	$H_{spąg}$ [m]	V [m/s]	ρ [g/cm^3]	2T [ms]	K - wsp.odb.
1	210.40	2022.00	2.24137	208.00	0.30435
2	434.42	2468.00	2.28145	390.00	0.21615
3	898.85	2874.00	2.33557	714.00	0.02149
4	1006.26	2900.00	2.41400	788.00	0.02973
5	1324.70	2967.00	2.40337	1000.00	-0.29937
6	1467.71	2420.00	2.39296	1118.00	0.68297
7	1829.67	4170.00	2.63773	1294.00	-0.07744
8	2051.43	4015.00	2.66248	1404.00	0.11595
9	2257.25	4318.00	2.59126	1498.00	0.13800
10	2375.21	4741.00	2.64536	1548.00	0.25155
11	2578.64	5642.00	2.70796	1622.00	-0.47360
12	2735.60	4000.00	2.66048	1700.00	0.16446

Fig. 1.1.18_122

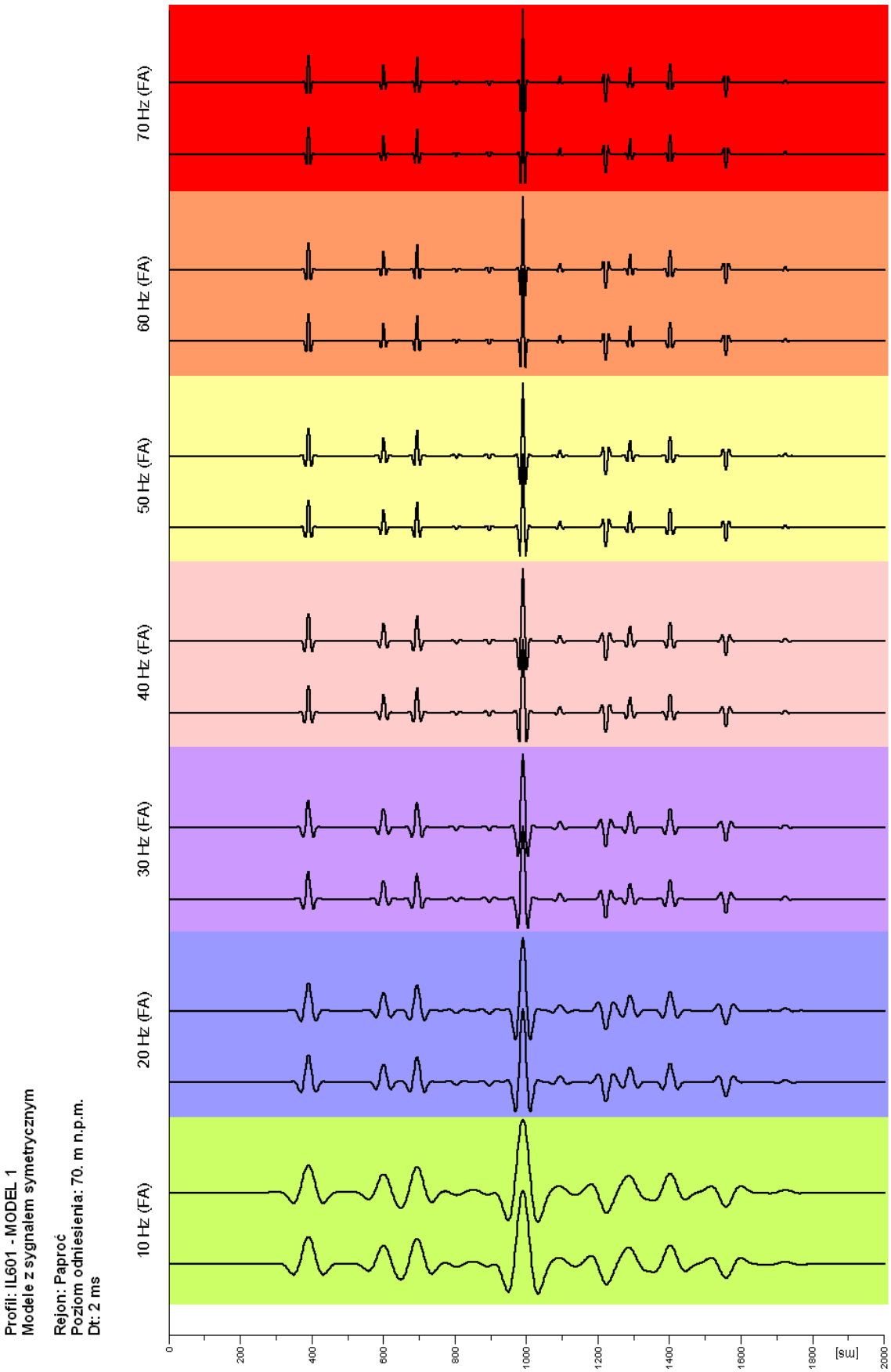
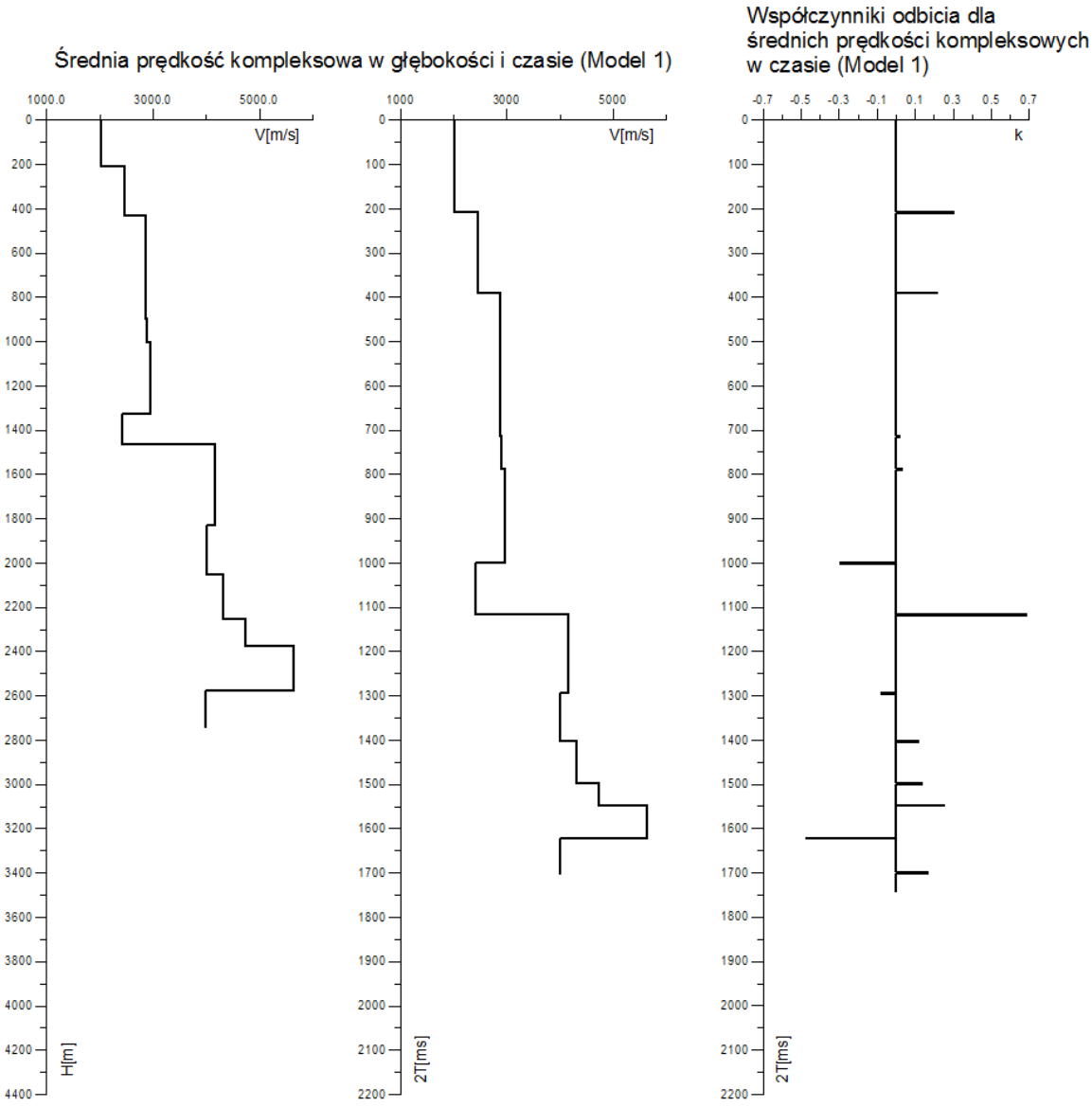

Profil: IL601 - MODEL 1
Modele z sygnalem symetrycznym
Rejon: Paproć
Poziom odniesienia: 70. m n.p.m.
Dt: 2 ms
70 Hz (FA)
60 Hz (FA)
50 Hz (FA)
40 Hz (FA)
30 Hz (FA)
20 Hz (FA)
10 Hz (FA)
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
2000
[ms]

Fig. 1.1.18_123

Profil: XL913 - MODEL 1

Otwór: PAPROĆ-4
Rejon: Paproć
Poziom odniesienia: wylot otworu 70. m n.p.m.
Dt: 2 ms



Otwór Paproć-4, Model 1

Nr w-wy	$H_{spąg}$ [m]	V [m/s]	ρ [g/cm^3]	2T [ms]	K - wsp.odb.
1	210.40	2022.00	2.24137	208.00	0.30435
2	434.42	2468.00	2.28145	390.00	0.21615
3	898.85	2874.00	2.33557	714.00	0.02149
4	1006.26	2900.00	2.41400	788.00	0.02973
5	1324.70	2967.00	2.40337	1000.00	-0.29937
6	1467.71	2420.00	2.39296	1118.00	0.68297
7	1829.67	4170.00	2.63773	1294.00	-0.07744
8	2051.43	4015.00	2.66248	1404.00	0.11595
9	2257.25	4318.00	2.59126	1498.00	0.13800
10	2375.21	4741.00	2.64536	1548.00	0.25155
11	2578.64	5642.00	2.70796	1622.00	-0.47360
12	2735.60	4000.00	2.66048	1700.00	0.16446

Fig. 1.1.18_124

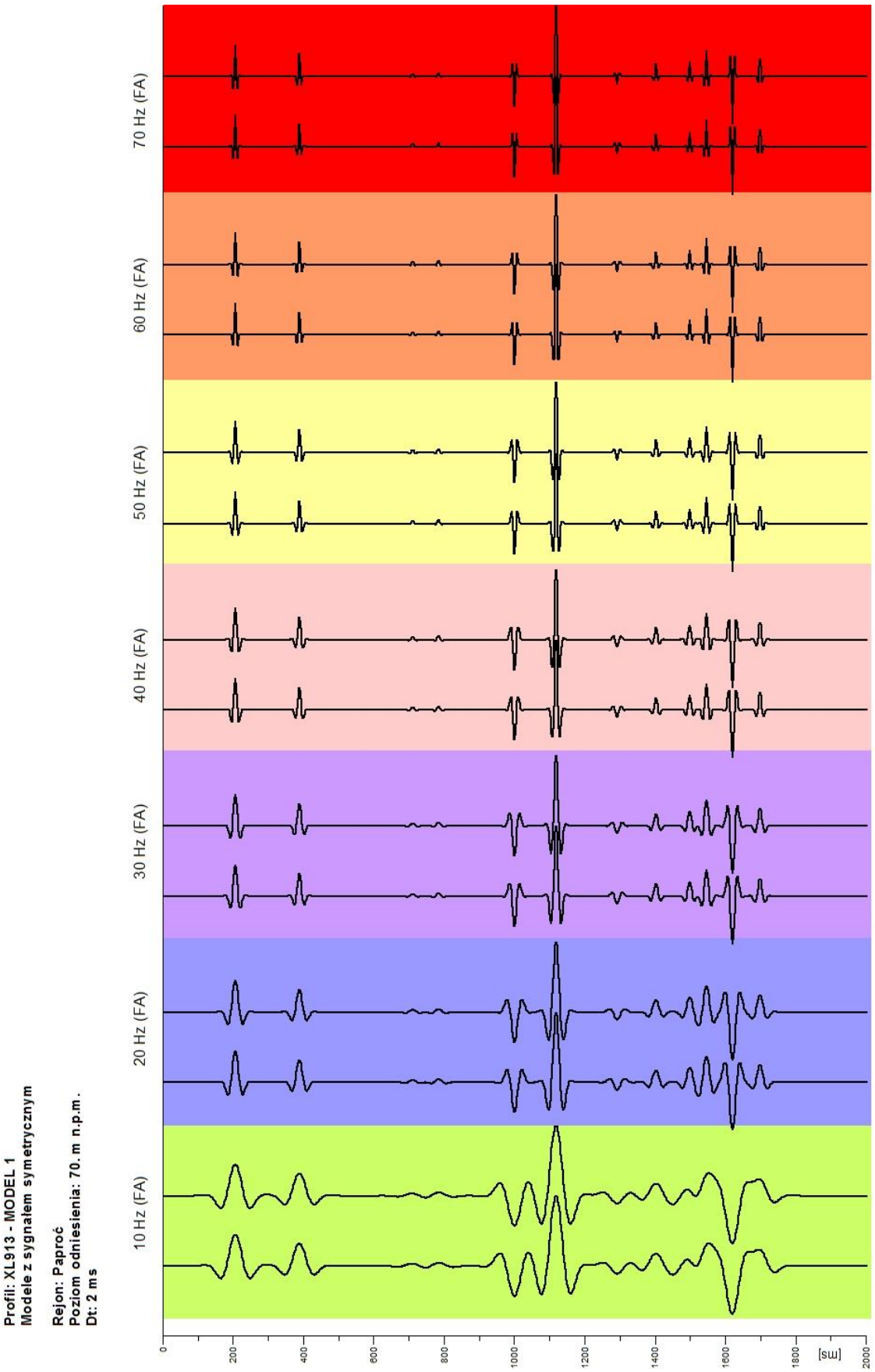
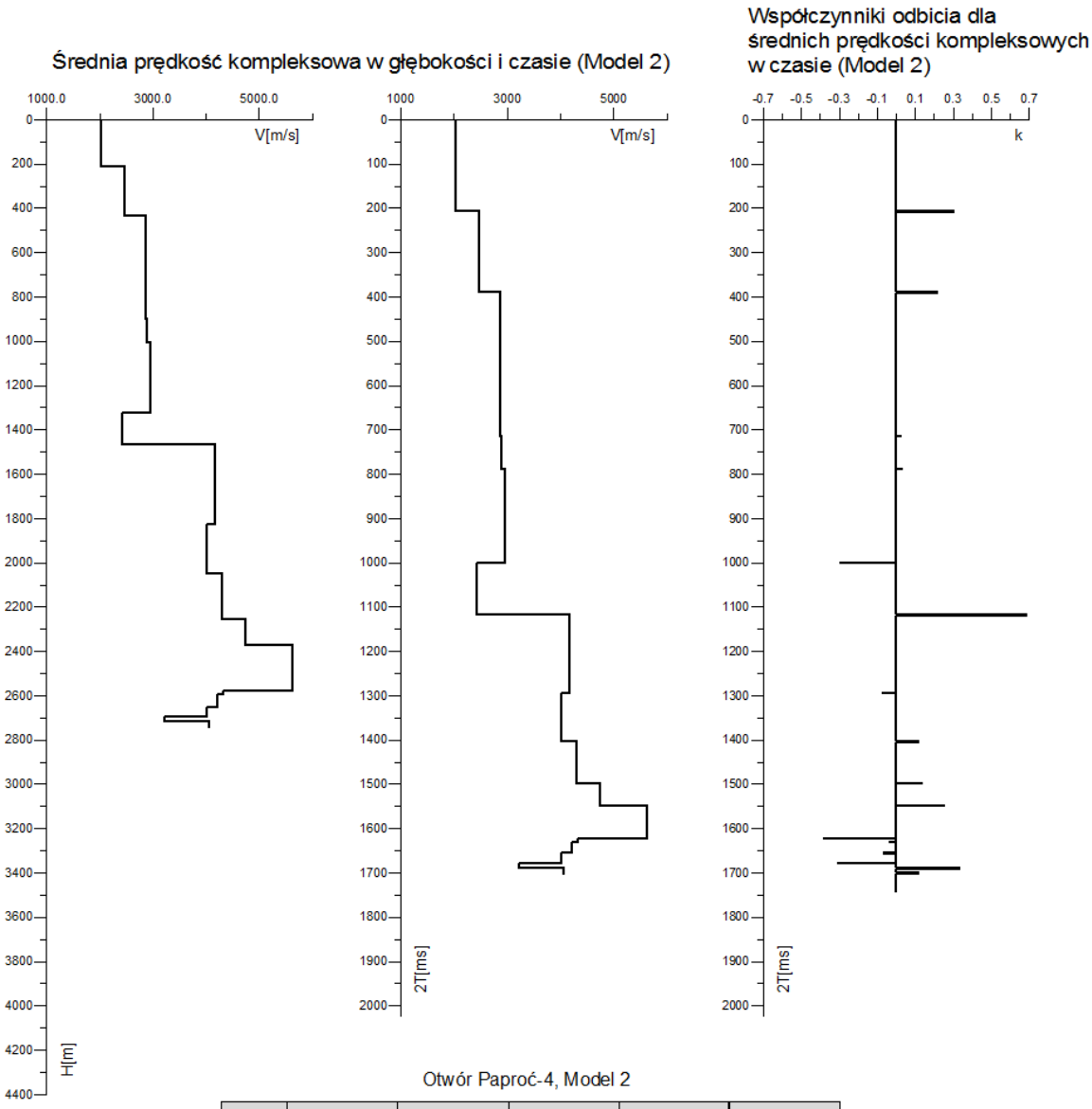

Profil: XL913 - MODEL 1
Modele z sygnałem symetrycznym
Rejon: Paproć
Poziom odniesienia: 70. m n.p.m.
Dt: 2 ms
70 Hz (FA)
60 Hz (FA)
50 Hz (FA)
40 Hz (FA)
30 Hz (FA)
20 Hz (FA)
10 Hz (FA)
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
2000
[ms]

Fig. 1.1.18_125

Profil: IL601 - MODEL 2

Otwór: PAPROĆ-4
Rejon: Paproć
Poziom odniesienia: wylot otworu 70. m n.p.m.
Dt: 2 ms



Otwór Paproć-4, Model 2

Nr w-wy	$H_{spąg}$ [m]	V [m/s]	ρ [g/cm³]	2T [ms]	K - wsp.odb.
1	210.40	2022.00	2.24137	208.00	0.30435
2	434.42	2468.00	2.28145	390.00	0.21615
3	898.85	2874.00	2.33557	714.00	0.02149
4	1006.26	2900.00	2.41400	788.00	0.02973
5	1324.70	2967.00	2.40337	1000.00	-0.29937
6	1467.71	2420.00	2.39296	1118.00	0.68297
7	1829.67	4170.00	2.63773	1294.00	-0.07744
8	2051.43	4015.00	2.66248	1404.00	0.11595
9	2257.25	4318.00	2.59126	1498.00	0.13800
10	2375.21	4741.00	2.64536	1548.00	0.25155
11	2578.64	5642.00	2.70796	1622.00	-0.38324
12	2596.13	4328.00	2.62325	1630.00	-0.03964
13	2651.05	4216.00	2.69416	1656.00	-0.06682
14	2694.01	4023.00	2.59767	1678.00	-0.31149
15	2715.26	3223.00	2.65945	1690.00	0.33099
16	2735.60	4059.00	2.71150	1700.00	0.11915

Fig. 1.1.18_126

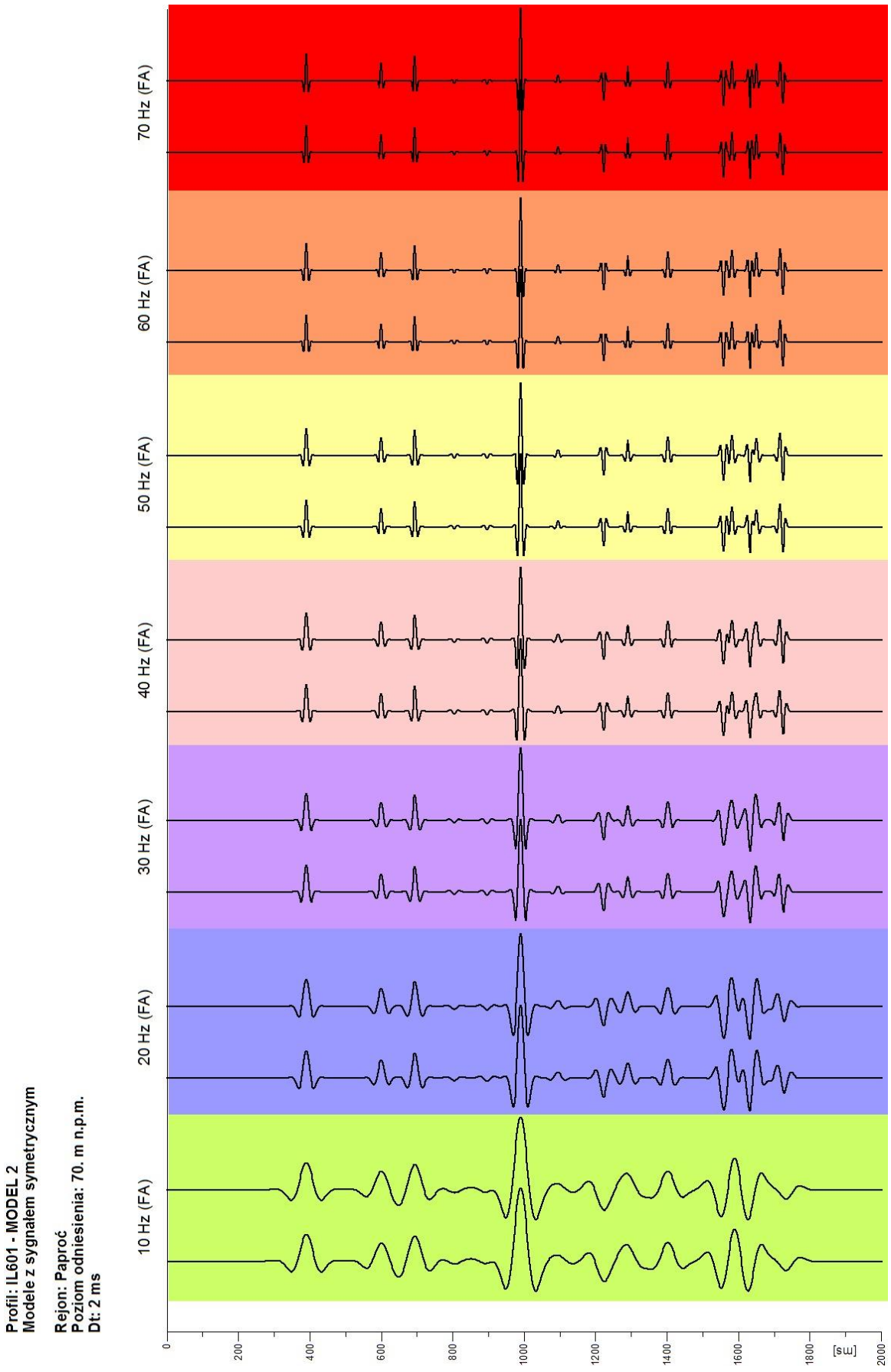
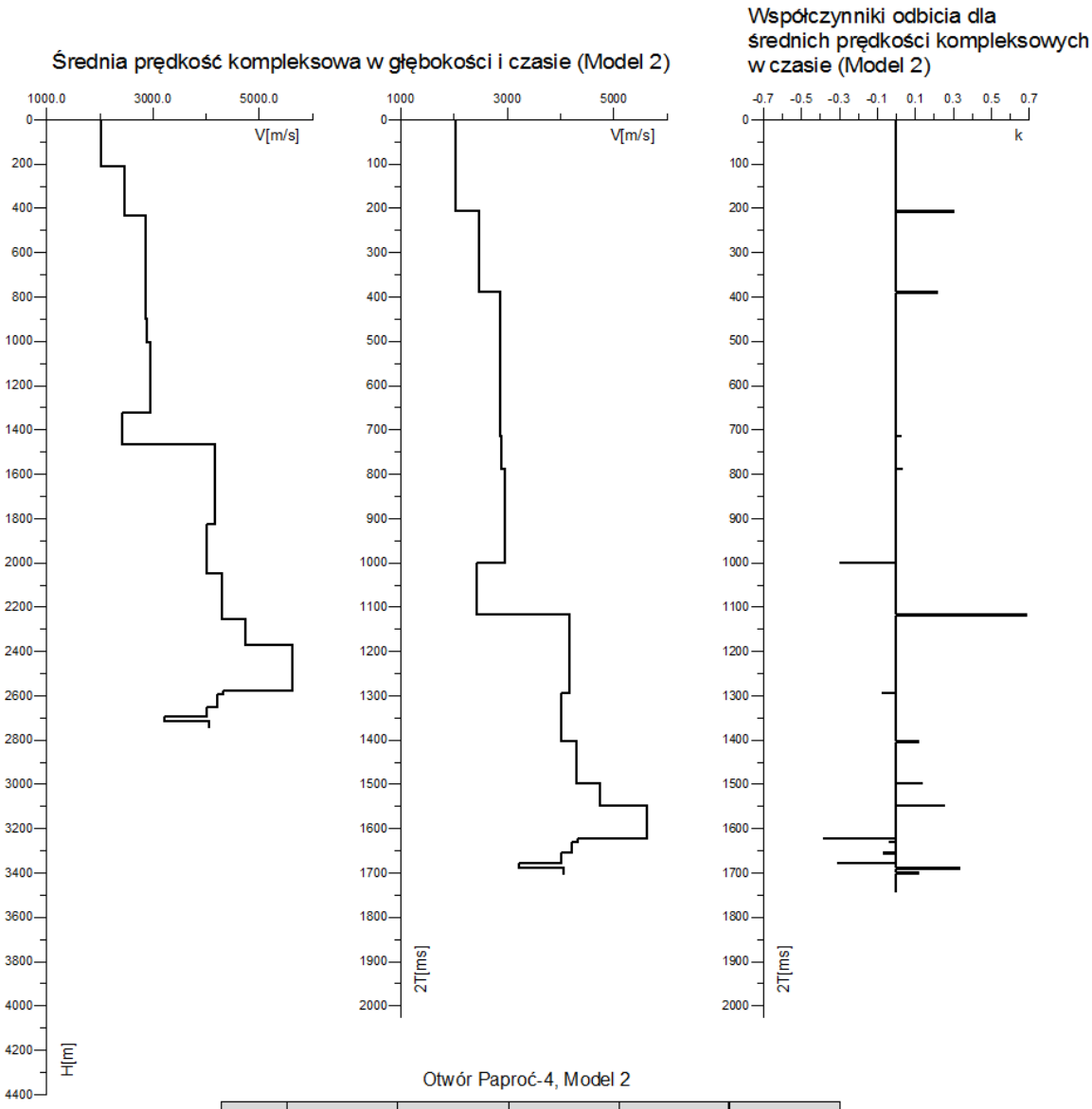

Profil: IL601 - MODEL 2
Modele z sygnałem symetrycznym
Rejon: Paproć
Poziom odniesienia: 70. m n.p.m.
Dt: 2 ms
70 Hz (FA)
60 Hz (FA)
50 Hz (FA)
40 Hz (FA)
30 Hz (FA)
20 Hz (FA)
10 Hz (FA)
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
2000
[ms]

Fig. 1.1.18_127

Profil: XL913 - MODEL 2

Otwór: PAPROĆ-4
Rejon: Paproć
Poziom odniesienia: wylot otworu 70. m n.p.m.
Dt: 2 ms



Otwór Paproć-4, Model 2

Nr w-wy	$H_{spąg}$ [m]	V [m/s]	ρ [g/cm³]	2T [ms]	K - wsp.odb.
1	210.40	2022.00	2.24137	208.00	0.30435
2	434.42	2468.00	2.28145	390.00	0.21615
3	898.85	2874.00	2.33557	714.00	0.02149
4	1006.26	2900.00	2.41400	788.00	0.02973
5	1324.70	2967.00	2.40337	1000.00	-0.29937
6	1467.71	2420.00	2.39296	1118.00	0.68297
7	1829.67	4170.00	2.63773	1294.00	-0.07744
8	2051.43	4015.00	2.66248	1404.00	0.11595
9	2257.25	4318.00	2.59126	1498.00	0.13800
10	2375.21	4741.00	2.64536	1548.00	0.25155
11	2578.64	5642.00	2.70796	1622.00	-0.38324
12	2596.13	4328.00	2.62325	1630.00	-0.03964
13	2651.05	4216.00	2.69416	1656.00	-0.06682
14	2694.01	4023.00	2.59767	1678.00	-0.31149
15	2715.26	3223.00	2.65945	1690.00	0.33099
16	2735.60	4059.00	2.71150	1700.00	0.11915

Fig. 1.1.18_128

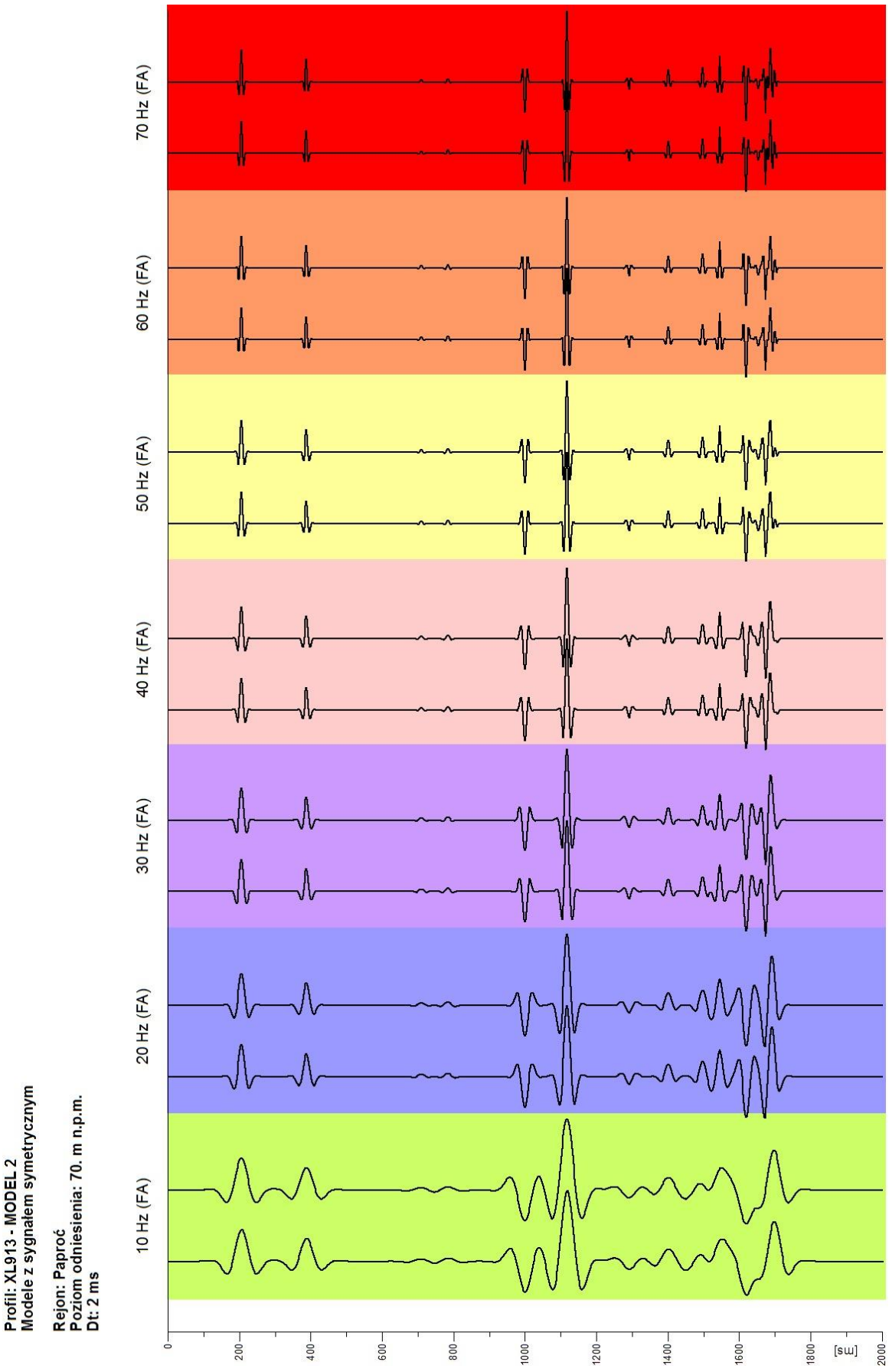

Profil: XL913 - MODEL 2
Modele z sygnałem symetrycznym
Rejon: Paproć
Poziom odniesienia: 70. m n.p.m.
Dt: 2 ms
70 Hz (FA)
60 Hz (FA)
50 Hz (FA)
40 Hz (FA)
30 Hz (FA)
20 Hz (FA)
10 Hz (FA)
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
2000
[ms]

Fig. 1.1.18_129

Otwór: PAPROĆ-9
Rejon: Paproć
Poziom odniesienia: wylot otworu 70. m n.p.m.
Krzywa czerwona: średnie prędkości kompleksowe

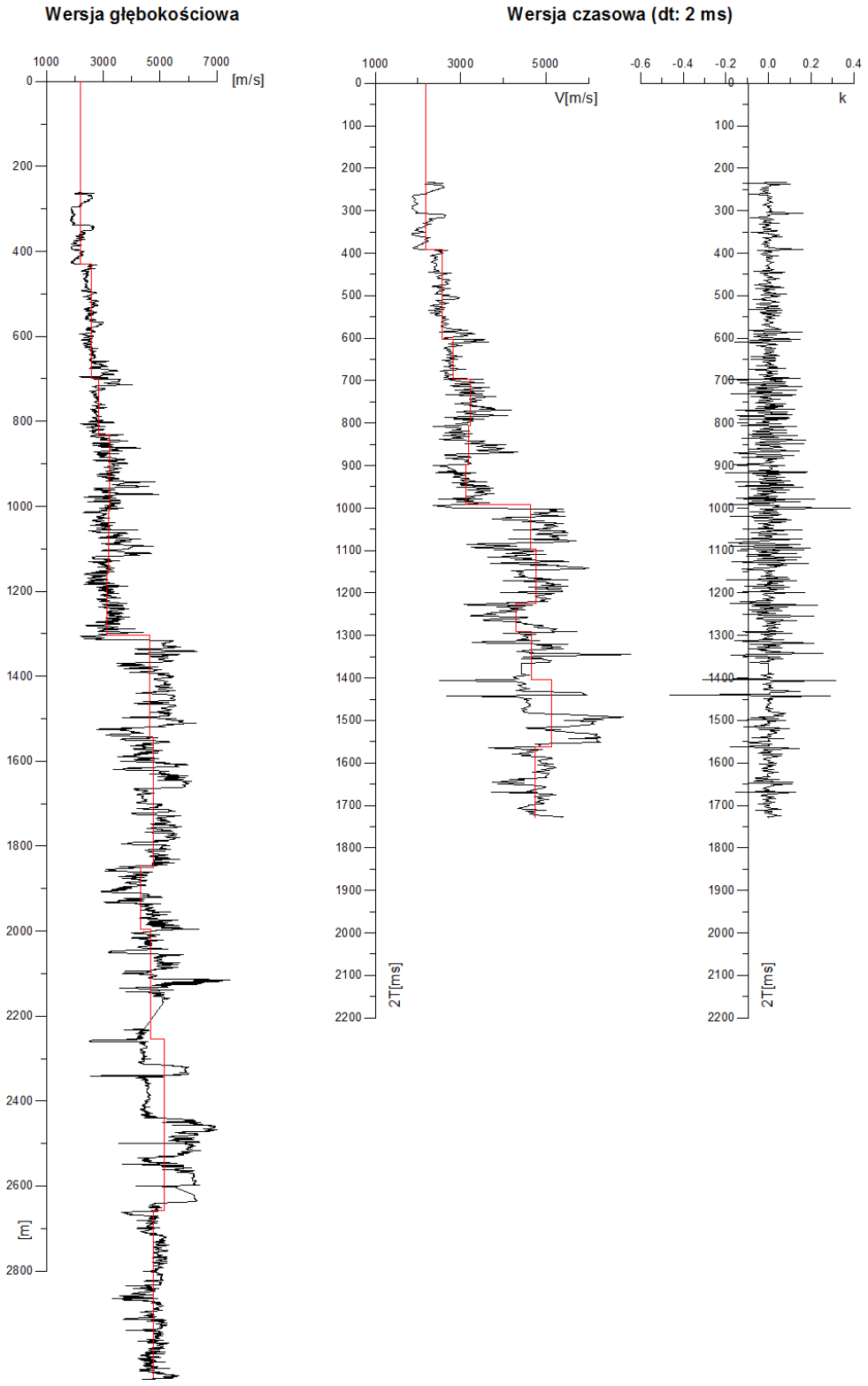
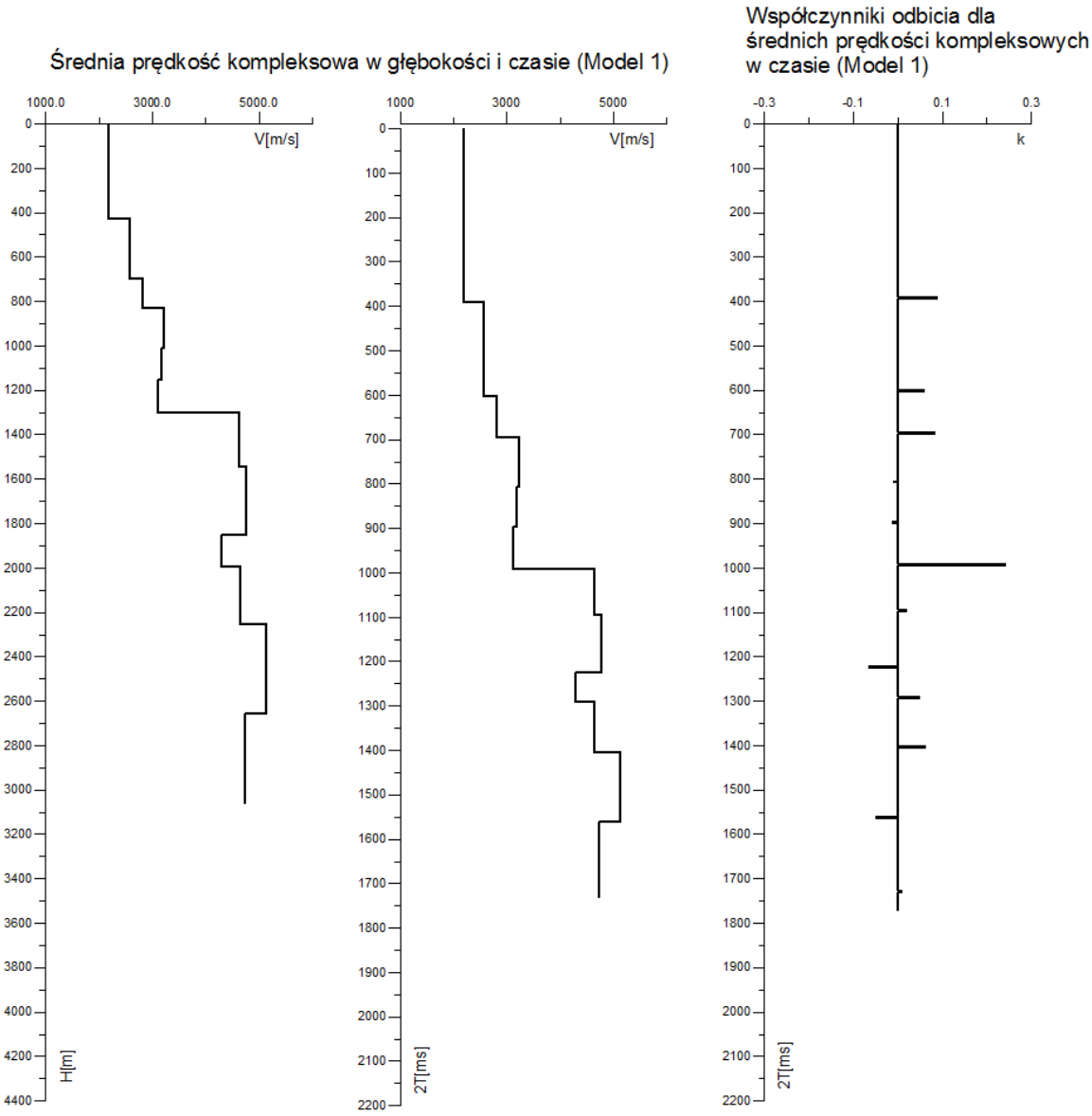


Fig. 1.1.18_130

Profil: IL601 - MODEL 1

Otwór: PAPROĆ-9
Rejon: Paproć
Poziom odniesienia: wylot otworu 70. m n.p.m.
Dt: 2 ms



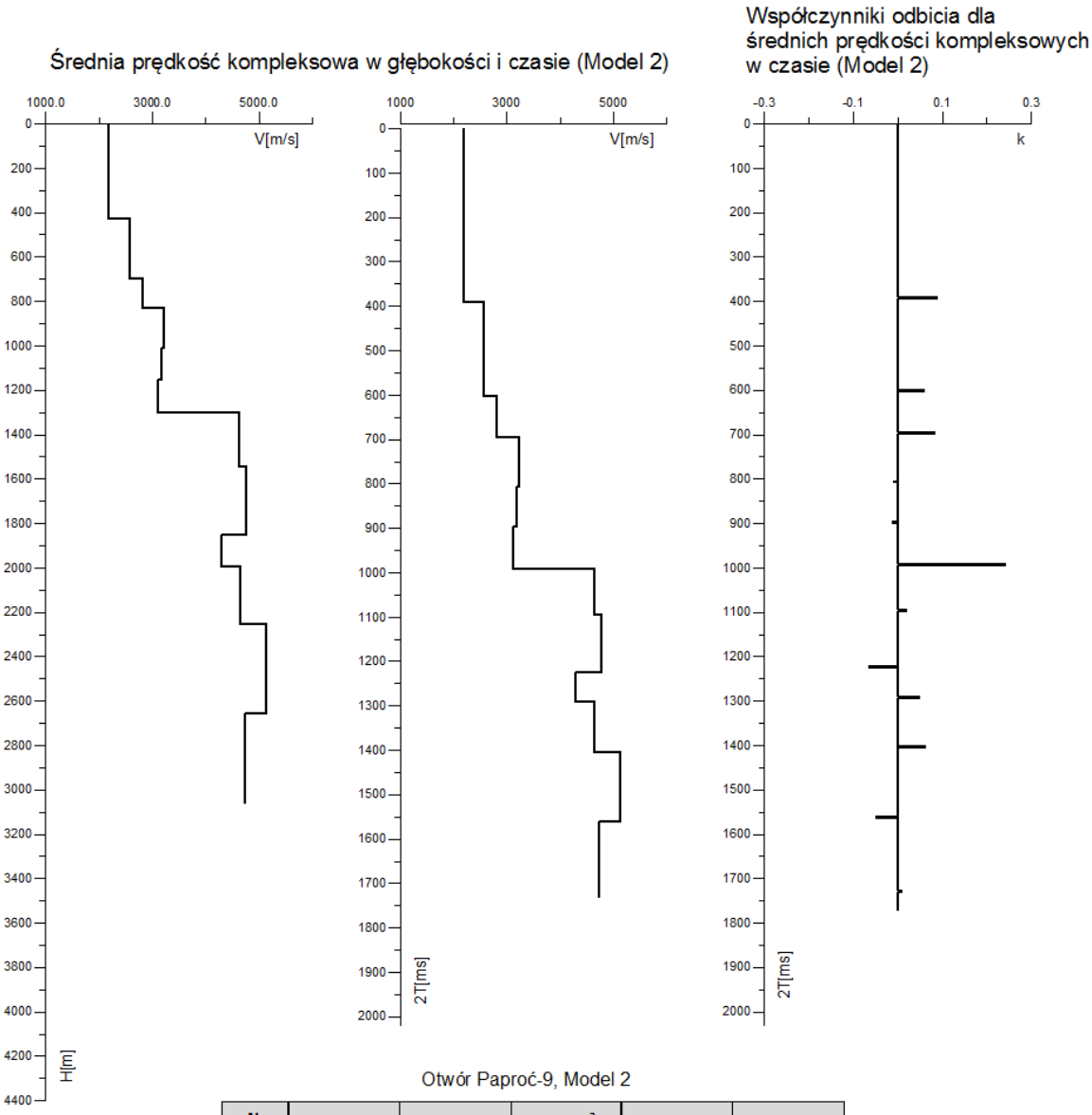
Otwór Paproć-9, Model 1

Nr w- wy	$H_{spąg}$ [m]	V [m/s]	ρ [g/cm^3]	2T [ms]	K - wsp.odb.
1	429.09	2190.00	2.24137	392.00	0.08921
2	699.49	2573.00	2.28145	602.00	0.05873
3	832.16	2827.00	2.33557	696.00	0.08265
4	1010.23	3228.00	2.41400	806.00	-0.00938
5	1156.46	3182.00	2.40337	898.00	-0.01169
6	1302.89	3122.00	2.39296	992.00	0.24243
7	1544.36	4645.00	2.63773	1096.00	0.01815
8	1851.01	4772.00	2.66248	1224.00	-0.06531
9	1995.52	4302.00	2.59126	1292.00	0.04951
10	2254.86	4653.00	2.64536	1404.00	0.06129
11	2658.57	5139.00	2.70796	1562.00	-0.04858
12	3053.08	4746.00	2.66048	1728.00	0.00753

Fig. 1.1.18_131

Profil: IL601 - MODEL 2

Otwór: PAPROĆ-9
Rejon: Paproć
Poziom odniesienia: wylot otworu 70. m n.p.m.
Dt: 2 ms



Otwór Paproć-9, Model 2

Nr w-wy	$H_{spąg}$ [m]	V [m/s]	ρ [g/cm^3]	2T [ms]	K - wsp.odb.
1	429.09	2190.00	2.24137	392.00	0.08921
2	699.49	2573.00	2.28145	602.00	0.05873
3	832.16	2827.00	2.33557	696.00	0.08265
4	1010.23	3228.00	2.41400	806.00	-0.00938
5	1156.46	3182.00	2.40337	898.00	-0.01169
6	1302.89	3122.00	2.39296	992.00	0.24243
7	1544.36	4645.00	2.63773	1096.00	0.01815
8	1851.01	4772.00	2.66248	1224.00	-0.06531
9	1995.52	4302.00	2.59126	1292.00	0.04951
10	2254.86	4653.00	2.64536	1404.00	0.06129
11	2658.57	5139.00	2.70796	1562.00	-0.08342
12	2712.41	4488.00	2.62325	1586.00	0.06545
13	2836.25	4982.00	2.69416	1636.00	-0.08974
14	2875.25	4316.00	2.59767	1654.00	0.05791
15	3032.93	4734.00	2.65945	1720.00	0.04806
16	3053.08	5112.00	2.71150	1728.00	-0.06509

Fig. 1.1.18_132

Otwór: CZARNA WIEŚ-4
Rejon: Parzęczewo-Czarna Wieś
Poziom odniesienia: wylot otworu 70. m n.p.m.
Krzywa czerwona: średnie prędkości kompleksowe

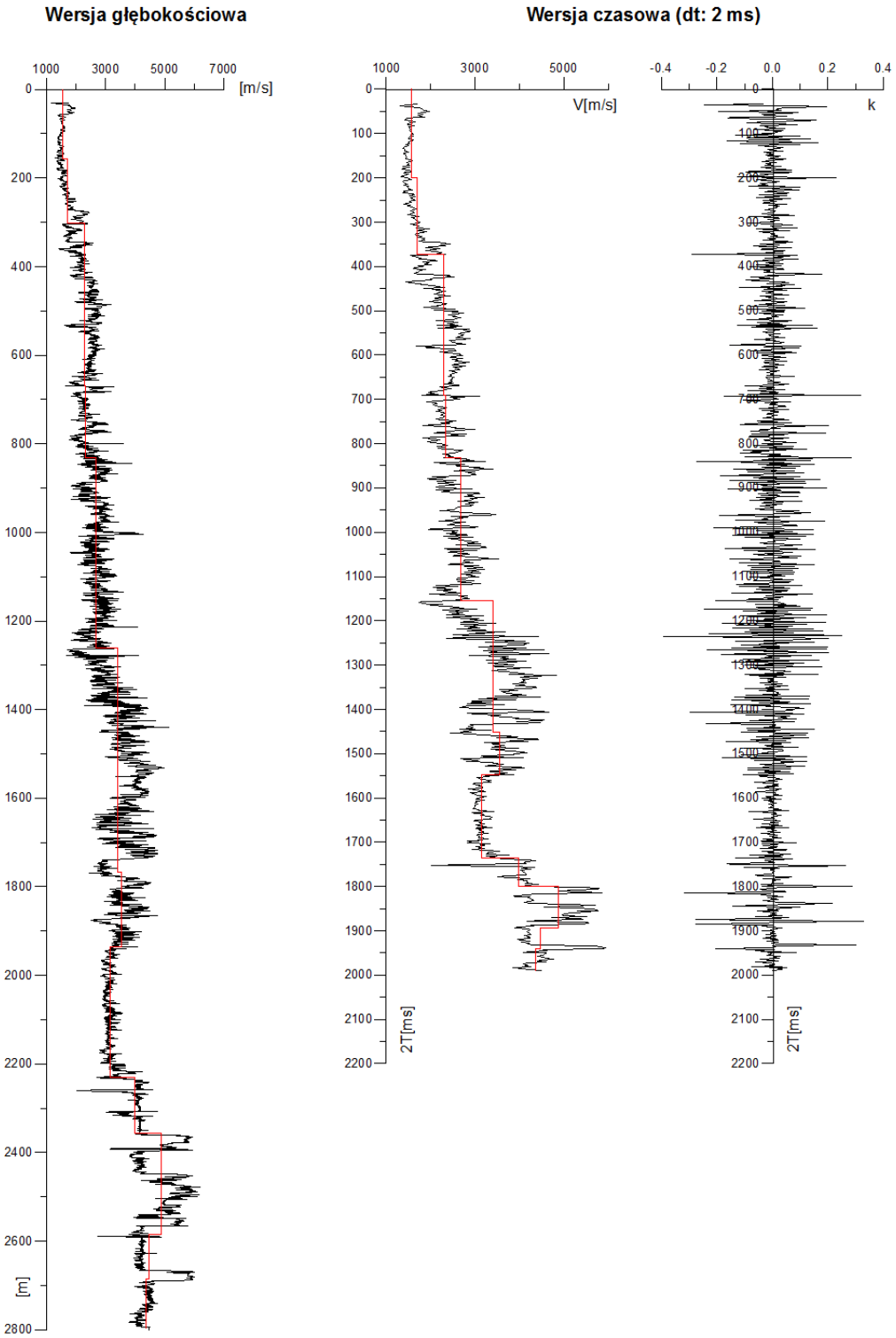
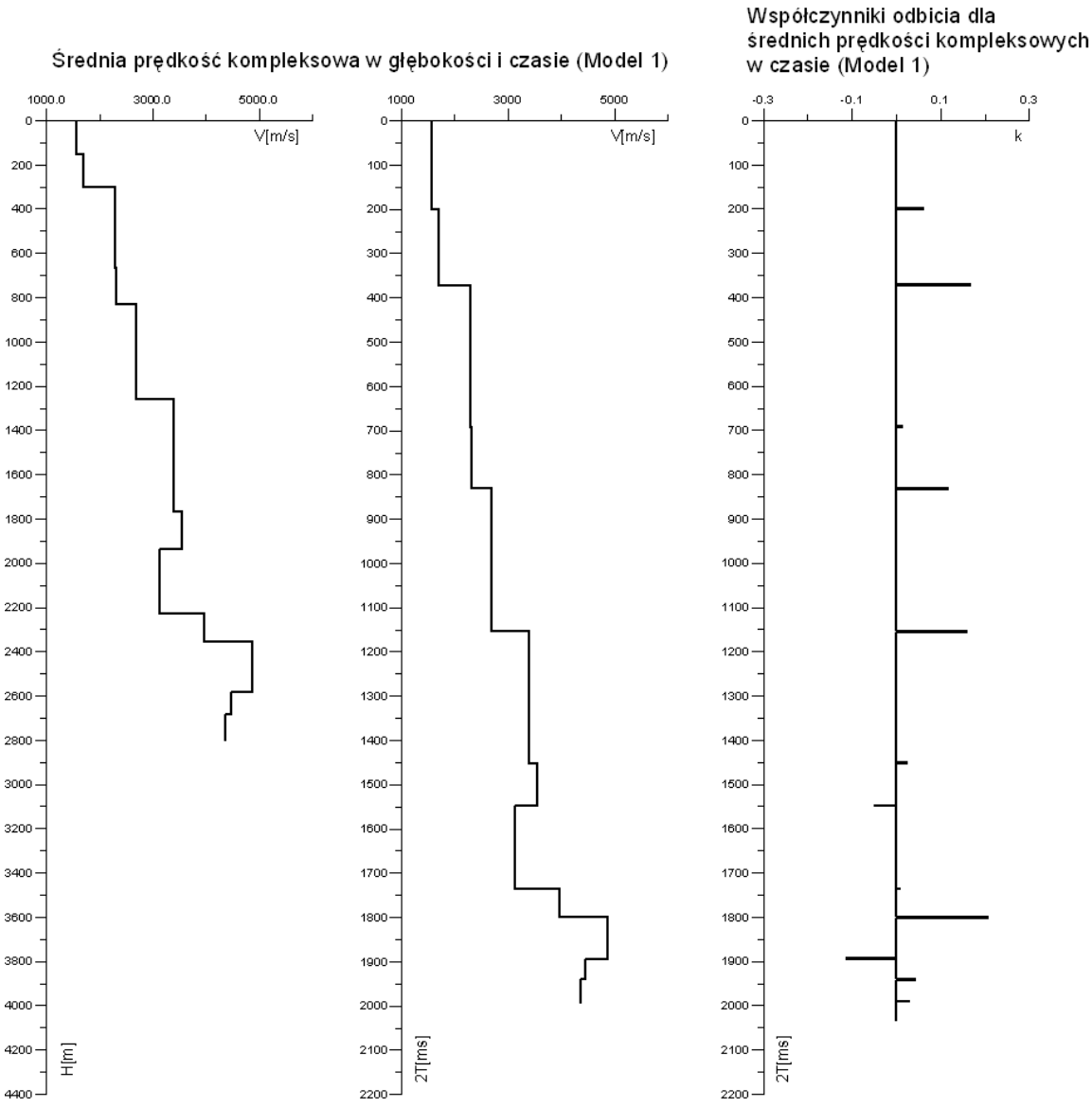


Fig. 1.1.18_133

Profil: IL1086 - MODEL 1

Otwór: CZARNA WIEŚ-4
Rejon: Parzęczewo-Czarna Wieś
Poziom odniesienia: wylot otworu 70. m n.p.m.
Dt: 2 ms



Otwór Czarna Wieś-4, Model 1

Nr w-wy	$H_{spąg}$ [m]	V [m/s]	ρ [g/cm^3]	2T [ms]	K - wsp.odb.
1	156.16	1560.00	1.95097	200.00	0.06173
2	302.04	1702.00	2.02349	372.00	0.16806
3	668.88	2291.00	2.11061	692.00	0.01228
4	832.35	2328.00	2.12870	832.00	0.11710
5	1261.67	2684.00	2.33611	1154.00	0.15830
6	1766.25	3401.00	2.53709	1452.00	0.02486
7	1935.64	3548.00	2.55596	1548.00	-0.04992
8	2230.66	3142.00	2.61179	1736.00	0.00863
9	2357.60	3979.00	2.09831	1800.00	0.20588
10	2584.61	4881.00	2.59751	1894.00	-0.11393
11	2686.51	4469.00	2.25665	1940.00	0.04327
12	2795.67	4365.00	2.51940	1990.00	0.03028

Fig. 1.1.18_134

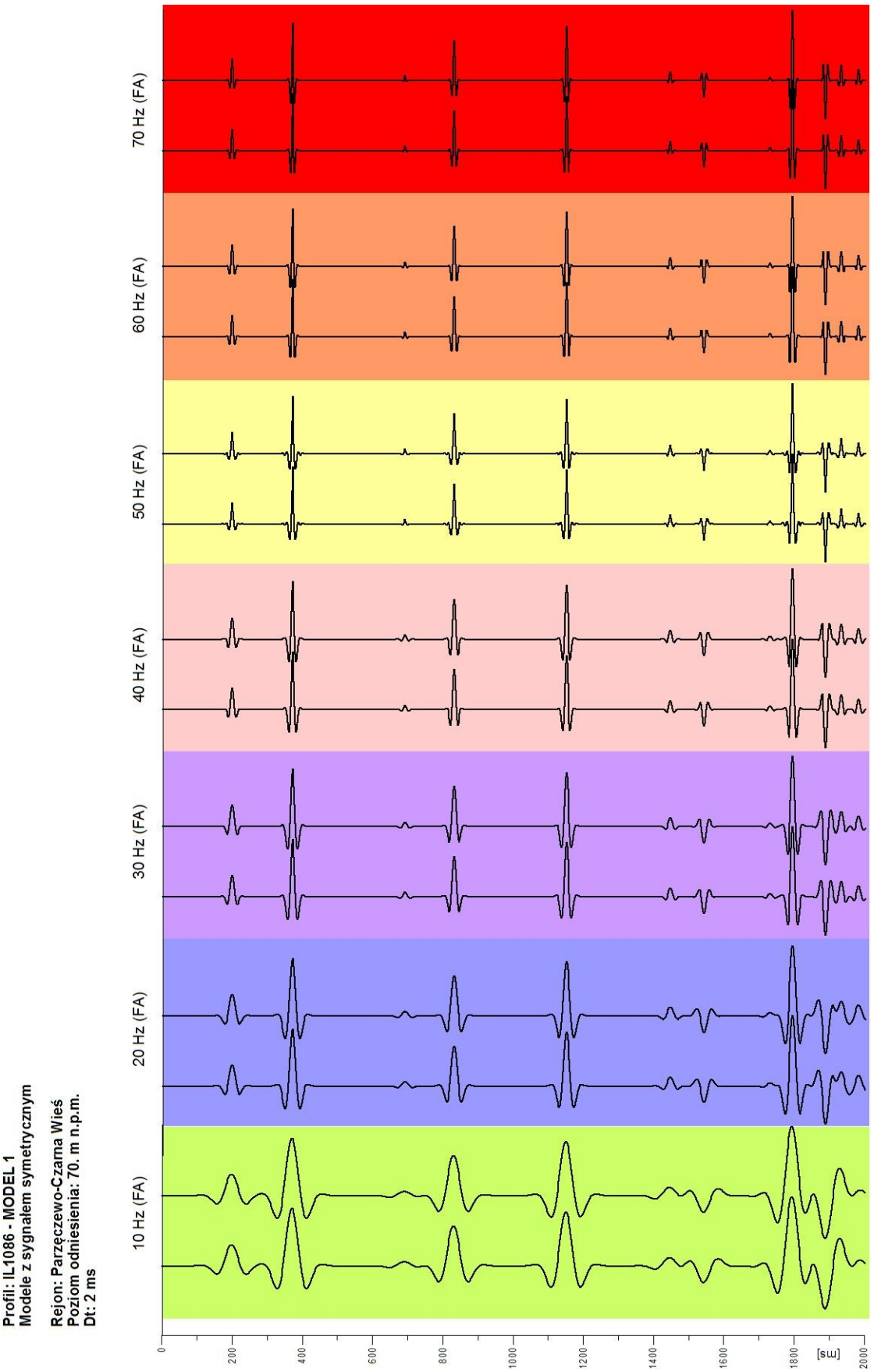
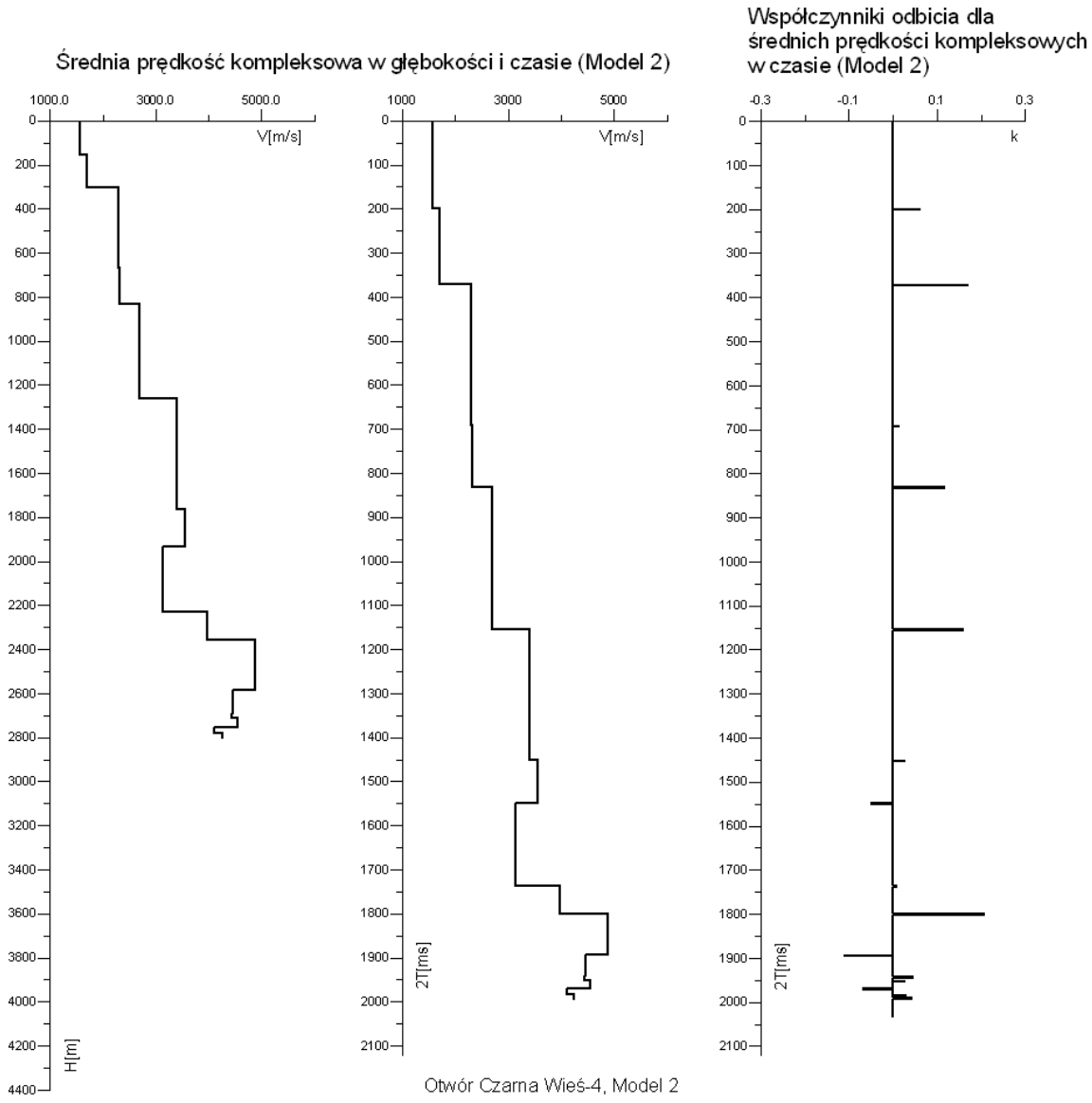

Profil: IL1086 - MODEL 1
Modele z sygnałem symetrycznym
Rejon: Parzęczewo-Czarna Wieś
Poziom odniesienia: 70. m n.p.m.
Dt: 2 ms
70 Hz (FA)
60 Hz (FA)
50 Hz (FA)
40 Hz (FA)
30 Hz (FA)
20 Hz (FA)
10 Hz (FA)
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
2000
[ms]

Fig. 1.1.18_135

Profil: IL1086 - MODEL 2

Otwór: CZARNA WIEŚ-4
Rejon: Parzęczewo-Czarna Wieś
Poziom odniesienia: wylot otworu 70. m n.p.m.
Dt: 2 ms



Nr w-wy	$H_{spąg}$ [m]	V [m/s]	ρ [g/cm³]	2T [ms]	K - wsp.odb.
1	156.16	1560.00	1.95097	200.00	0.06173
2	302.04	1702.00	2.02349	372.00	0.16806
3	668.88	2291.00	2.11061	692.00	0.01228
4	832.35	2328.00	2.12870	832.00	0.11710
5	1261.67	2684.00	2.33611	1154.00	0.15830
6	1766.25	3401.00	2.53709	1452.00	0.02486
7	1935.64	3548.00	2.55596	1548.00	-0.04992
8	2230.66	3142.00	2.61179	1736.00	0.00863
9	2357.60	3979.00	2.09831	1800.00	0.20588
10	2584.61	4881.00	2.59751	1894.00	-0.11118
11	2691.66	4471.00	2.26825	1942.00	0.04388
12	2713.68	4436.00	2.49600	1952.00	0.02572
13	2753.92	4541.00	2.56700	1970.00	-0.06862
14	2783.13	4113.00	2.47014	1984.00	0.02766
15	2795.67	4252.00	2.52533	1990.00	0.04220

Fig. 1.1.18_136

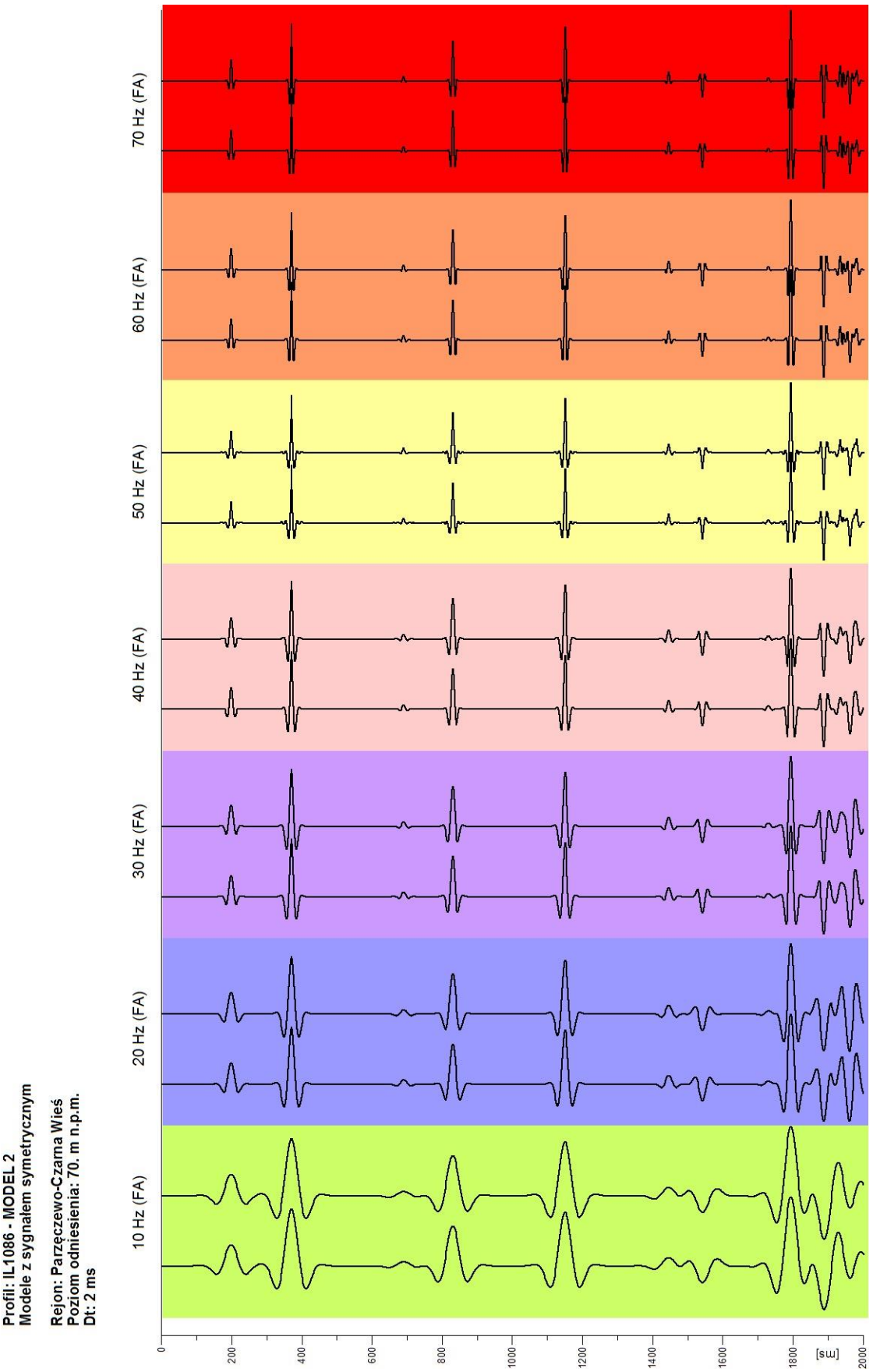
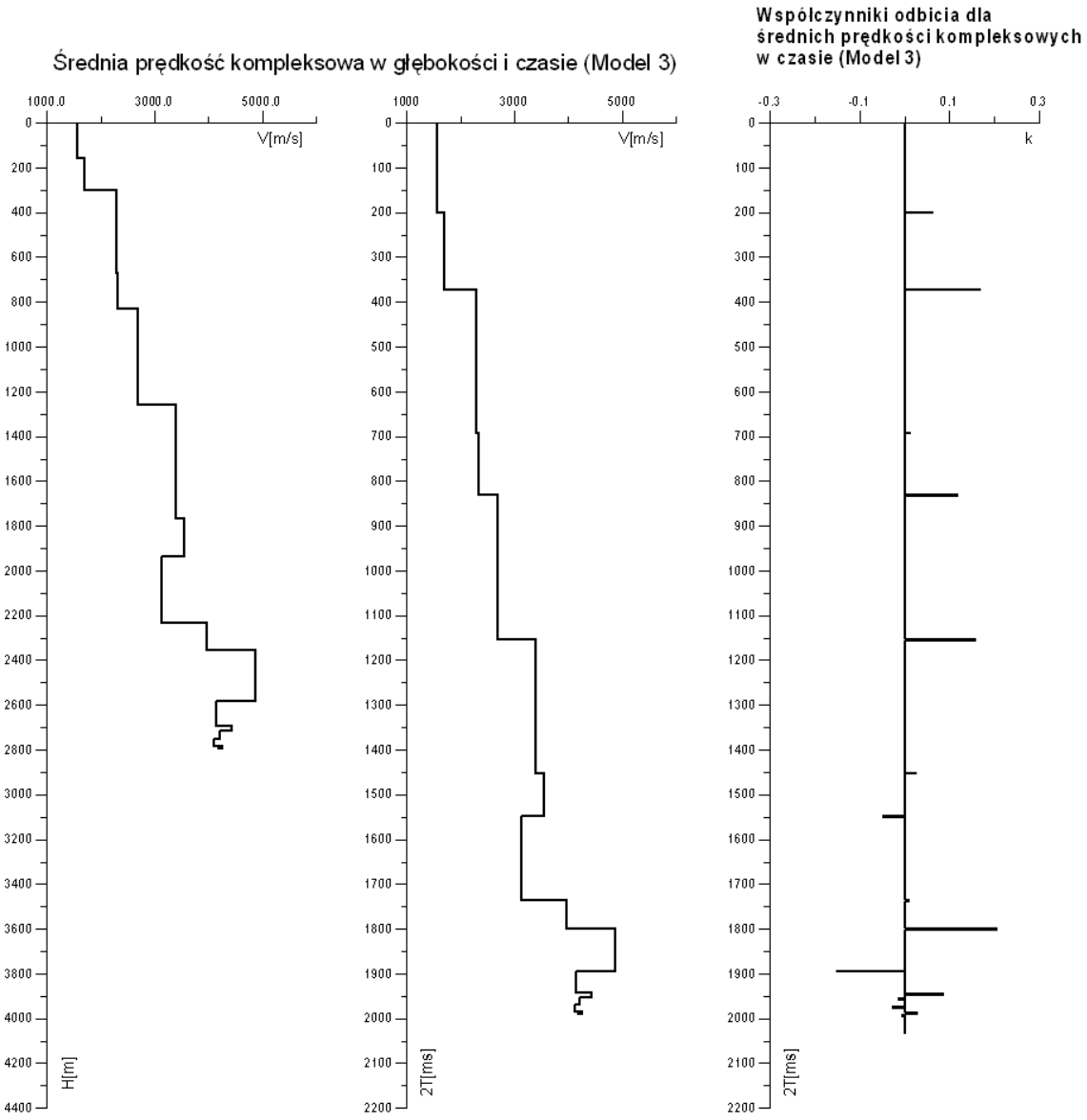

Profil: IL1086 - MODEL 2
Modele z sygnałem symetrycznym
Rejon: Parzęczewo-Czarna Wieś
Poziom odniesienia: 70. m n.p.m.
Dt: 2 ms
70 Hz (FA)
60 Hz (FA)
50 Hz (FA)
40 Hz (FA)
30 Hz (FA)
20 Hz (FA)
10 Hz (FA)
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
2000
[ms]

Fig. 1.1.18_137

Profil: IL1086 - MODEL 3

Otwór: CZARNA WIEŚ-4
Rejon: Parzęczewo-Czarna Wieś
Poziom odniesienia: wylot otworu 70. m n.p.m.
Dt: 2 ms



Otwór Czarna Wieś-4
Model 3

Nr w-wy	$H_{spąg}$ [m]	V [m/s]	ρ [g/cm^3]	2T [ms]	K - wsp.odb.
1	156.16	1560.00	1.95097	200.00	0.06173
2	302.04	1702.00	2.02349	372.00	0.16806
3	668.88	2291.00	2.11061	692.00	0.01228
4	832.35	2328.00	2.12870	832.00	0.11710
5	1261.67	2684.00	2.33611	1154.00	0.15830
6	1766.25	3401.00	2.53709	1452.00	0.02486
7	1935.64	3548.00	2.55596	1548.00	-0.04992
8	2230.66	3142.00	2.61179	1736.00	0.00863
9	2357.60	3979.00	2.09831	1800.00	0.20588
10	2584.61	4881.00	2.59751	1894.00	-0.15271
11	2691.66	4150.00	2.24557	1945.59	0.08597
12	2713.68	4436.00	2.49600	1955.52	-0.01596
13	2753.92	4220.00	2.54133	1974.59	-0.02704
14	2783.13	4113.00	2.47014	1988.79	0.02766
15	2795.67	4252.00	2.52533	1994.69	-0.00828

Fig. 1.1.18_138

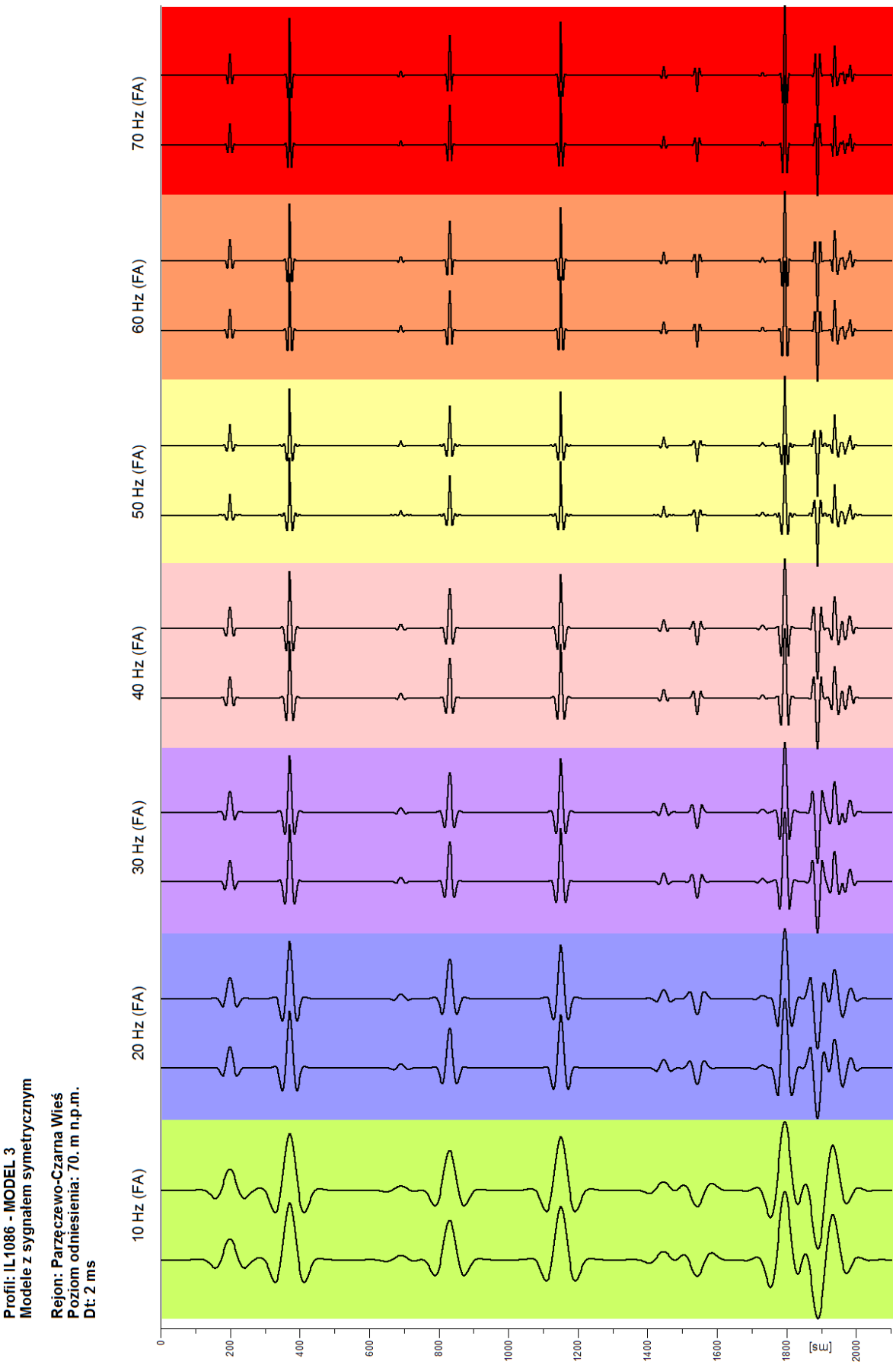
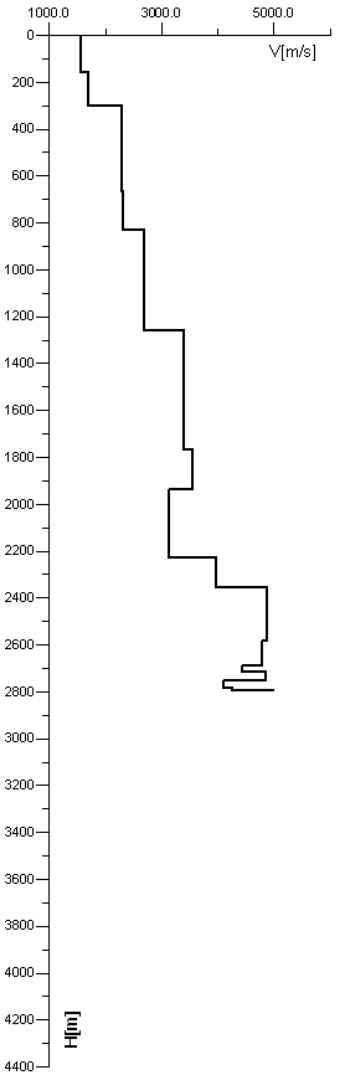

Profil: IL1086 - MODEL 3
Modele z sygnałem symetrycznym
Rejon: Parzęczewo-Czarna Wieś
Poziom odniesienia: 70. m n.p.m.
Dt: 2 ms
70 Hz (FA)
60 Hz (FA)
50 Hz (FA)
40 Hz (FA)
30 Hz (FA)
20 Hz (FA)
10 Hz (FA)
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
2000
[ms]

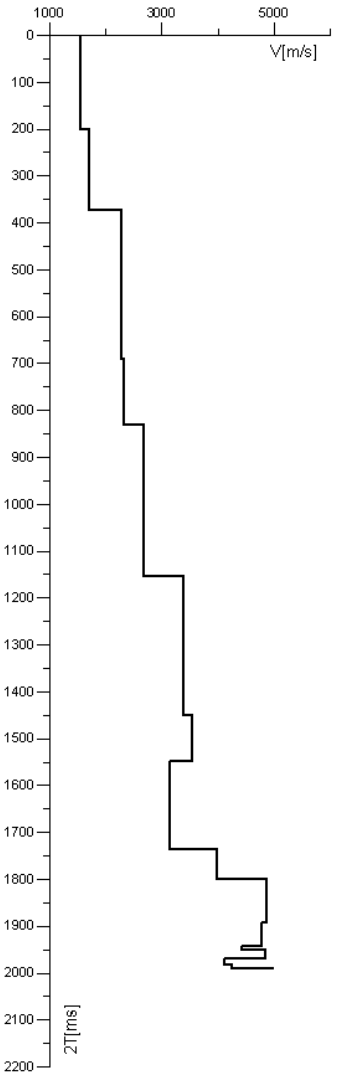
Fig. 1.1.18_139

Profil: IL1086 - MODEL 4

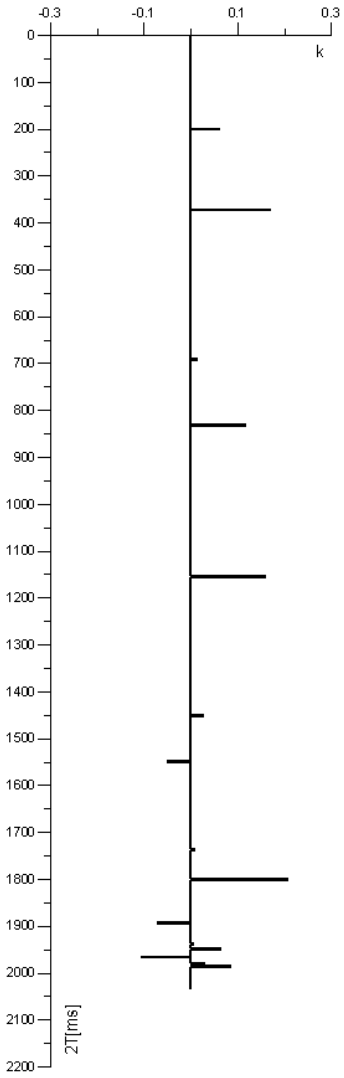
Otwór: CZARNA WIEŚ-4
Rejon: Parzęczewo-Czarna Wieś
Poziom odniesienia: wylot otworu 70. m n.p.m.
Dt: 2 ms

Średnia prędkość kompleksowa w głębokości i czasie (Model 4)





Współczynniki odbicia dla średnich prędkości kompleksowych w czasie (Model 4)



Otwór Czarna Wieś-4
Model 4

Nr w-wy	$H_{spąg}$ [m]	V [m/s]	ρ [g/cm^3]	2T [ms]	K - wsp.odb.
1	156.16	1560.00	1.95097	200.00	0.06173
2	302.04	1702.00	2.02349	372.00	0.16806
3	668.88	2291.00	2.11061	692.00	0.01228
4	832.35	2328.00	2.12870	832.00	0.11710
5	1261.67	2684.00	2.33611	1154.00	0.15830
6	1766.25	3401.00	2.53709	1452.00	0.02486
7	1935.64	3548.00	2.55596	1548.00	-0.04992
8	2230.66	3142.00	2.61179	1736.00	0.00863
9	2357.60	3979.00	2.09831	1800.00	0.20588
10	2584.61	4881.00	2.59751	1894.00	-0.07265
11	2691.66	4784.00	2.29118	1938.75	0.00505
12	2713.68	4436.00	2.49600	1948.68	0.06445
13	2753.92	4859.00	2.59267	1965.24	-0.10713
14	2783.13	4113.00	2.47014	1979.45	0.02766
15	2795.67	4252.00	2.52533	1985.35	0.08548

Fig. 1.1.18_140

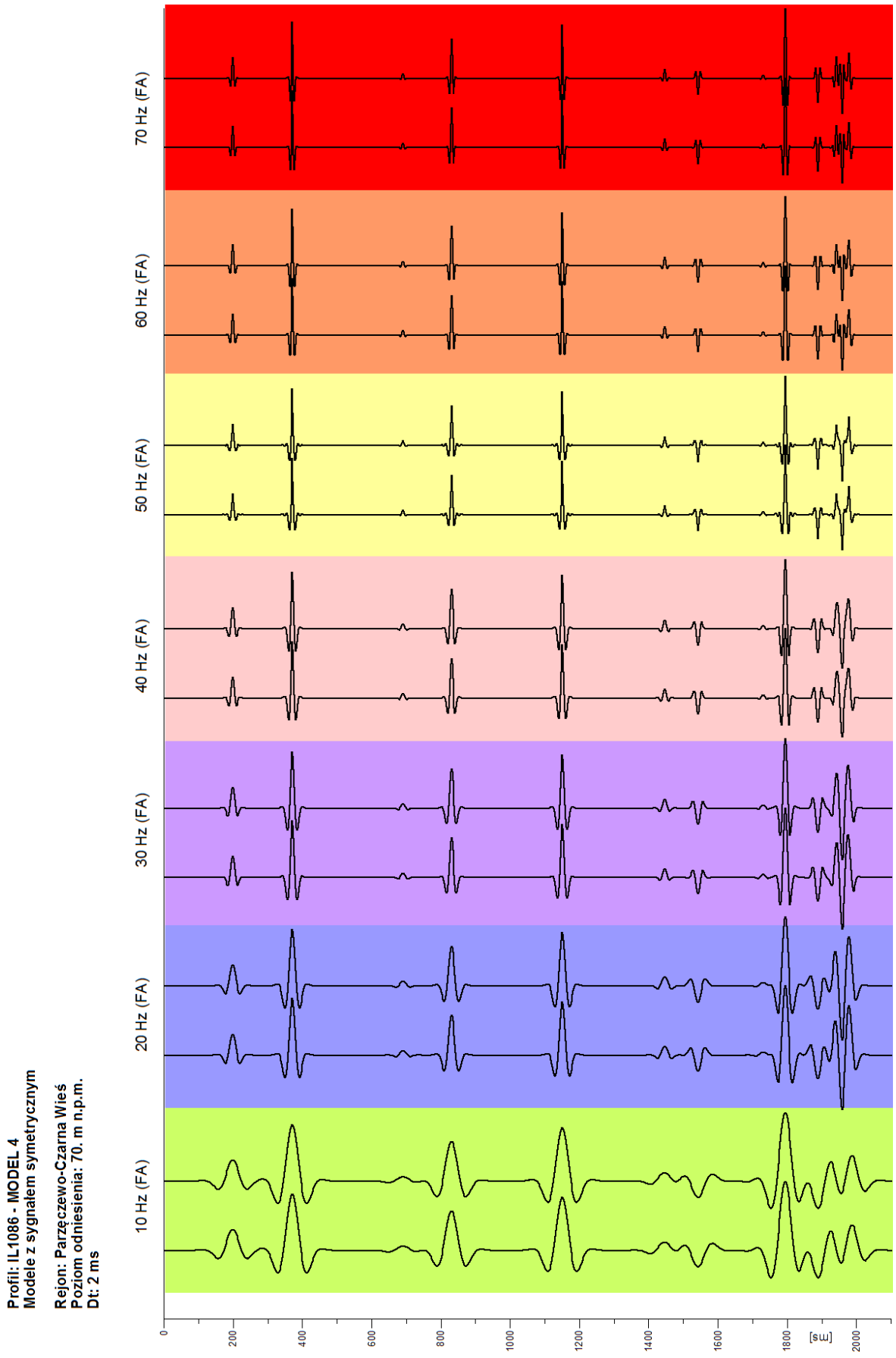
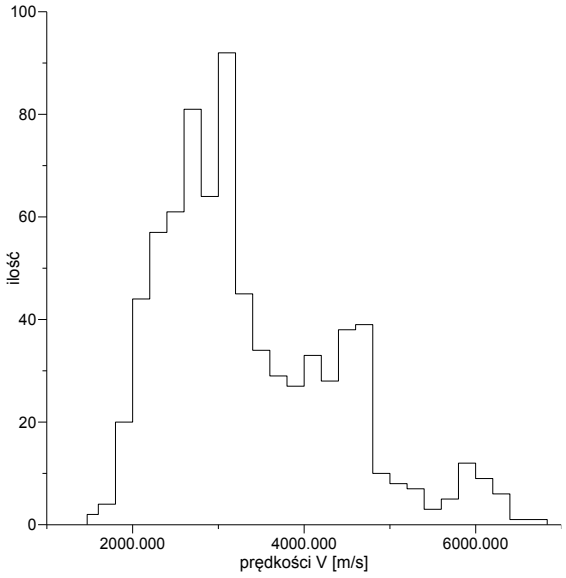

Profil: IL1086 - MODEL 4
Modele z sygnałem symetrycznym
Rejon: Parzęczewo-Czarna Wieś
Poziom odniesienia: 70. m n.p.m.
Dt: 2 ms
70 Hz (FA)
60 Hz (FA)
50 Hz (FA)
40 Hz (FA)
30 Hz (FA)
20 Hz (FA)
10 Hz (FA)
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
2000
[ms]

Fig. 1.1.18_141

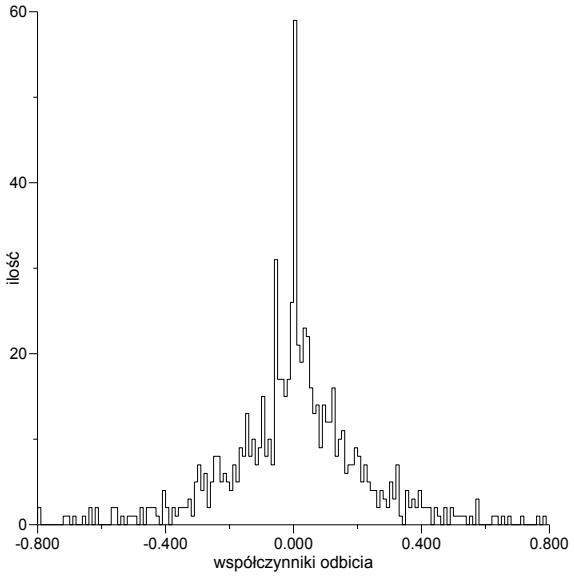
Otwór: Paproć-4

Rejon: Paproć

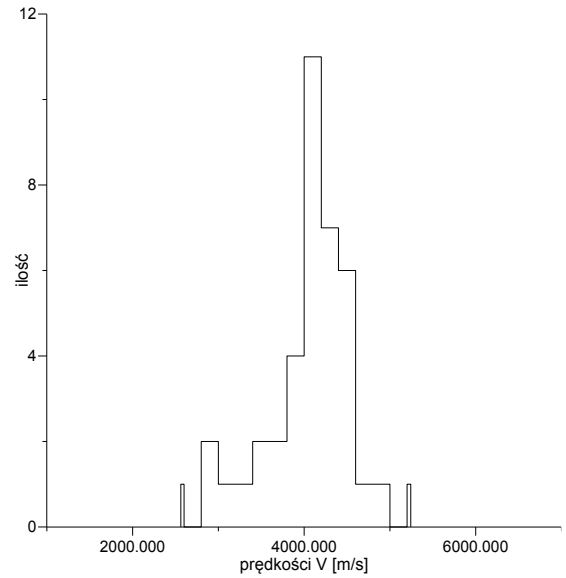
HISTOGRAM prędkości V [m/s]
okno 2T[ms]: 180 - 1700
Krok wartości: 200 m/s



HISTOGRAM współczynników odbicia
okno 2T[ms]: 180 - 1700
Krok wartości: 0.01



HISTOGRAM prędkości V [m/s]
okno 2T[ms]: 1622 - 1700
Krok wartości: 200 m/s



HISTOGRAM współczynników odbicia
okno 2T[ms]: 1622 - 1700
Krok wartości: 0.01

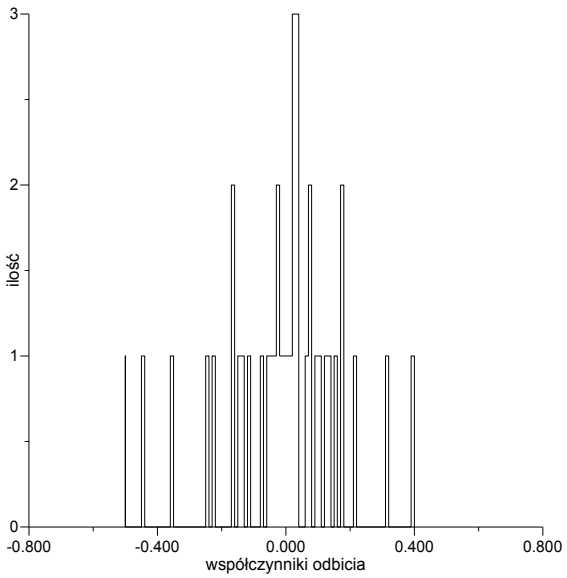
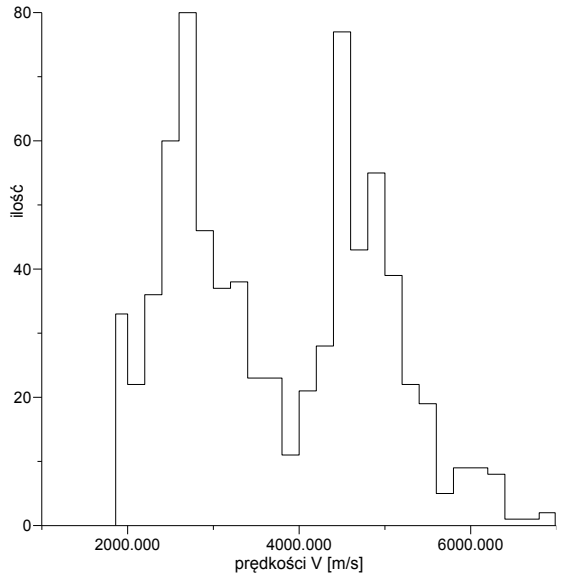


Fig. 1.1.18_142

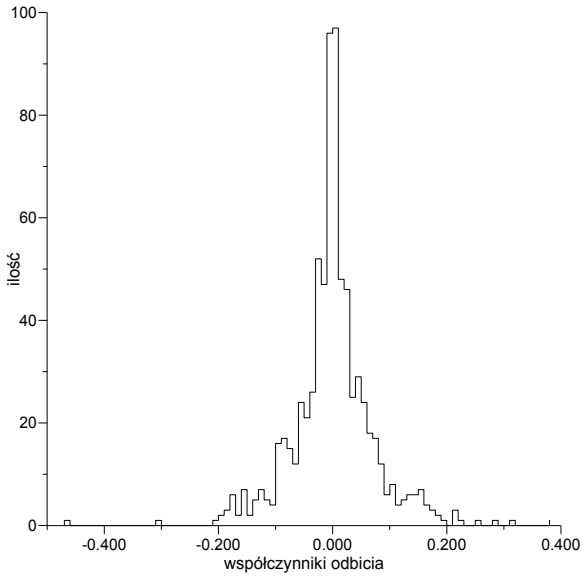
Otwór: Paproć-9

Rejon: Paproć

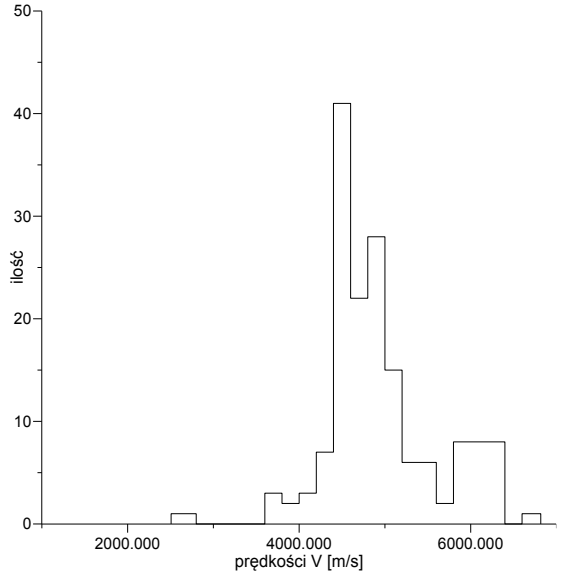
HISTOGRAM prędkości V [m/s]
okno 2T[ms]: 234- 1728
Krok wartości: 200 m/s



HISTOGRAM współczynników odbicia
okno 2T[ms]: 234- 1728
Krok wartości: 0.01



HISTOGRAM prędkości V [m/s]
okno 2T[ms]: 1404- 1728
Krok wartości: 200 m/s



HISTOGRAM współczynników odbicia
okno 2T[ms]: 1404- 1728
Krok wartości: 0.01

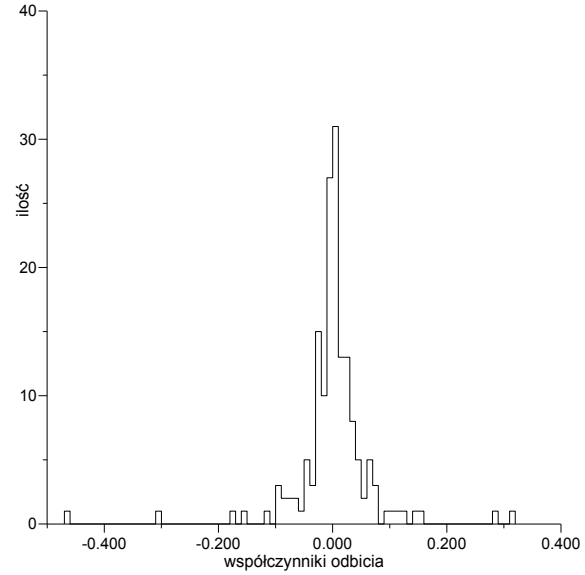
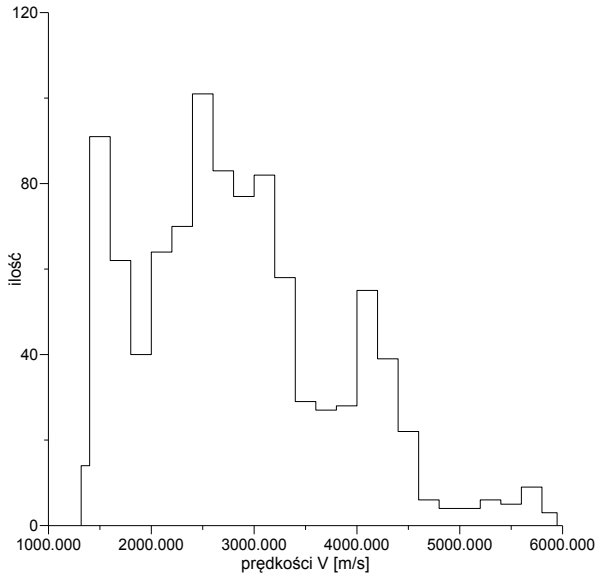


Fig. 1.1.18_143

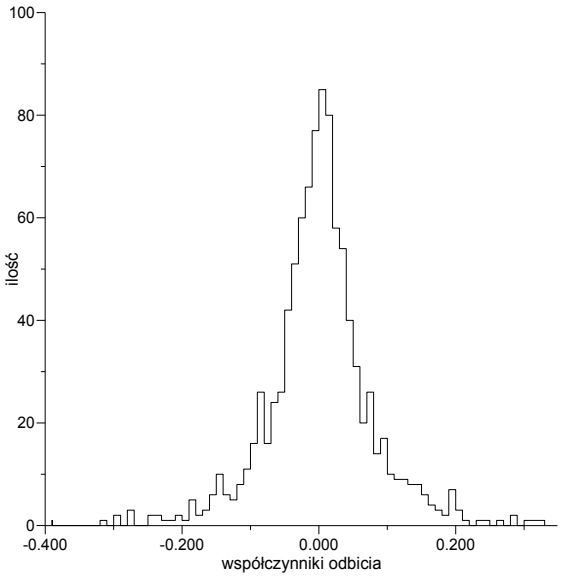
Otwór: Czarna Wieś-4

Rejon: Parzęczewo - Czarna Wieś

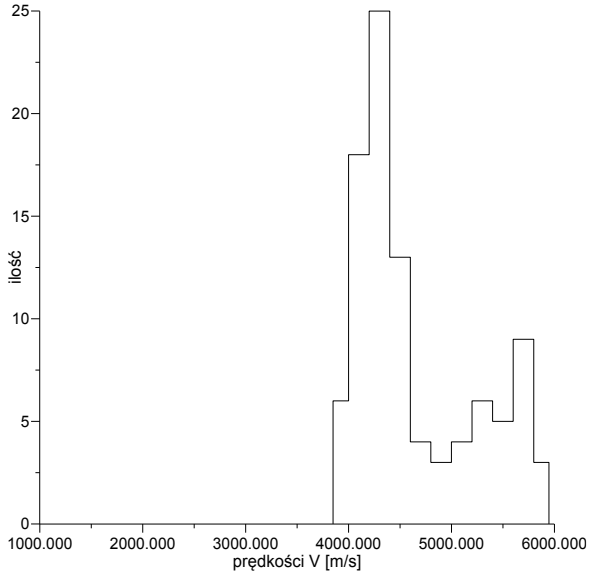
HISTOGRAM prędkości V [m/s]
okno 2T[ms]: 34 - 1990
Krok wartości: 200 m/s



HISTOGRAM współczynników odbicia
okno 2T[ms]: 34 - 1990
Krok wartości: 0.01



HISTOGRAM prędkości V [m/s]
okno 2T[ms]: 1800 - 1990
Krok wartości: 200 m/s



HISTOGRAM współczynników odbicia
okno 2T[ms]: 1800 - 1990
Krok wartości: 0.01

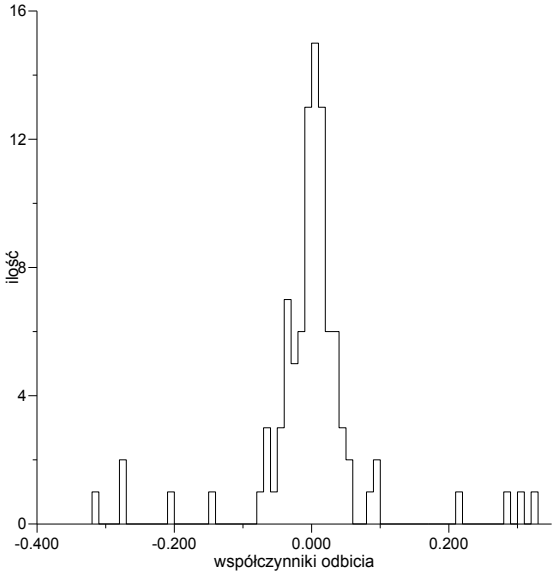


Fig. 1.1.18_144

Bibliografia przedmiotu informuje (Atkinson J., Davis T., 2011), że zmiana prędkości przy zastąpieniu medium złożowego przez CO2 wynosi ok. 10% dla fali podłużnej oraz ok. 6-7% dla fali poprzecznej.

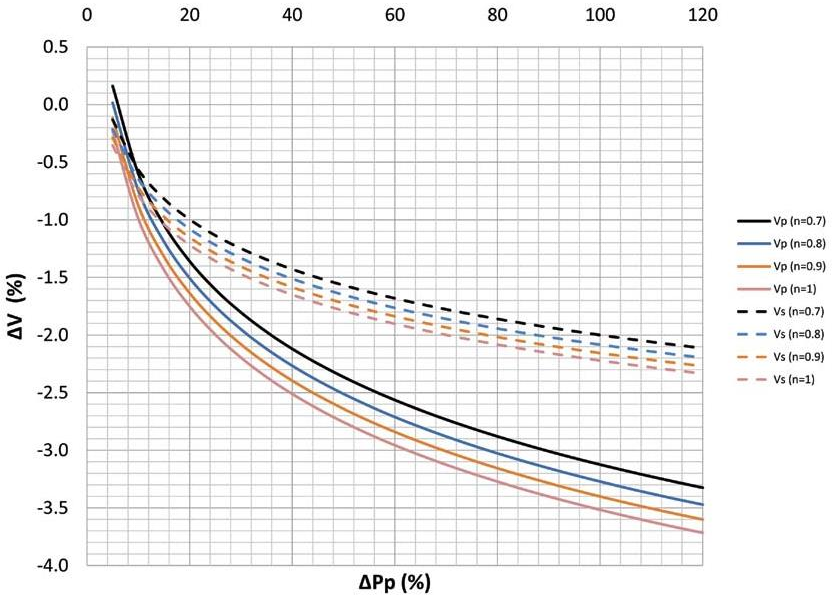


Fig. 1.1.18_145 Przewidywana zależność zmienności prędkości fal podłużnych i poprzecznych jako efekt zmiany ciśnienia w warstwie złożowej [wg Atkinson J., Davis T., 2011]

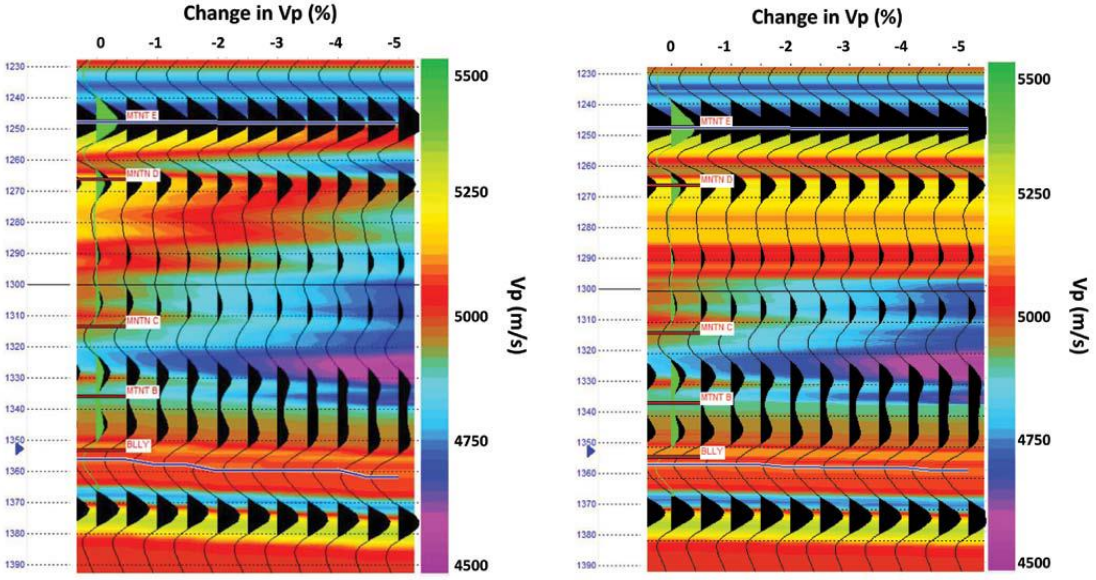


Fig. 1.1.18_146 Zero-offsetowy model sejsmiczny dokumentujący zmienność prędkości fali podłużnej w zależności od rozległości strefy podwyższonego ciśnienia (100m) i (300m) [wg Atkinson J., Davis T., 2011].

Dwumodalne rozkłady prędkości dobrze charakteryzują akustyczne właściwości tego rejonu (piaskowce: Vp = 2800 – 3200 m/s; wapienie: Vp = 4500 m/s; dolomity, anhydryty: Vp = 5800 – 6200 m/s). Praktycznie charakteryzują stratygrafię profilu. Znacznie bardziej „normalny" jest rozkład współczynników odbicia liczony z krokiem 0.01, który charakteryzuje raczej litofacjalną specyfikę profilu.

Odnosząc się do tabel pokazanych wcześniej (**Fig. 1.1.18_121 – 1.1.18_140**), zauważa się wartość współczynnika odbicia -0.04992 przy zmianie prędkości na granicy od V_1 = 3548 m/s do V_2 = 3142 m/s (ρ = 2.55 i 2.61), natomiast dla kolejnej granicy (V_1 = 3142 m/s do V_2 = 3979 m/s; ρ_1 = 2.09 i ρ_2 = 2.59) wartość współczynnika odbicia wynosi +0.20588.

Funkcja refleksyjności ośrodka bardzo silnie decyduje o „podatności" na monitorowanie zmienności pola falowego w ośrodku. Najtrudniejszym przypadkiem są tzw. ośrodki ekwiwalentne, kiedy określone działanie (np. eksploatacja, zatłaczanie CO2) wywołuje skutki niezauważone przez propagującą falę sejsmiczną.

Najbardziej wiarygodnie ośrodek jest opisany przez trasy sejsmiczne. Dla każdego modelu uśrednionego (prędkości kompleksowe), przedstawiono kilkanaście granic które powinny dać odbicia. Czy zauważalne – zależy od rozdzielczości. Rozważane modele były niezwykle uproszczone, niemniej można zauważyć, że poniżej 30 Hz pole falowe nie jest dostatecznie rozdzielcze, aby wyodrębnić drobne zmiany parametru Vp. Szczególnie dotyczy to modelu 2 symulującego zatłaczanie. Np. na krzywej refleksyjności Paproć-4 występuje 16 współczynników odbicia, natomiast na trasie sejsmicznej nawet przy najwyższej częstotliwości obserwujemy tylko 13 grup refleksów. W tym przypadku wydaje się, że najlepiej nośną częstotliwością jest sygnał 50 Hz.

Dość podobne obserwacje dotyczą rejonu Czarnej Wsi. Zmienność w ośrodku symulują współczynniki odbicia (Modele 1-4) poniżej spągu cechsztynu, które pomagają zinterpretować pole falowe w którego obrazie trudno się dopatrzeć 16-stu odrębnych refleksów.

Przypomnijmy, jest to przypadek modelowy; łatwo wyobrazić sobie o ile to trudniejsze zadanie na materiale rzeczywistym z dużym udziałem szumu.

Wymienione modelowania pozwalają odpowiedzieć na dwa pytania:

- Czy jest szansa aby „zobaczyć" efekt zatłaczania w omawianym fragmencie Niecki Poznańskiej?

- Czy zmienność parametrów petrofizycznych i złożowych na przestrzeni omawianych rejonów Paproć – Czarna Wieś, pozwala na poszerzenie sugestii bardziej w kierunku płd.-wsch.?

Odpowiedź na pierwsze pytanie w pewnym zakresie zawarta jest w zestawieniu na **Fig. 1.1.18_147** Możemy zobaczyć efekt substytucji medium nasycającego pod warunkiem doskonale dobranego schematu przetwarzania i wysokiej rozdzielczości danych sejsmicznych.

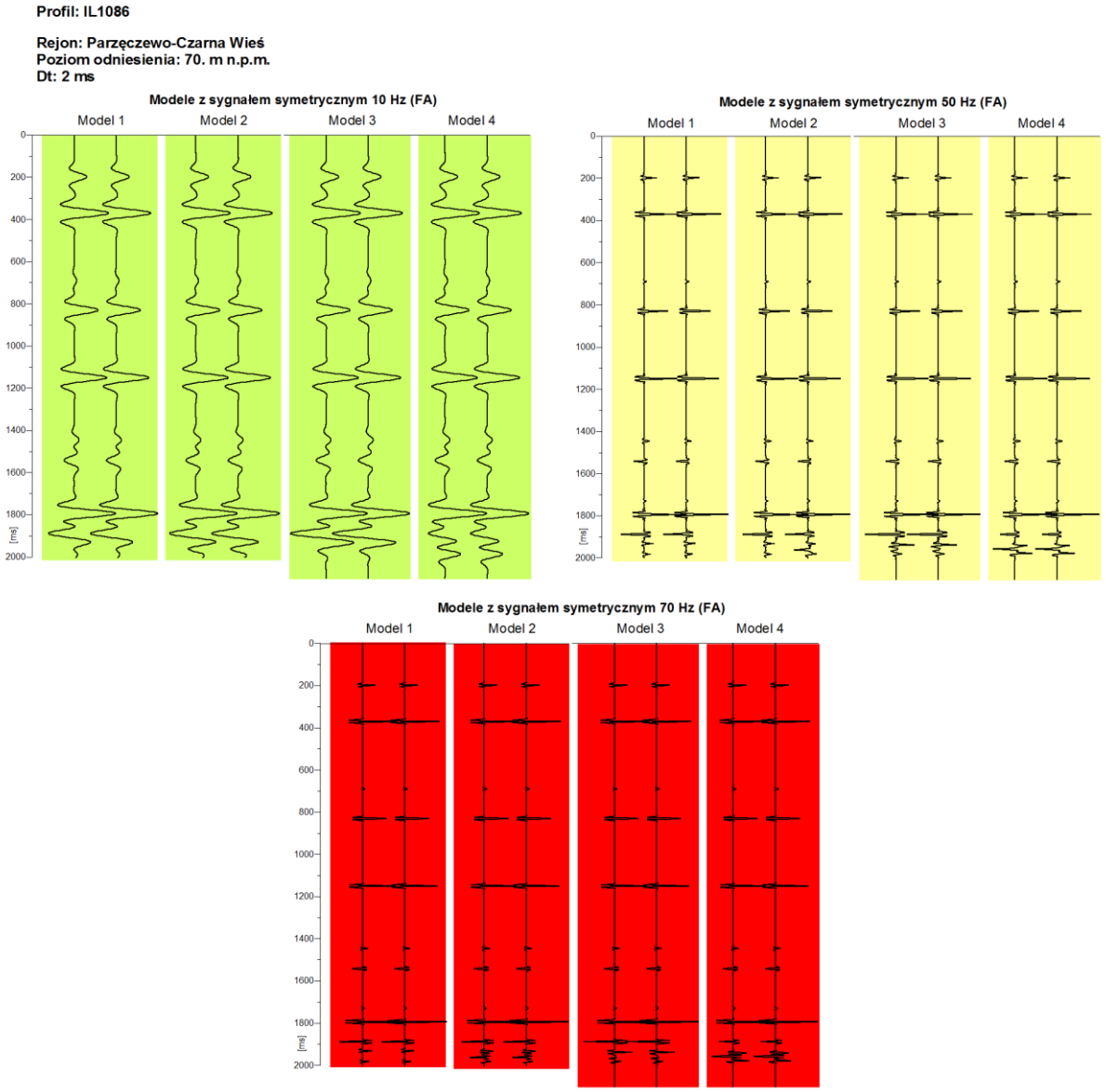


Fig. 1.1.18_147 Sejsmiczny obraz falowy stymulowany zmiennymi parametrami ośrodka

Odpowiedź na drugie pytanie sugeruje porównanie wyników modelowania przedstawione na **Fig. 1.1.18_148**. Figura ta relacjonuje zmienność ośrodka na przestrzeni Paproć – Czarna Wieś, przy uwzględnieniu zmiany parametrów ośrodka poniżej stropu cechsztynu. Czasowa różnica tego horyzontu jest bardzo niewielka, zaledwie 27 ms czasu podwójnego (1596,66 ms i 1623,11 ms).

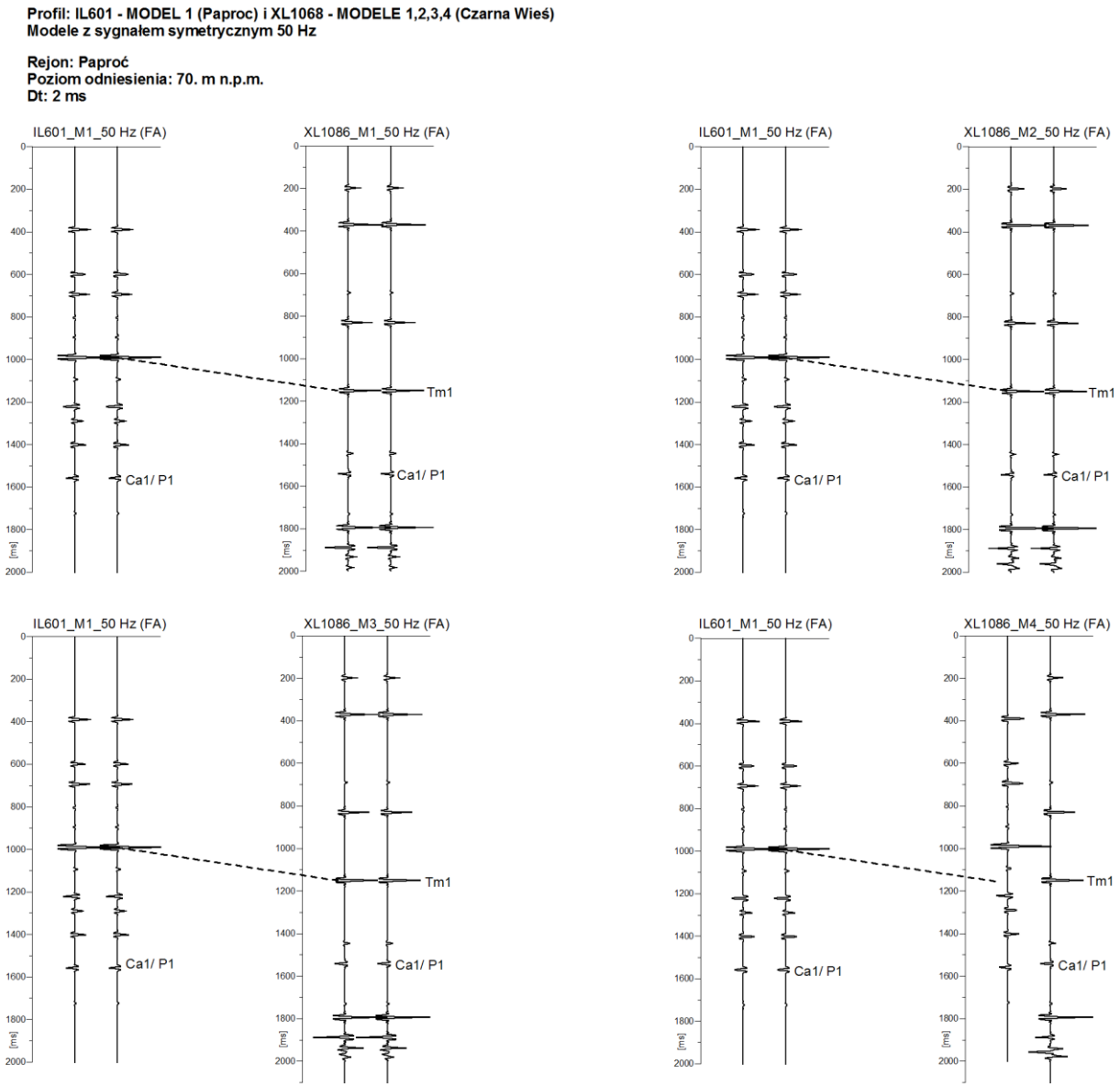


Fig. 1.1.18_148 Porównanie wyników modelowania na przestrzeni obiektów Paproć – Czarna Wieś

Jakkolwiek dotychczasowo przytoczone wyniki są poprawne w sensie metodycznym i obliczeniowym, muszą być traktowane z należytym dystansem, który wynika z relacji model teoretyczny – rzeczywiste dane polowe.

Modele rzeczywiste i dane pomiarowe - przedział ufności i zakres dopuszczalnej wiarygodności

Wybrany i przedstawiony sposób rozwiązania został zweryfikowany w sensie zgodności modelu z danymi rzeczywistymi. W tym celu dla rzeczywistych sekcji sejsmicznych z rejonu Paproci (**Fig. 1.1.18_149**i **150**) wykonano inwersje sejsmiczną i dla uzyskanego pola prędkości –**Fig. 1.1.18_151**(a,b) i **Fig. 1.1.18_152**(a,b) – obliczono rozkłady.

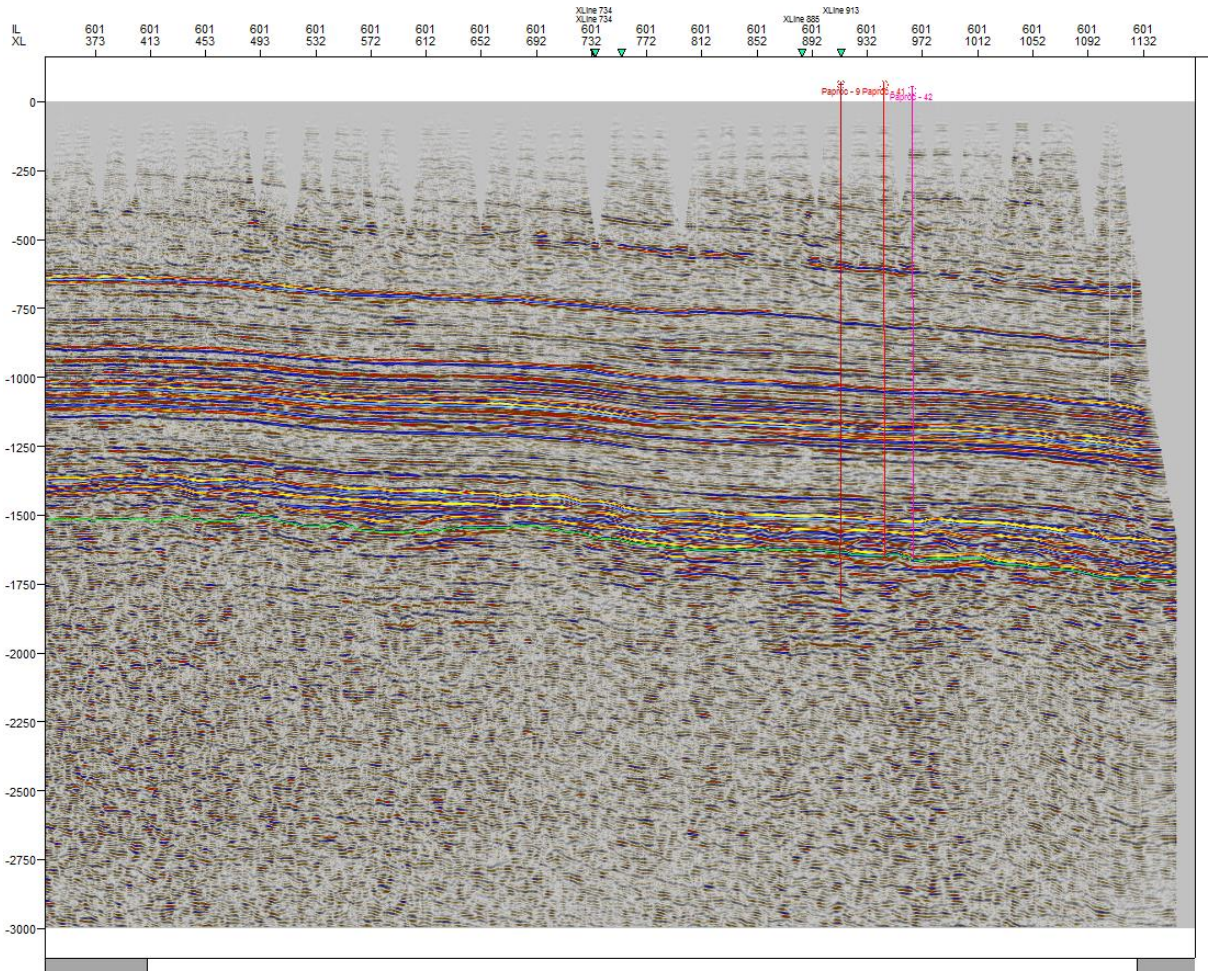


Fig. 1.1.18_149 IL601; otwory: Paproć-9, Paproć-41, Paproć-42

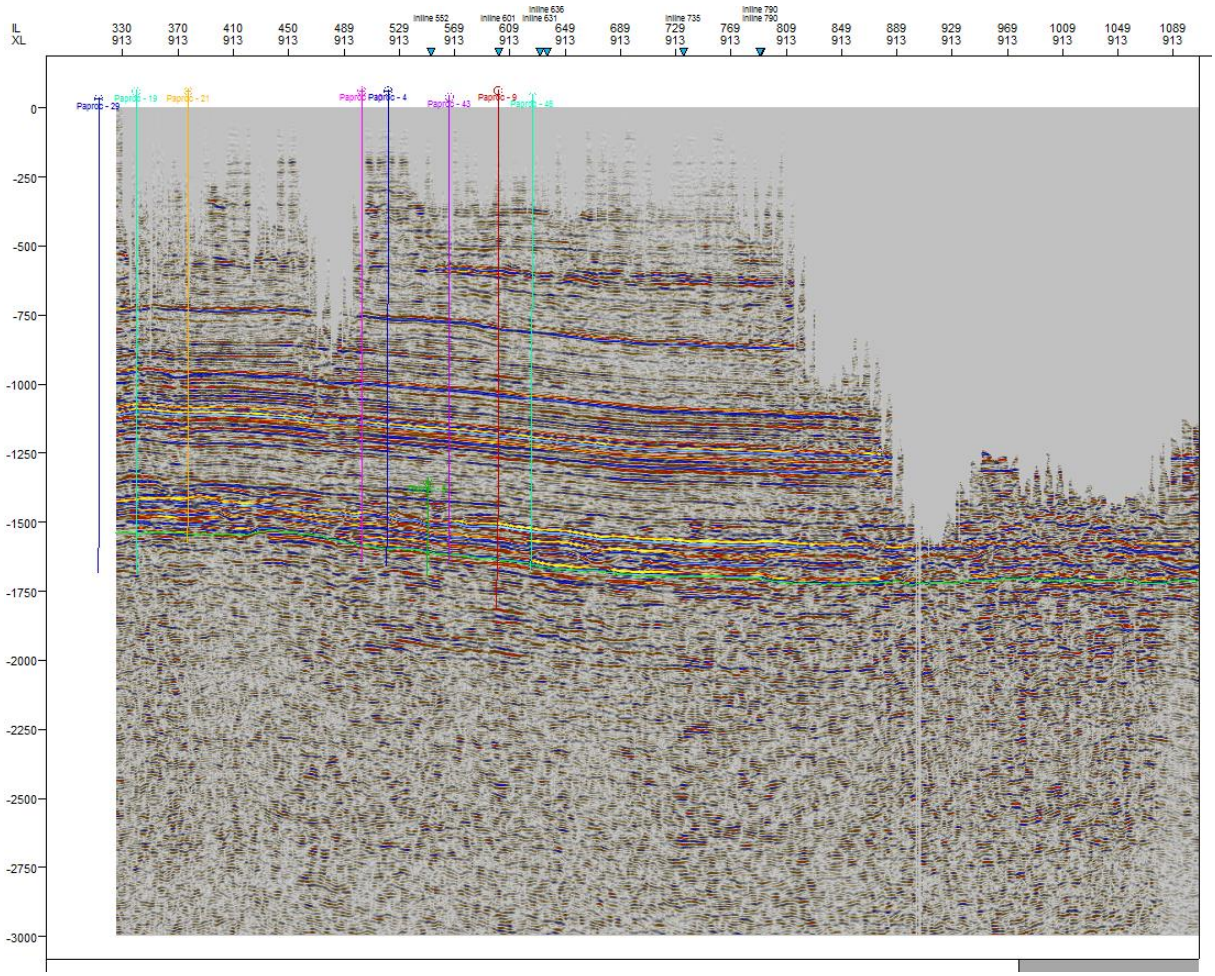


Fig. 1.1.18_150 Profil XL913, otwory: P-29, P-19, P-21, P-10, P-4, P-43, P-9, P-46

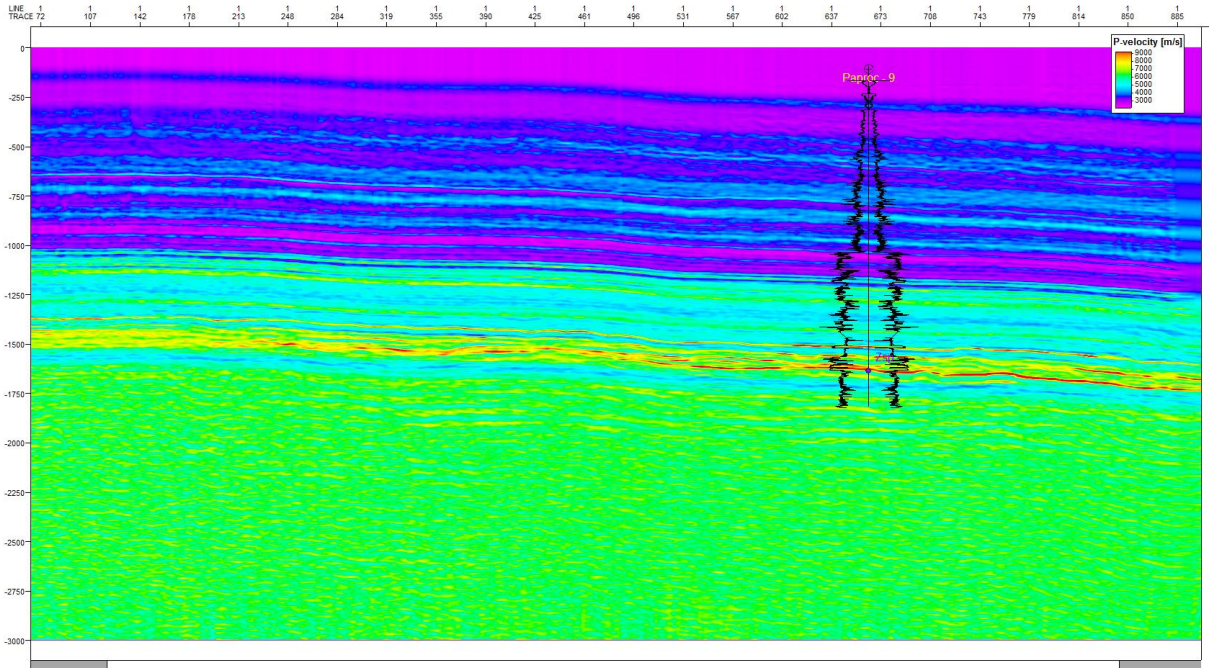


Fig. 1.1.18_151a Profil IL601. Pole prędkości akustycznych

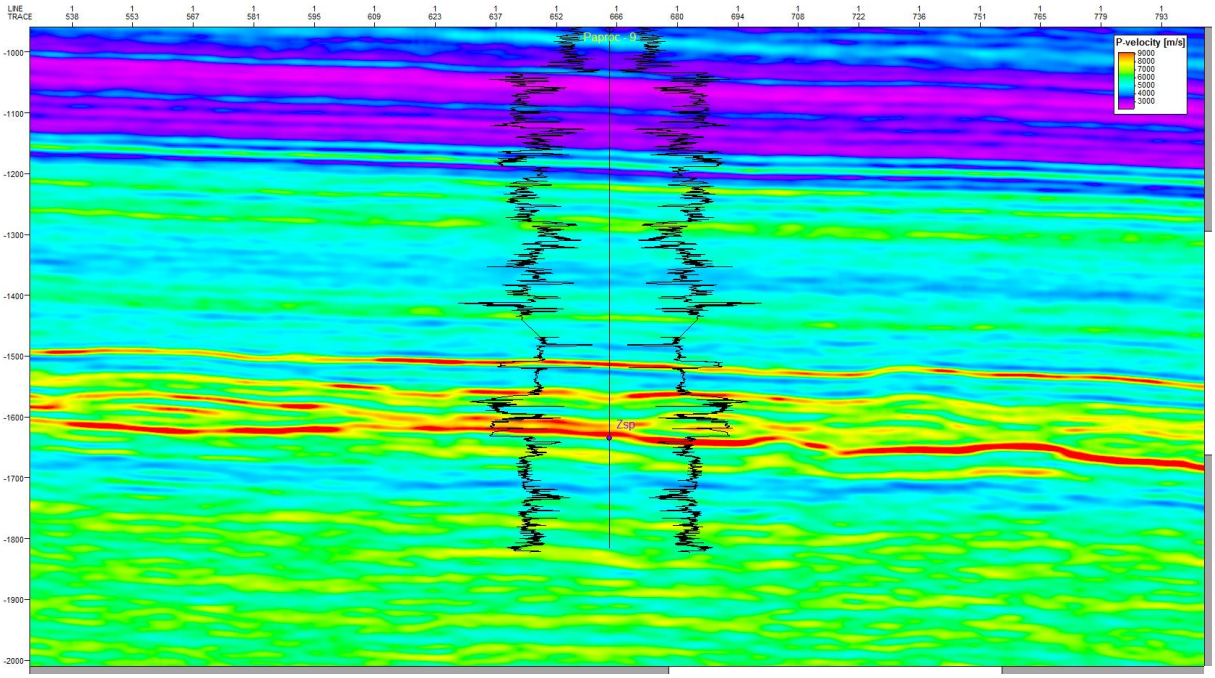


Fig. 1.1.18_151b Profil IL601. Pole prędkości akustycznych – zoom

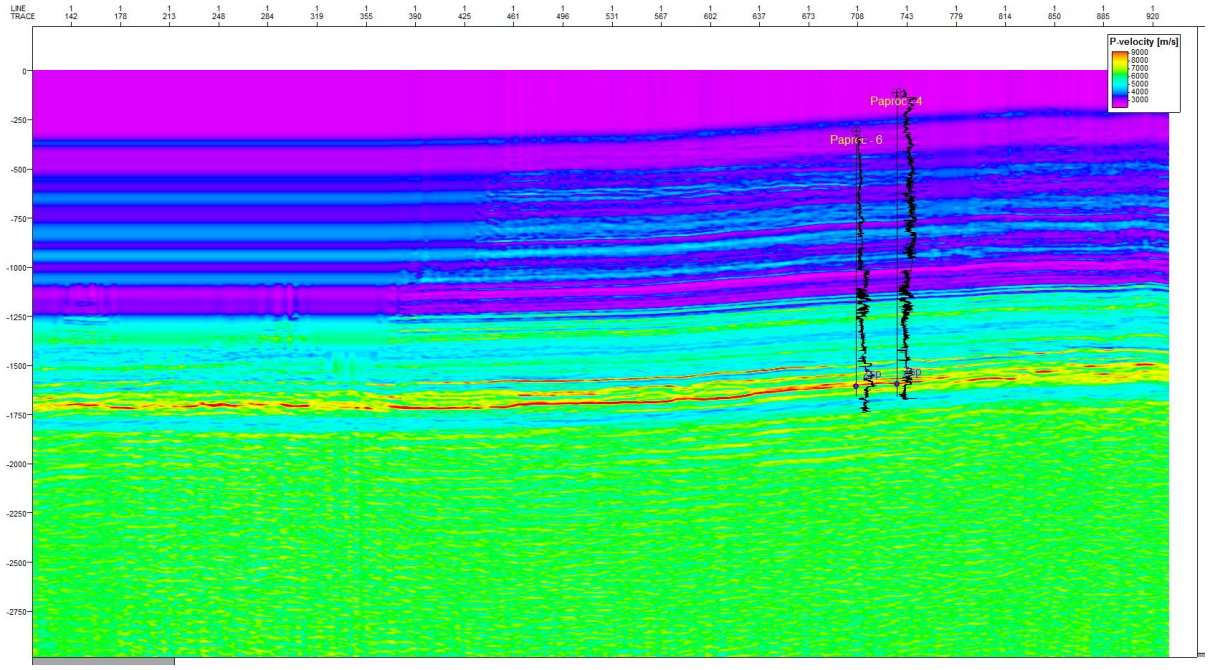


Fig. 1.1.18_152a Profil XL913. Pole prędkości akustycznych

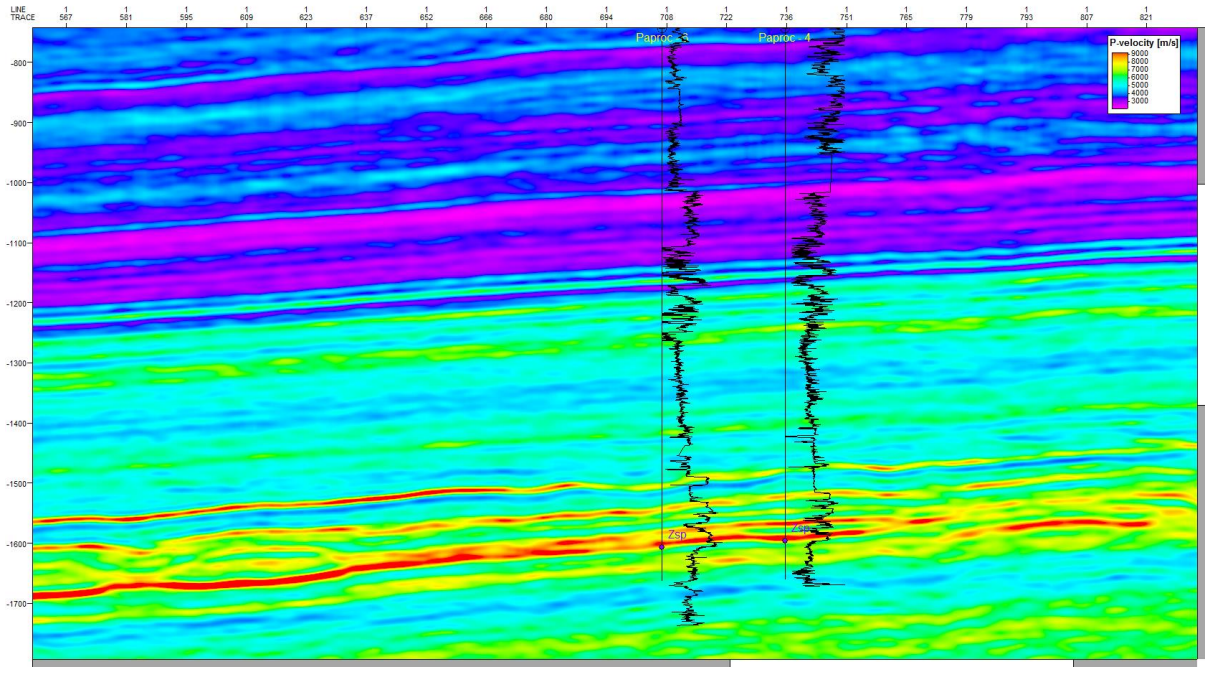


Fig. 1.1.18_152b Profil XL913. Pole prędkości akustycznych – zoom

Porównanie rozkładów prędkości z otworu oraz po inwersji sejsmicznej (**Fig. 1.1.18_153**) dokonane w dwóch różnych zakresach głębokości, do czasu 2T = 1700 ms oraz 3000 m/s wskazuje na większy udział wysokich wartości prędkości, co jest oczywiste (V = f(H)). Natomiast dwumodalny typ rozkładów utrzymuje się w obydwu przypadkach.

Jak więc widać, można tak dobrać metodykę i schemat obliczeń, aby realizując studium wykonalności skrócić do minimum dystans pomiędzy modelem a rzeczywistością.

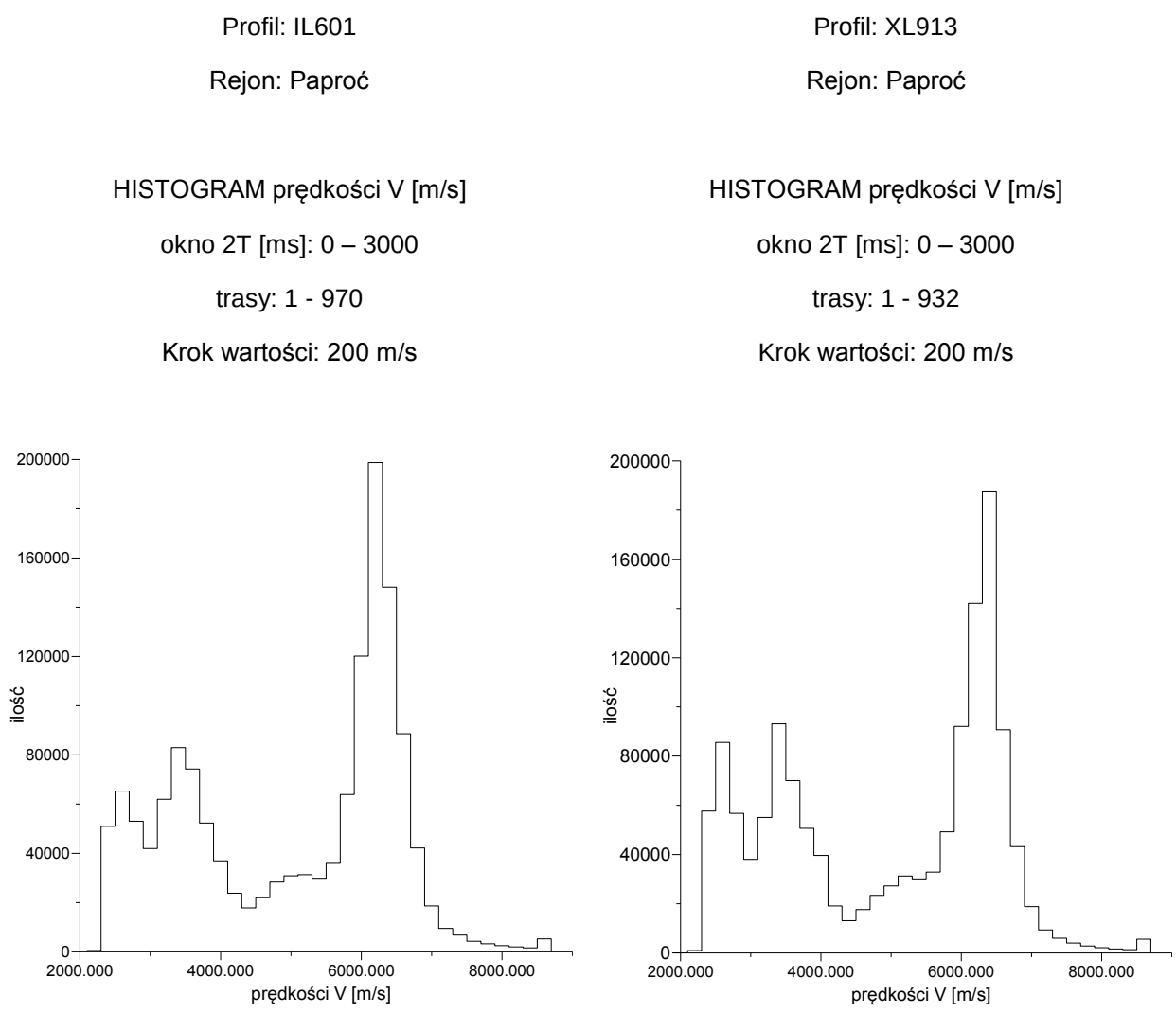


Fig. 1.1.18_153 Rozkład prędkości akustycznych obliczonych na profilach IL601 i XL913 na drodze inwersji sejsmicznej

Zakończenie

Monitorowanie przebiegu składowania CO2, bez względu na rodzaj środowiska geologicznego, to jeden z najważniejszych elementów procesu Carbon Capture Sequestration (CCS). Prowadzone być musi z wykorzystaniem pełnej wiedzy, w perspektywie światowej już aktualnie dostatecznej, oraz z zachowaniem wszelkich zasad technologicznych i formalnych.

W świetle prowadzonego w projekcie pt. „*Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO2 wraz z programem ich monitorowania*" rozpoznania zagadnień monitorowania, zasadnym wydaje się wniosek, aby przed podjęciem działań związanych z konkretnym zatłaczaniem, wykonać studium wykonalności monitoringu na podstawie analizy sejsmicznego pola falowego w danym rejonie. Możliwe są bowiem takie sytuacje, iż proces zatłaczania przeprowadzono z pozytywnym wynikiem, natomiast śledzenie dynamiki medium zatłaczanego jest znacznie utrudnione ze względu na budowę samej formacji składowiskowej, jak też nadległej i podścielającej.

W tym celu konieczne jest bardzo szczegółowe, sejsmiczne rozpoznanie ośrodka, umożliwiające wielowariantowe, matematyczne modelowanie przewidywanych efektów.

Przedstawione opracowanie wypunktowało ważne etapy takiego rozwiązania.

Struktury naftowe

W przypadku kolektorów w wyeksploatowanych złożach gazu ziemnego i/lub ropy naftowej - prace wykonano dla dwóch (trzech) obiektów:

- złoże gazu Wilków koło Głogowa (możliwe składowanie CO2 od emitentów średniej wielkości, tzn. np. z Zagłębia Miedziowego, wspomaganie wydobycia gazu raczej mało perspektywiczne w porównaniu z przypadkiem złoża ropy),

- złoże ropy Nosówka koło Rzeszowa (możliwe wspomaganie wydobycia ropy przez zatłaczanie CO2 od niedużego emitenta z Rzeszowa lub Tarnowa),

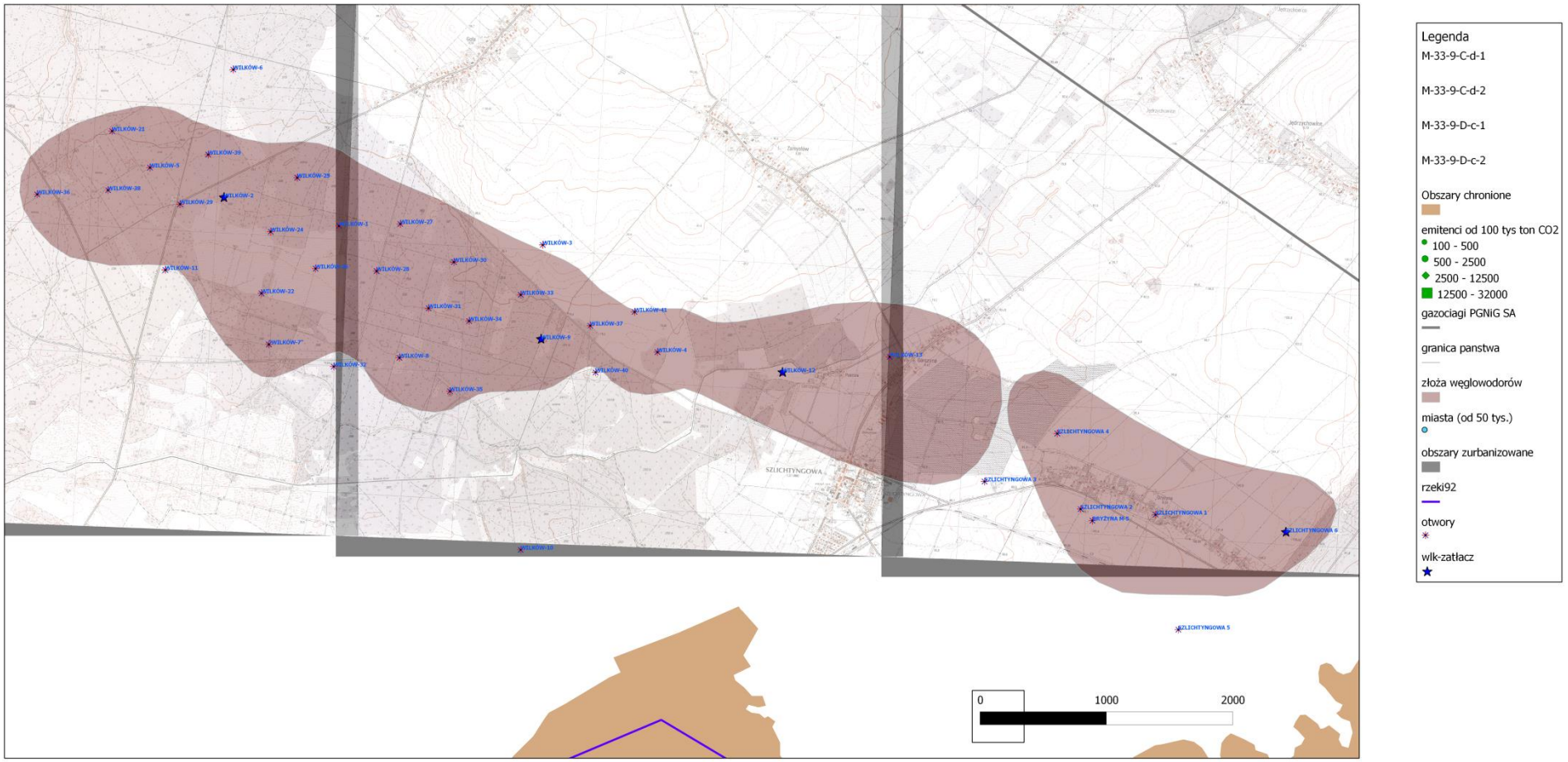
- złoże gazu i kondensatu Łąkta wraz z z podścielającym poziomem solankowym (możliwe składowanie CO2 od emitentów średniej wielkości, z aglomeracji krakowskiej lub Tarnowa, obok składowania w solankach także wspomaganie wydobycia gazu i kondensatu na niewielką skalę); przypadek pośredni miedzy scenariuszem 3 (obiekt solankowy) i 4 (struktury naftowe) (3a). Wyniki zadania **1.1.16** wraz z **1.1.17** i **1.1.18**, które było realizowane wyłącznie przez **INiG**, z uwagi na powyższe informacje, zostały zamieszczone w osobnym tomie opracowania końcowego dla II Segmentu.

Zgodnie z wnioskami z prac przeprowadzonych w ramach zadania **1.1.17** definitywne określenie możliwości bezpiecznego geologicznego składowania oraz późniejsze monitorowanie zachowania się zatłoczonego CO2 dla rozpatrywanych obiektów wymaga dokładnego rozpoznania kompleksu składowania. Do tego celu niezbędne jest zgodnie z zasadami sztuki wykonanie przed zatłaczaniem monitoringu zerowego (Chadwick et al., 2008). Z kolei prace wykonane w ramach monitoringu zerowego powtarza się z różną częstotliwością, w zależności od metody i etapu projektu demonstracyjnego, w trakcie zatłaczania 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*).

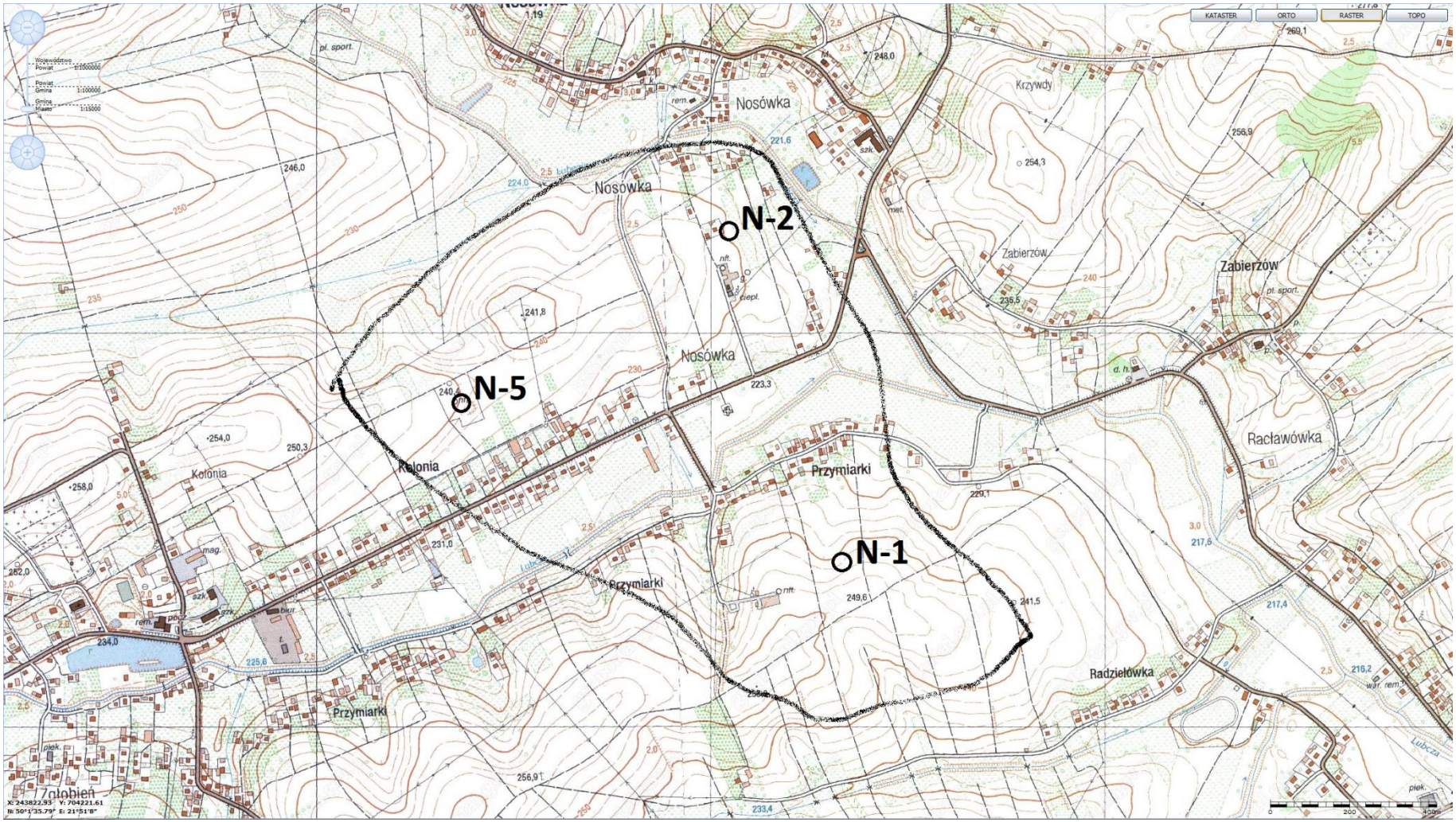
W przypadku struktury Wilków w ramach niniejszego zadania opracowano:

- założenia do projektu wiercenia i wyposażenia otworów do testowego zatłaczania CO2 dla złoża gazu Wilków (AGH we współpracy z PIG-PIB);
- plan monitoringu geochemicznego i biogeochemicznego w rejonie otworów zatłaczających (IGSMiE PAN, założenia odnośnie badanej lokalizacji podane przez PIG-PIB - **Rys. 1**);
- plan monitoringu geofizycznego powierzchniowego metodami niesejsmicznymi (PBG; grawimetria, metody elektromagnetyczne oraz metoda elektrooporowa).

Natomiast dla złoża ropy Nosówka (oraz rejonu GZW: Skoczów-Czechowice) INiG wykonał propozycję programu monitoringu parametrów zbiornikowych i uszczelniających, w tym z wykorzystaniem sejsmiki 4D a IGSMiE PAN plan monitoringu geochemicznego i biogeochemicznego w rejonie otworów zatłaczających, dla którego założenia odnośnie badanej lokalizacji zostały podane przez PIG-PIB (**Rys. 2**).



Rys. 1 Lokalizacja złoża gazu Wilków (+Szlichtyngowa) i otworów zatłaczających na tle szczegolowej mapy topograficznej (**Adam Wójcicki**)



Rys. 2 Lokalizacja złoża ropy Nosówka i otworów zatłaczających na tle szczegółowej mapy topograficznej (**Adam Wójcicki**)

Propozycja programu monitoringu parametrów kolektorów i uszczelnienia na podstawie planowanych prac z zakresu sejsmiki 4D dla obszaru złoża ropy naftowej Nosówka oraz rejonu GZW (INiG)

(Halina Jędrzejowska-Tyczkowska, Irena Irlik)

Przedstawione opracowanie jest kontynuacją wcześniejszego, o analogicznym tytule, przekazanego Zleceniodawcy w grudniu 2009 roku. Wzmiankowana praca [*Halina Jędrzejowska-Tyczkowska, Sejsmika 4D - najefektywniejsze narzędzie monitorowania i weryfikacji w zadaniach sekwestracji CO_2, Prace Naukowe Nr 166*] obejmowała szczegółowy opis metod monitorowania m.in. różnego rodzaju składowisk CO_2 wraz z projektem monitorowania obiektu w rejonie Elektrowni Bełchatów (Struktura Budziszewice – Zaosie).

Aktualnie przekazywane opracowanie, omawia możliwości prowadzenia monitoringu dla dwóch obiektów.

1. obiektu Cieszyn – Skoczów – Czechowice w rejonie GZW (**Fig. 1.1.18_154**), oraz

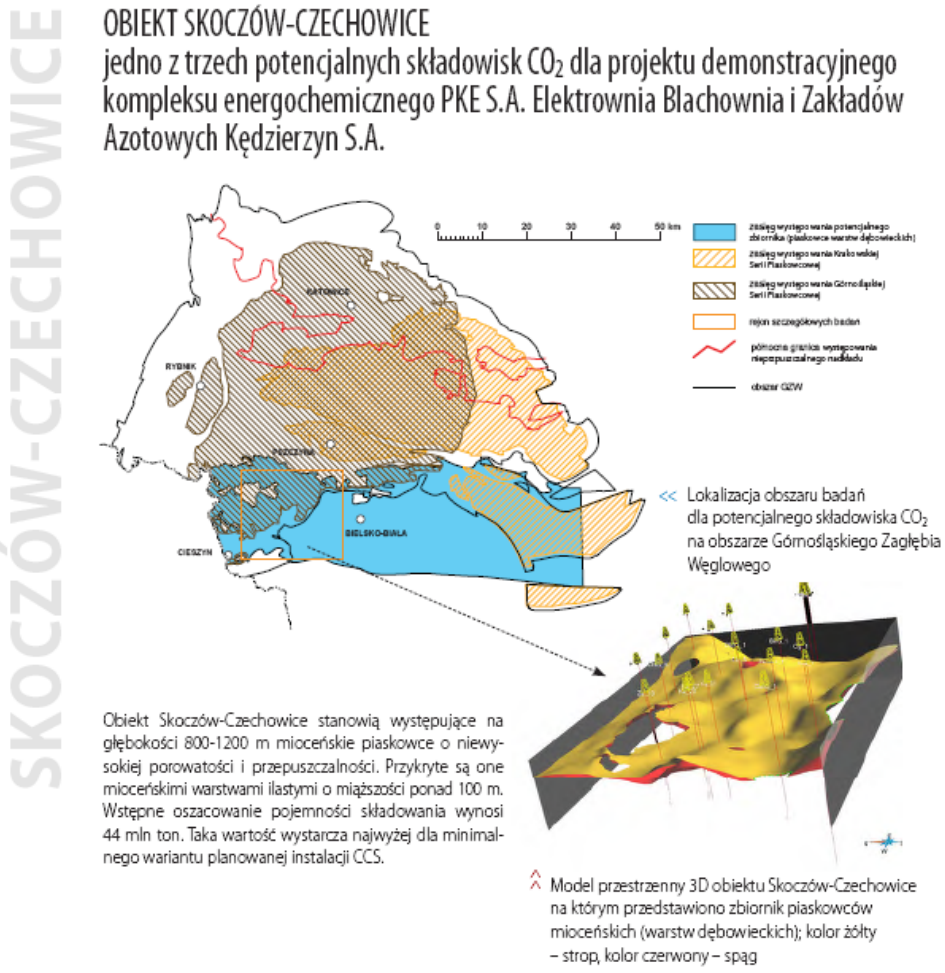


Fig. 1.1.18_154 Obiekt Skoczów-Czechowice (http://skladowanie.pgi.gov.pl)

2. Obszaru złoża ropy naftowej Nosówka (K. Sowiżdżał i inni, 2010) – (**Fig. 1.1.18_155**).

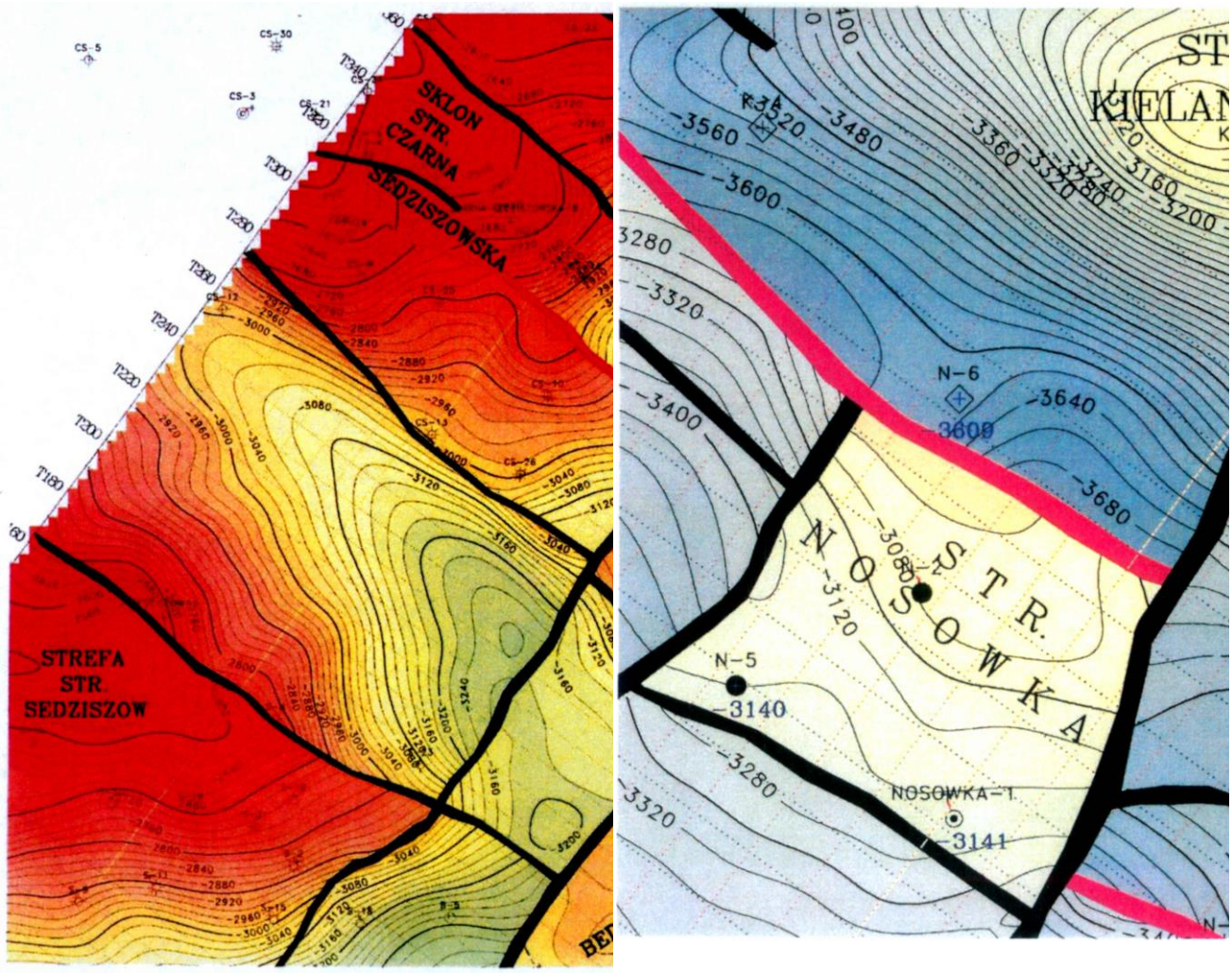


Fig. 1.1.18_155 Mapa strukturalna granicy sejsmicznej C1wstr (fragment SW) (wg Dokumentacja sejsmiczna, Temat Sędziszów – Będziemyśl 3D, 1995)

Mapa strukturalna granicy sejsmicznej C1wstr (fragment NE)

Ważniejsze wyniki modelowań, pośrednie i końcowe, dla obydwu obszarów przedstawiono odpowiednio za autorami (Jarosław Chećko i zespół oraz Krzysztof Sowiżdżał i zespół) – **Figury 1.1.18_154** i **1.1.18_155**.

Należy podkreślić, co będzie miało konsekwencje w projekcie monitoringu, że autorzy w obydwu przypadkach dość nisko oceniają jakość danych wejściowych, przede wszystkim sejsmicznych, ale również i danych geofizyki otworowej. Modele swoje nazywają „trendowymi". Oznacza to, że aby chociaż próbnie zatłaczać CO_2 do jednego z typowych składowisk, którego budowa geologiczna rozpoznana jest niewystarczająco, jak dla działań o tak wielkim ryzyku jakim jest sekwestracja CO_2, należy powtórzyć badania sejsmiczne chociażby fragmentarycznie, aby zbudować tzw. model bazowy do którego można się odnosić wiarygodnie na poziomie monitoringu.

Uwagi powyższej nie należy rozumieć jako propozycji ponownej oceny szczelności zbiornika jako proponowanego składowiska. W przypadku obiektu Nosówka, zostało ono bowiem zweryfikowane najbardziej wiarygodnie już przez samo istnienie złoża węglowodorów.

W opracowaniu, które przedstawiam, staram się pokazać rolę danych wejściowych w budowaniu geologicznego modelu statycznego, bo ten właśnie stanowi odniesienie w porównywaniu modelu dynamicznego zawierającego efekty procesu zatłaczania CO_2, bez względu na to jakie jest środowisko składowania. Oczywistym jest, że nawet jeżeli model dynamiczny jest poprawny, wyniki monitoringu mogą być nieprawdziwe poprzez błędy modelu statycznego.

Monitorowanie przebiegu składowania CO_2 w zależności od rodzaju składowiska

Dla przypomnienia ewentualnemu użytkownikowi pracy o podstawowych zasadach składowania i monitoringu, przytoczę kilka fragmentów wcześniej wykonanych prac przez Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy (PIG – PIB) oraz Instytut Nafty i Gazu.

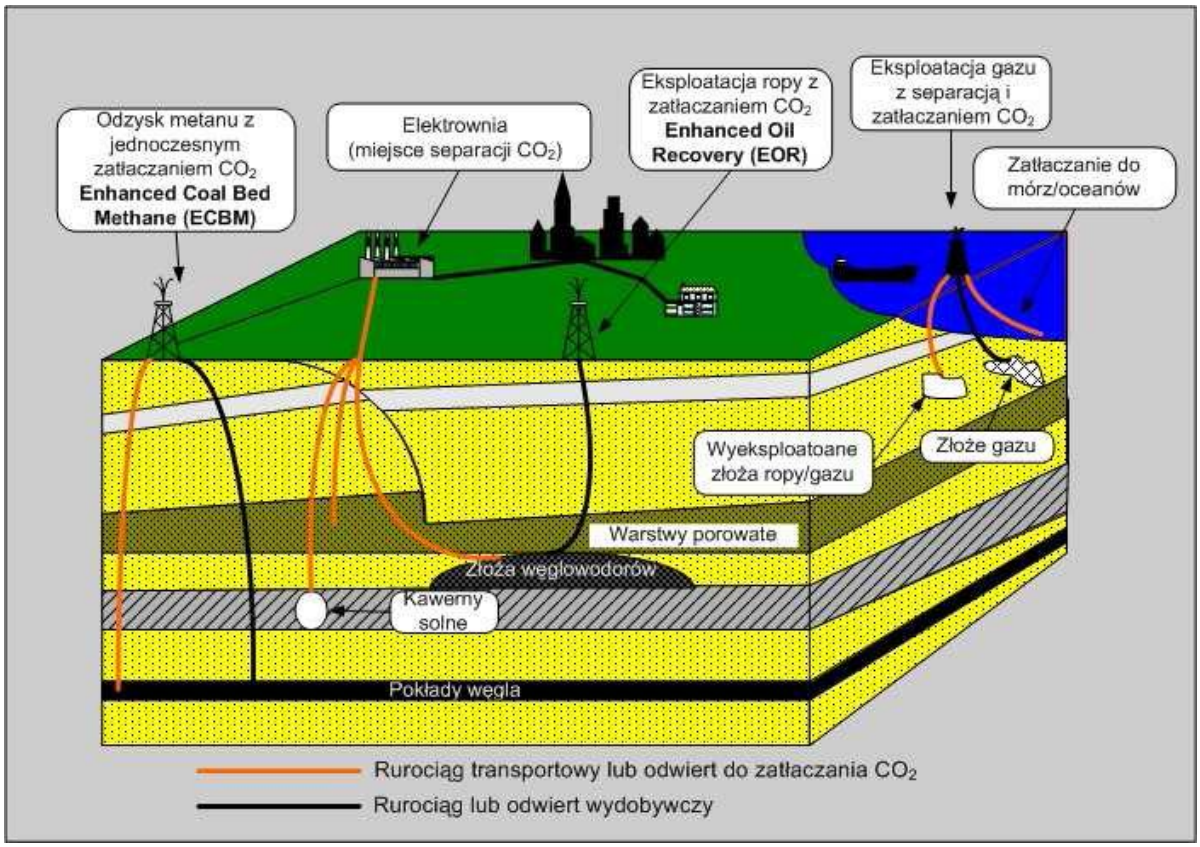


Fig. 1.1.18_156 Sekwestracja geologiczna CO_2 (wg www.rg6.polsl.sekwestr/sekwestr.html)

IDEA GEOLOGICZNEGO SKŁADOWANIA CO_2

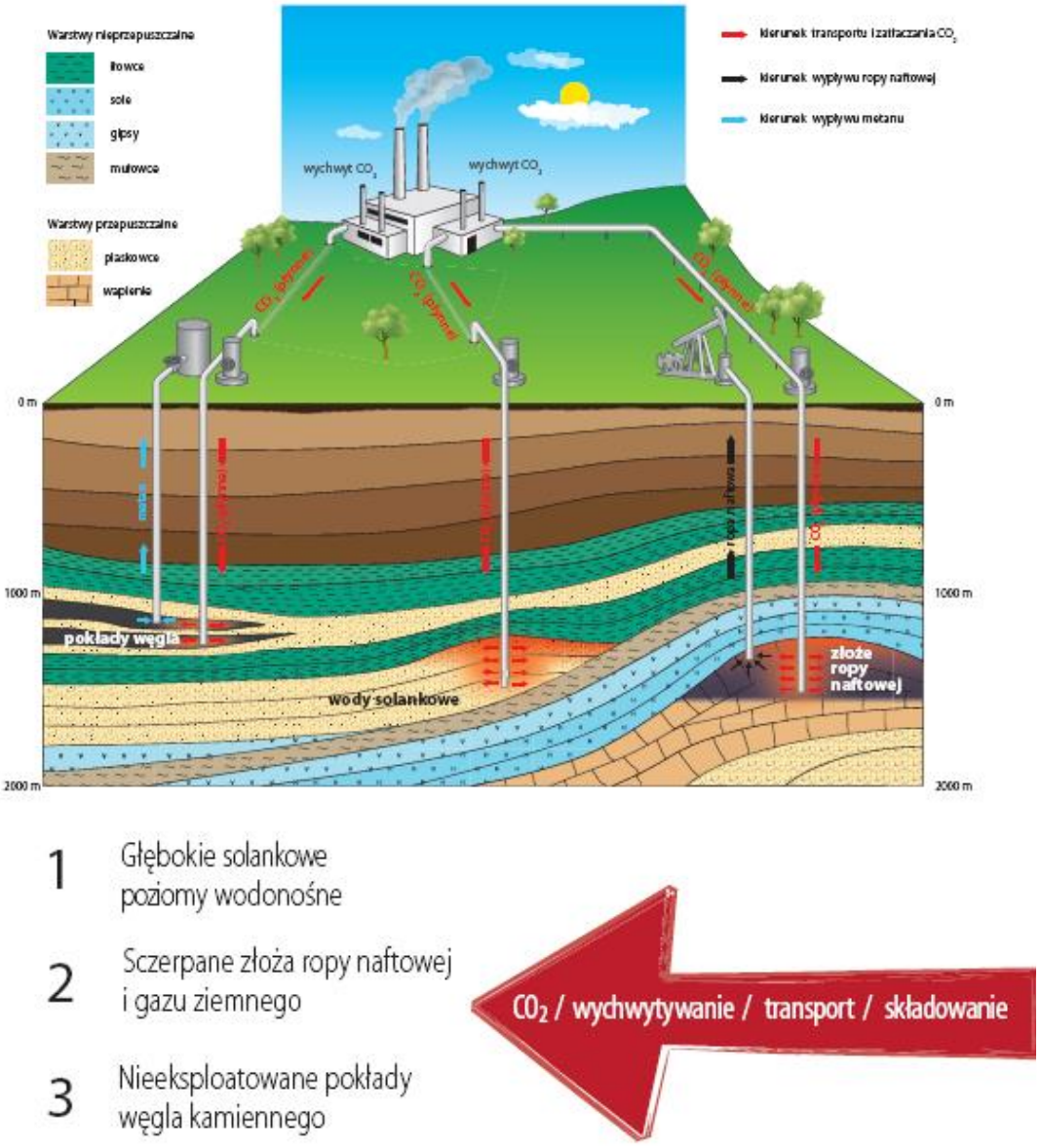


Fig. 1.1.18_157 Idea geologicznego składowania CO_2(wg http://skladowanie.pgi.gov.pl)

BEZPIECZEŃSTWO

BEZPIECZEŃSTWO DLA ŚRODOWISKA NATURALNEGO I CZŁOWIEKA

nieodzowny warunek składowania CO_2 w strukturach geologicznych

! Optymalna struktura geologiczna do składowania CO_2 to naturalna „pułapka" na głębokości 1-2 km, o dużej pojemności, bez połączenia z wodami podziemnymi – pitnymi, przykryta nienaruszonymi warstwami uszczelniającymi o dużej miąższości.

Kryteria bezpiecznego składowania CO_2 w głębokich solankowych poziomach wodonośnych (opracowano w oparciu o najlepsze praktyki z projektów badawczych i komercyjnych CCS, w tym wg. Chadwick i in., 2008)

Kryterium	Wskaźnik pozytywny	Wskaźnik ostrzegawczy	Budziszewice-Zaosie	Skoczów-Czechowice
Całkowita pojemność składowania	>>od potrzeb emitenta	<= od potrzeb emitenta	pozytywna	ostrzegawcza
Głębokość zbiornika	>800-1000 m, <2500 m	<800 m, >2500 m	pozytywna/ graniczna	pozytywna
Miąższość zbiornika	>30-50 m	<20 m	pozytywna	pozytywna
Porowatość zbiornika	>10-20%	<10%	pozytywna	graniczna
Przepuszczalność zbiornika	>100-300 mD	<100 mD	pozytywna	ostrzegawcza
Mineralizacja solanek	>30-100 g/l	<10 g/l	graniczna/ ostrzegawcza	pozytywna
Ciągłość nadkładu uszczelniającego	ciągły, o zbliżonej miąższości	zuskokowany, o zmiennej miąższości	pozytywna	pozytywna
Miąższość nadkładu uszczelniającego	>50-100 m	<20 m	pozytywna	pozytywna
Ciśnienie progowe nadkładu uszczelniającego (od którego może nastąpić wyciek)	znacznie większe od dodatkowego ciśnienia pochodzącego od zatłoczonego CO_2	nie większe od dodatkowego ciśnienia pochodzącego od zatłoczonego CO_2	pozytywne (dla przyjętej ilości CO_2 zatłaczanego w jednym otworze)	pozytywne (dla przyjętej ilości CO_2 zatłaczanego w jednym otworze)
Dostępność danych geofizycznych	wyniki badań sejsmicznych i otworowych, umożliwiające konstrukcję modelu 3D	niedostateczna ilość profili sejsmicznych i/lub otworów uniemożliwiająca konstrukcję modelu 3D	pozytywna	pozytywna/ graniczna

Kryteria bezpiecznego składowania CO_2 – dlaczego są tak ważne?

Głębokość zbiornika	Miąższość, porowatość i przepuszczalność zbiornika	Mineralizacja solanek	Ciągłość, miąższość nadkładu	Dane geofizyczne i otworowe
Odpowiednia głębokość (~1-2 km) zalegania warstw zbiornika pozwala utrzymać zatłoczony CO_2 w fazie wysokogęstościowej, stosunkowo mało ruchliwej (tzw. nadkrytycznej), bez możliwości przemian fazowych	Odpowiednia miąższość (min. 30-50 m), porowatość (min. 10%) i przepuszczalność (min. 100 mD) warstw zbiornika jest istotna dla wydajności i wykonalności procesu zatłaczania	Odpowiednio wysoka mineralizacja solanek (min. 30 g/l) wskazuje na brak połączenia zbiornika z wodami podziemnymi oraz na brak infiltracji wód opadowych	Ciągłość, odpowiednia miąższość (min. 50 m) i ciśnienie graniczne warstw nadkładu uniemożliwiają wyciek do warstw nadległych	Dostarczają niezbędnych informacji do scharakteryzowania struktury geologicznej

Fig. 1.1.18_158 Kryteria bezpiecznego składowania CO_2(wg www.http://skladowanie.pgi.gov.pl)

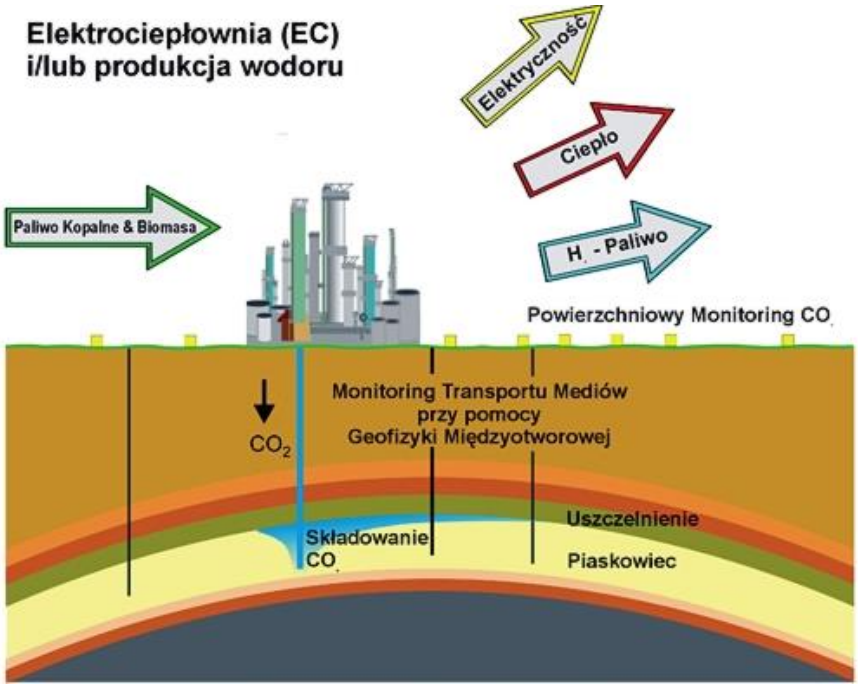


Fig. 1.1.18_159 Schemat instalacji energetycznej o obniżonej emisji CO2 (wg konsorcjum projektu CO2SINK)

Podstawowym zadaniem monitorowania i weryfikacji jest przeciwdziałanie ryzyku ucieczki lub niekontrolowanego wypływu dwutlenku węgla (CO_2) do atmosfery, zbiorników wody pitnej lub do podziemnego obszaru operacyjnego eksploatowanych złóż ropy i gazu. Przystępując do monitorowania należy uprzednio rozpoznać zjawiska, które towarzyszą wychwytowi i zatrzymywaniu dwutlenku węgla w ośrodku geologicznym. Zasadniczo, zatrzymywanie CO_2 w ośrodku (trapping mechanizm) ma źródło w dwóch kategoriach zjawisk – fizycznych i chemicznych.

Te pierwsze, polegają na przechwyceniu CO2 w postaci gazu, płynu lub w stanie superkrytycznym w określonej objętości ośrodka geologicznego, bądź to na zasadzie hydrodynamicznej, bądź też przez sieć kawern.

Te drugie, mechanizmy chemiczne powodują zatrzymanie CO_2 w ośrodku, jako rezultat różnorodnych procesów chemicznych które zachodzą pomiędzy skałami i płynami w geosferze.

Największy potencjał wykonawczy tkwi w monitorowaniu sejsmicznym; również i ze względu na to, iż stosowany jest z powodzeniem przez przemysł naftowy w zadaniach EOR (Enhanced Oil Recovery) zwiększenia wydobycia poprzez zastosowanie metod wtórnych. Adaptacja do monitorowania CO2 nie wymaga zasadniczych zmian ani w akwizycji, ani w przetwarzaniu i interpretacji [Dasgupta S.N., 2006].

Monitorowanie składowisk CO2, jego migracji oraz interakcji w system gaz-ciecz-skała wymaga modelowania i pomiarów o różnej skali (**Fig. 1.1.18_160 i Fig. 1.1.18_161**) – laboratoryjnych w otworze oraz powierzchniowych, i przede wszystkim, wykonywanych zgodnie z dynamiką procesów zachodzących w złożu lub w składowisku.

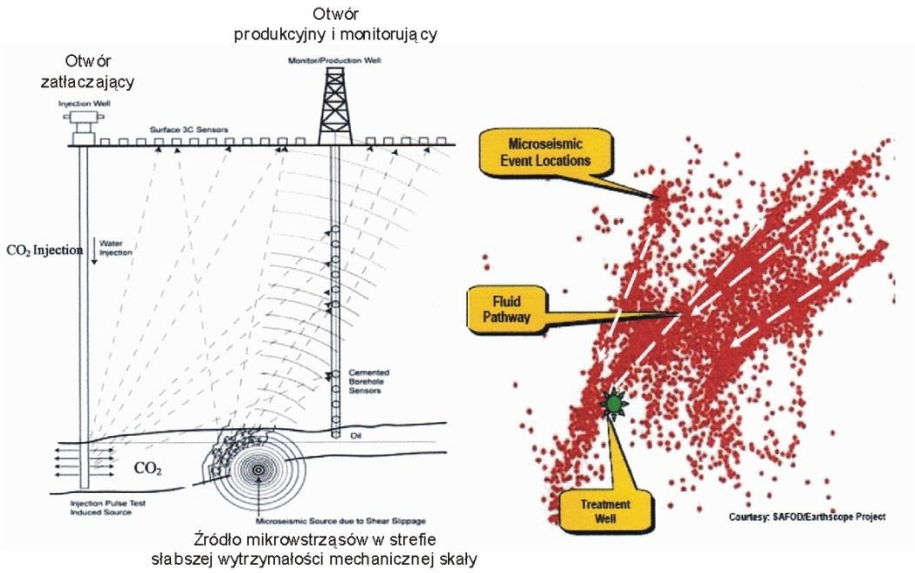


Fig. 1.1.18_160 Ciągłe monitorowanie procesu zatłaczania CO_2. CO_2 zatłaczany do przestrzeni porowej złoża zakłóca istniejące in-situ naprężenia, co z kolei powoduje poprzeczne ześlizgnięcia, szczególnie w strefach słabszej wytrzymałości mechanicznej skały. Przesuwanie generuje chwilowe podziemne mikrowstrząsy. Zlokalizowane w otworach oraz na powierzchni czujniki wysokiej czułości rejestrują drgania, które w procesie interpretacji umożliwiają lokalizację ich źródła (wg Dasgupta S.N., 2006)

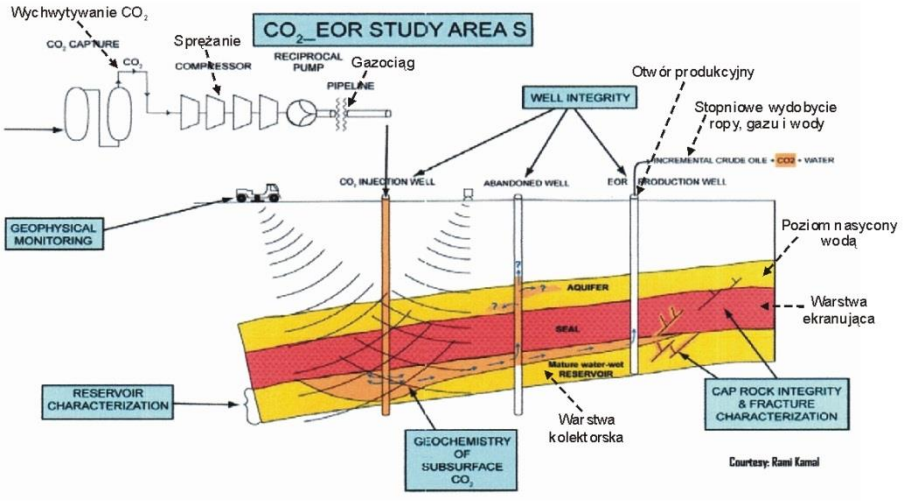


Fig. 1.1.18_161 Łączne i równoległe wykonanie operacji sekwestracji CO_2 oraz EOR. Sprężony dwutlenek węgla jest zatłaczany do złoża. CO_2 redukuje lepkość ropy i zwiększa mobilność przepływu do otworu produkcyjnego. Większość CO_2 zastępuje miejsce wydobytej ropy. Powierzchniowe pomiary sejsmiki 3D pozwalają scharakteryzować ośrodek oraz ocenić przedziały bezpiecznego magazynowania oraz miejsce ewentualnych wycieków (wg Dasgupta S.N., 2006)

Opracowanie projektu monitorowania sejsmicznego można rozpocząć w chwili uzyskania następujących danych:

- sekcje sejsmiczne (2D lub lepiej 3D) zarejestrowane z przeznaczeniem celu jakim jest sekwestracja w konkretnych warunkach geologicznych;

- wyniki przetwarzania tych danych z uwzględnieniem standardów wysokiej rozdzielczości;

- przestrzenny model prędkości dla obszaru objętego monitorowaniem w domenie czasu i głębokości;

- przestrzenny model geologiczny (strukturalny i litofacjalną) dla obszaru objętego monitorowaniem;

- krzywe profilowania akustycznego oraz gęstościowego wykonane sondami o powtarzalnej kalibracji;

- wyniki badań laboratoryjnych na próbach skalnych, a przede wszystkim: porowatość, przepuszczalność, nasycenie, ciśnienie, gęstość, prędkość propagacji fal P i S.

Jak wynika z powyższych uwag, są to spostrzeżenia nieco różne, zdecydowanie mniej optymistyczne od tych, które zamieszczono w rozdziale „Modelowanie dynamiczne, analizy ryzyka i program monitoringu – podsumowanie" (raport „Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO_2 wraz z programem ich monitorowania").

Charakterystyka rejonów badań

Złoże ropy naftowej Nosówka położone jest w brzeżnej strefie Karpat fliszowych, w południowo - zachodniej części tzw. zatoki rzeszowskiej, określonej lokalizacją miejscowości Zgłobień, Nosówka, Kielanówka, Racławka na obszarze gminy Boguchwała w województwie podkarpackim. Akumulacja ropy naftowej związana jest skałami węglanowymi, reprezentowanymi przez wapienie i wapienie dolomityczne wizenu (karbon dolny).

Utwory karbonu dolnego występujące w rejonie Nosówki i obszarach sąsiednich charakteryzują się trójczłonowym podziałem. Najstarszą część (turnej) buduje kompleks węglanowo - klastyczny "A", środkową - kompleks węglanowy "B" (wizen), najmłodszą -kompleks terygeniczny "C " (kulm).

Złoże Nosówka ma charakter warstwowo - masywowy. Od stropu uszczelnione jest ilasto-łupkowymi osadami badenu dolnego, a od spągu zasięg jego wyznacza morfologia podścielających go ilastych utworów ordowiku.

Budowa modelu statycznego dla obiektu Nosówka na podstawie danych sejsmicznych przedstawiona została przez K. Sowiżdżała i zespół, w czerwcu 2010 (zad. **1.1.15** „Opracowanie szczegółowych statycznych modeli ośrodka geologicznego składowisk"). Można mieć pewne zastrzeżenia odnośnie podkreślenia słowa „szczegółowy", jakkolwiek Autorzy wykorzystali dane sejsmiki 3D z obszaru „Sędziszów – Będziemyśl 3D", pozyskane w roku 1995 i reprocessowane w latach 2005 – 2007, już przy zastosowaniu nowszych programów interpretacji.

Najistotniejsze wyniki dla modelu statycznego przywołam za Autorami wyżej wymienionego raportu.

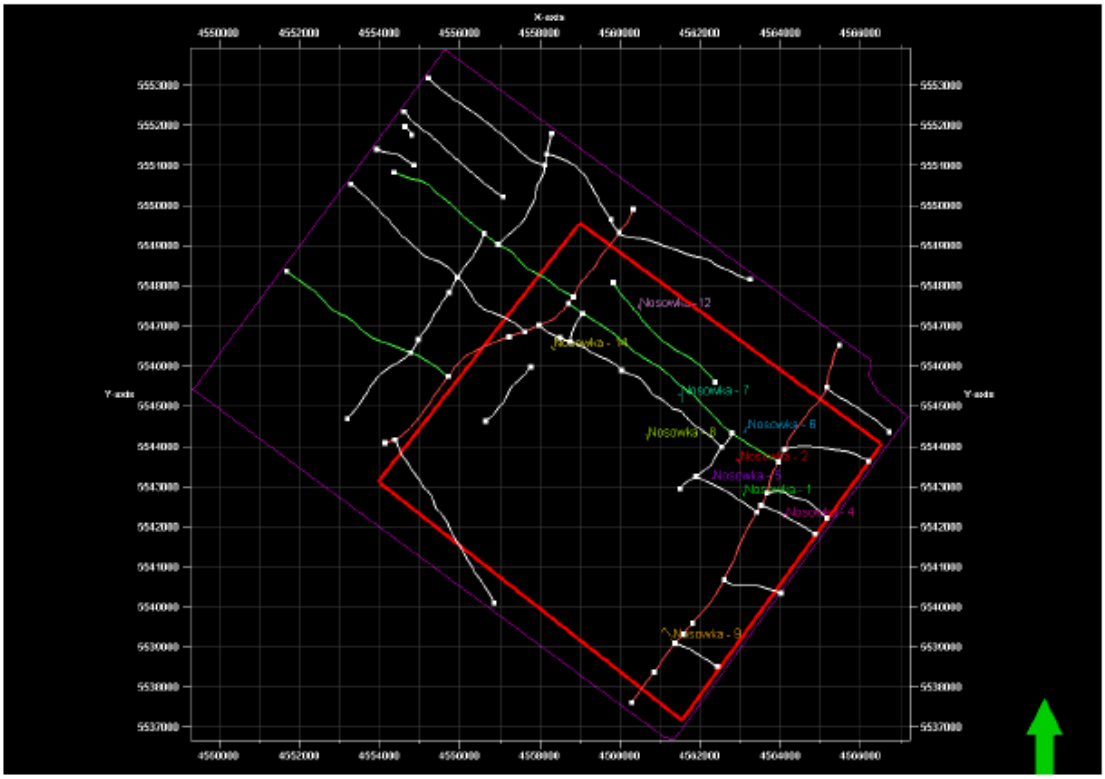


Fig. 1.1.18_162 Zasięg modelu na tle powierzchni zdjęcia sejsmicznego Sędziszów-Będziemyśl 3D

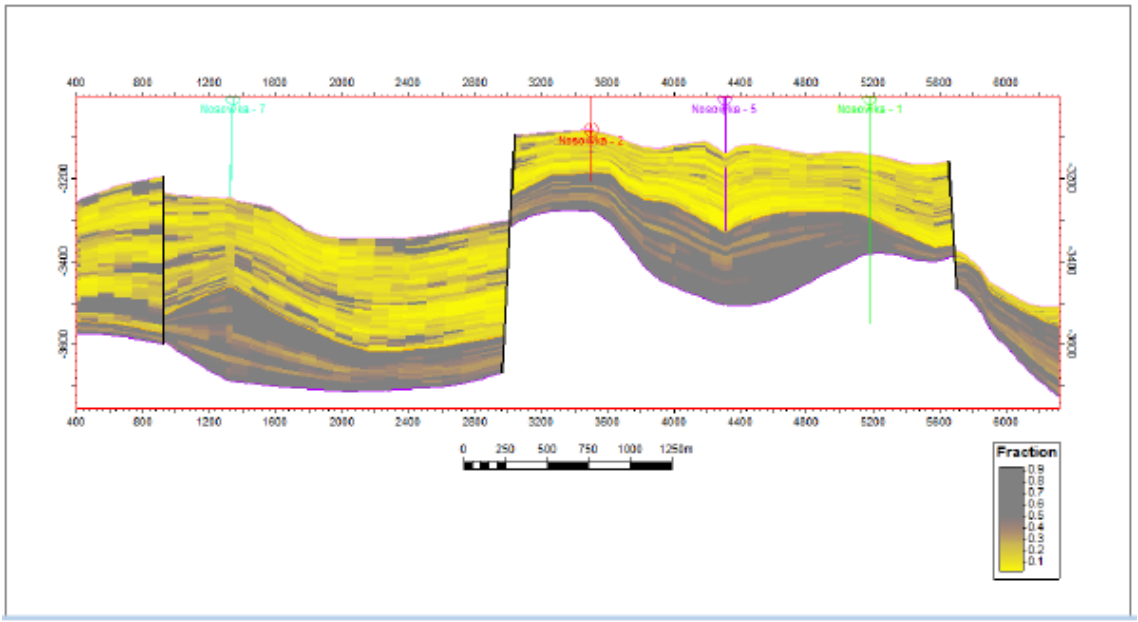


Fig. 1.1.18_163 Przekrój przez model zailenia – pojedyncza realizacja – przewyższenie x 2.5 (karbon dolny i ordowik)

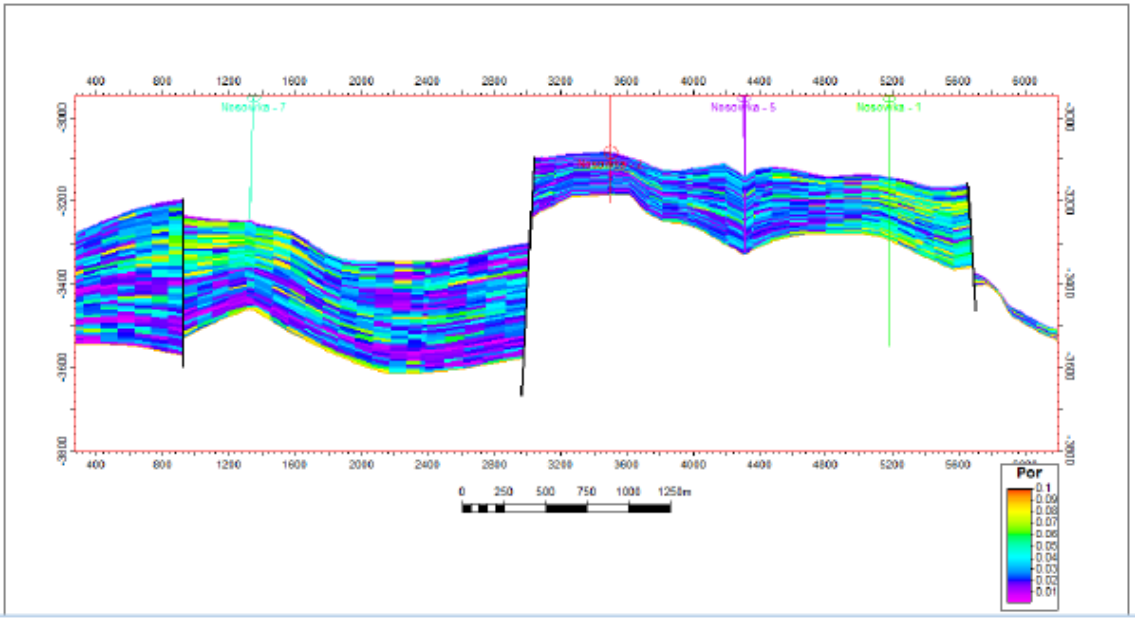


Fig. 1.1.18_164 Przekrój przez model porowatości przebiegający przez osie otworów N-7, N-2, N-5 i N-1 (przewyższenie x 2.5)

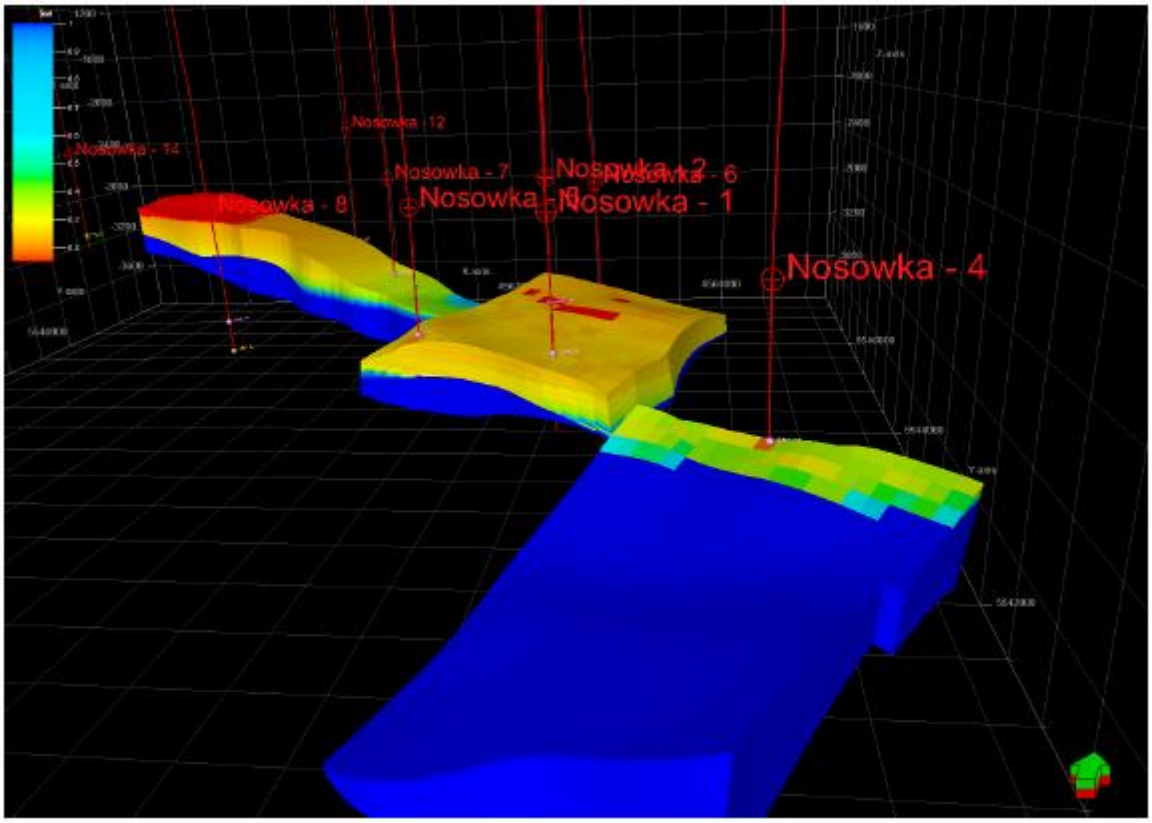


Fig. 1.1.18_165 Wizualizacja rozkładu nasycenia wodą złożową segmentów modelu o potwierdzonej obecności węglowodorów

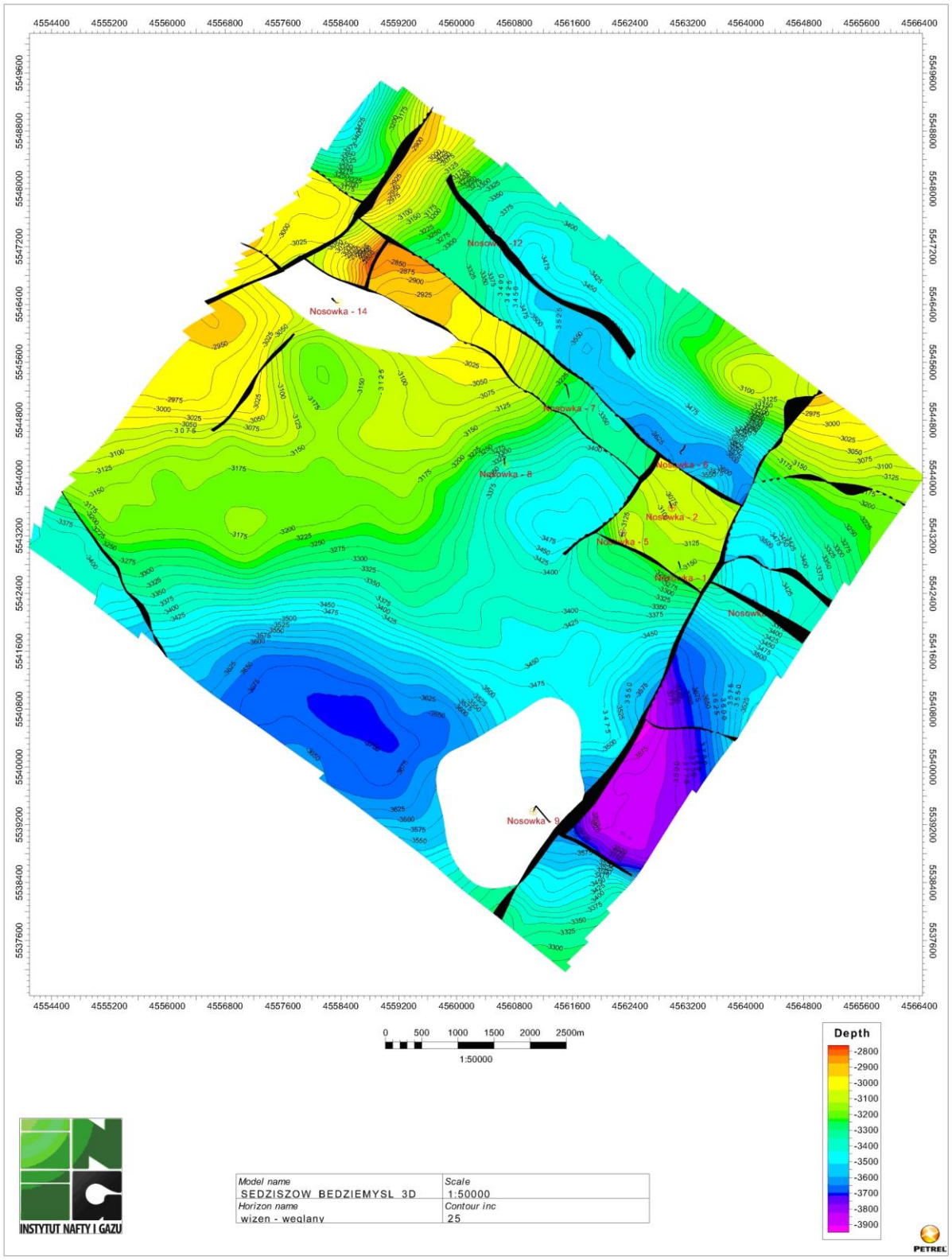


Fig. 1.1.18_166 Mapa strukturalna stropu utworów węglanowych wizenu

Dość podobną sekwencję działania przedstawił zespół autorski J. Chećko, J. Jureczka i inni. (w: Wójcicki & Jureczka (red.), 2010), dla obiektu Cieszyn – Skoczów – Czechowice. Ważniejsze wyniki przytoczono poniżej.

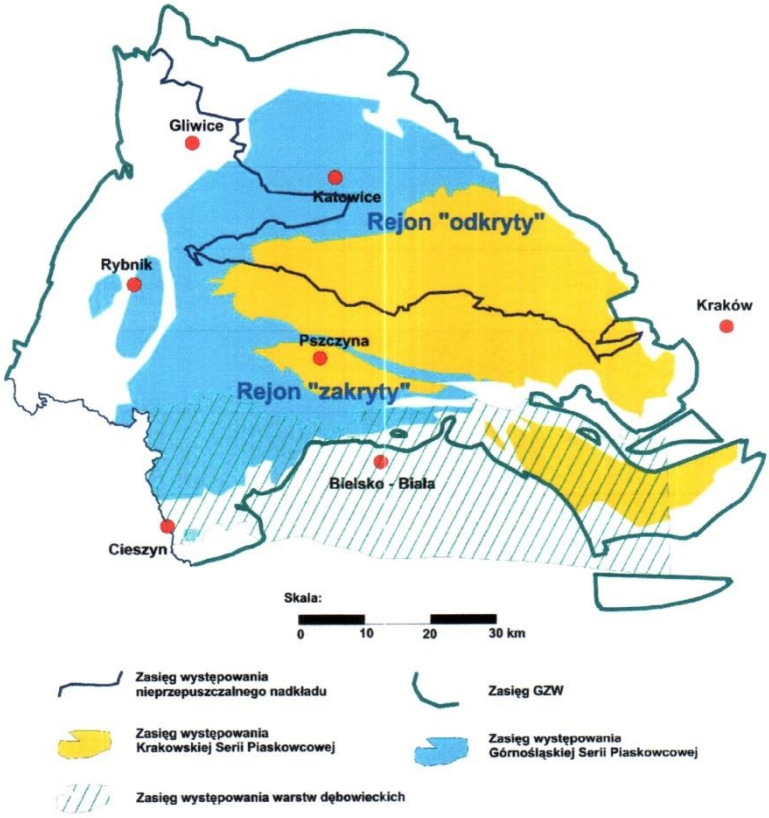


Fig. 1.1.18_167 Szkic występowania serii piaskowcowych karbonu z zasięgiem nieprzepuszczalnych utworów miocenu (wg Bromek i in., 2009 ze zmianami, geologia wg Jureczka i in. 2005)

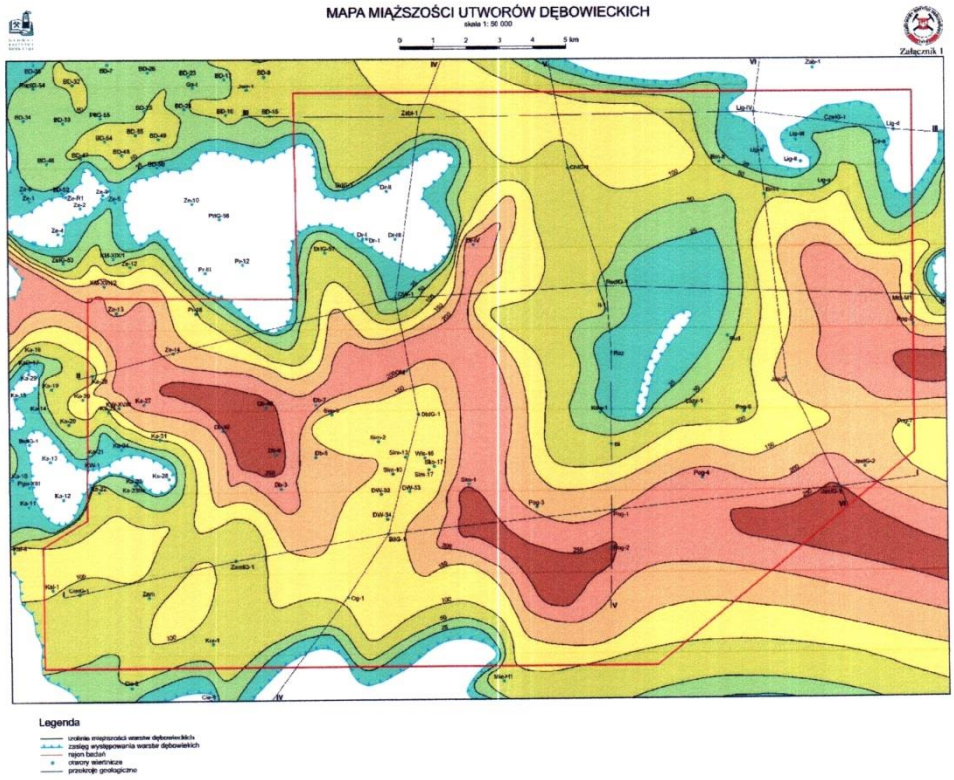


Fig. 1.1.18_168 Miąższość warstw dębowieckich Rejonu Cieszyn-Skoczów-Czechowice

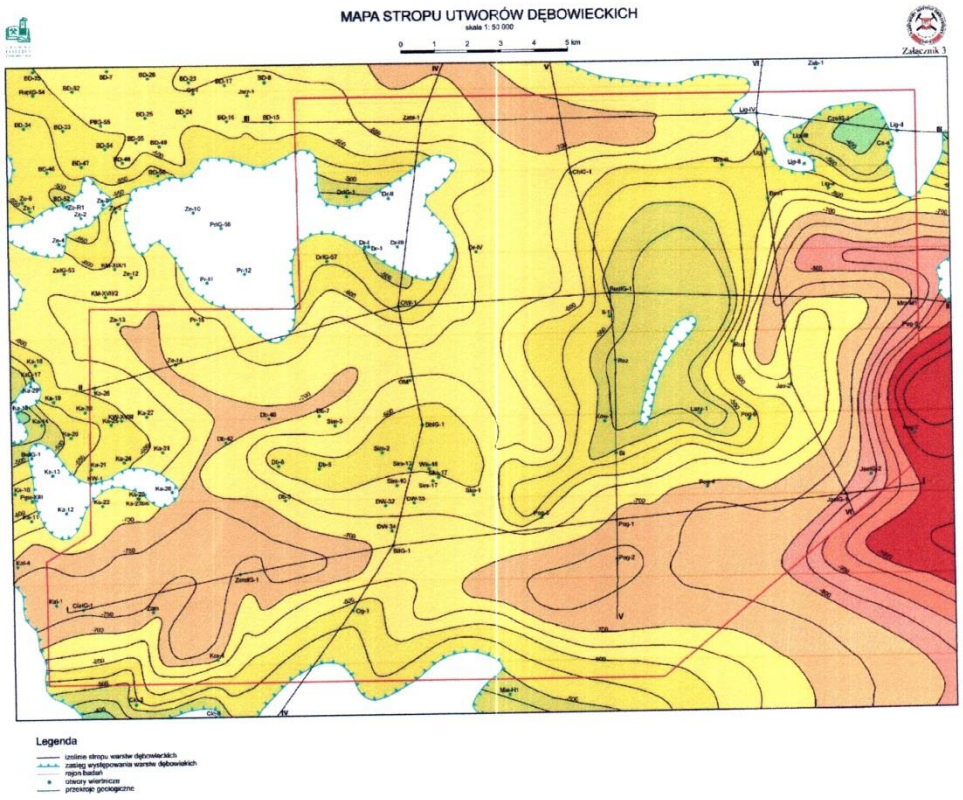


Fig. 1.1.18_169 Głębokość zalegania stropu warstw dębowieckich rejonu Cieszyn-Skoczów-Czechowice

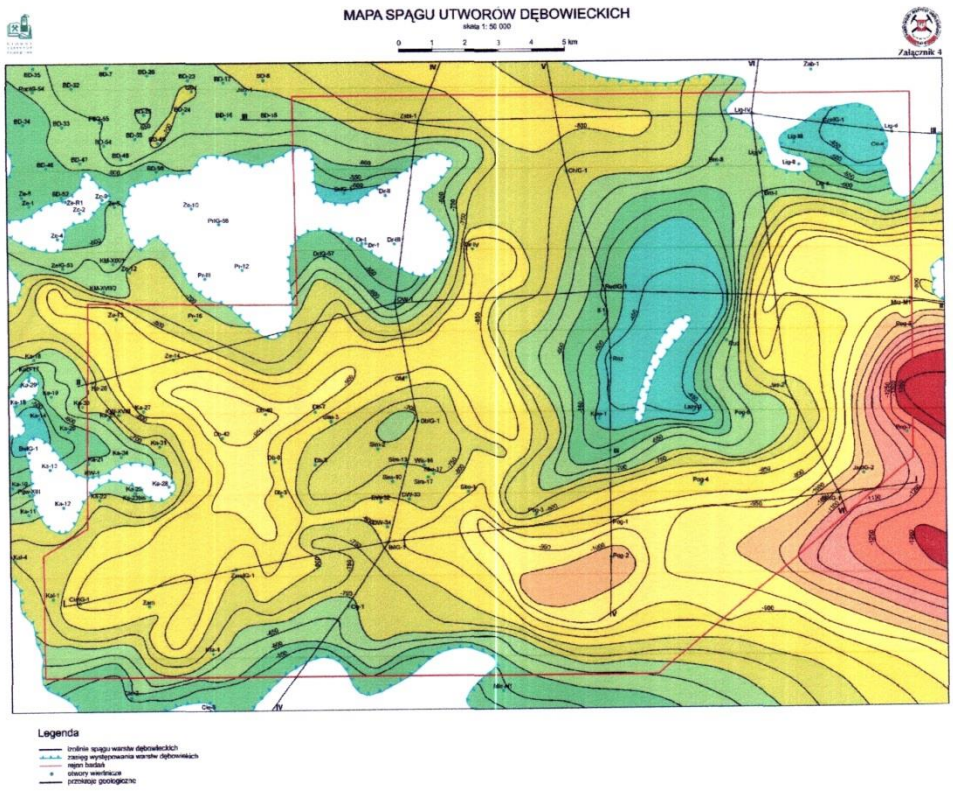


Fig. 1.1.18_170 Głębokość zalegania spągu warstw dębowieckich rejonu Cieszyn-Skoczów-Czechowice

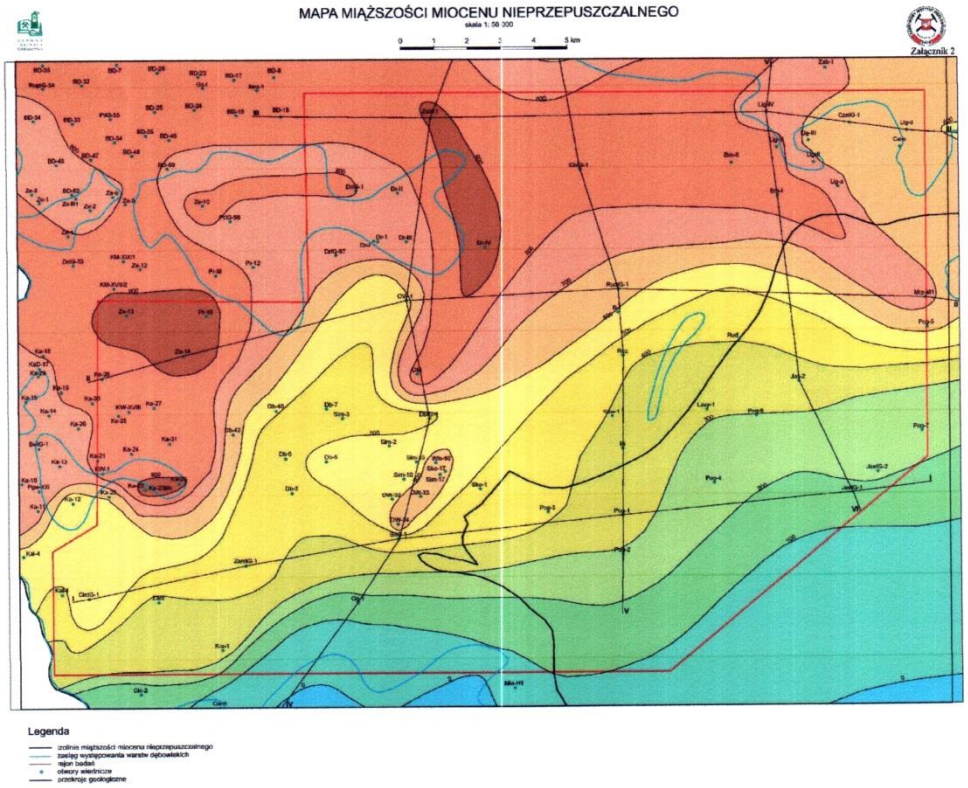


Fig. 1.1.18_171 Miąższość miocenu nieprzepuszczalnego dla rejonu Cieszyn-Skoczów-Czechowice

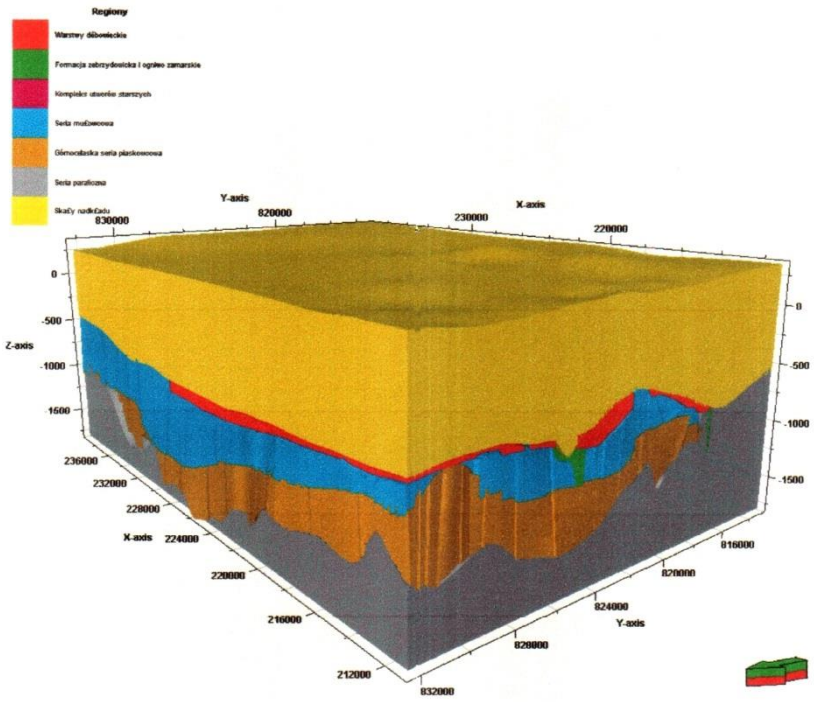


Fig. 1.1.18_172 Model kompleksu warstw dębowieckich wraz ze skałami podścielającymi oraz skałami nadkładu

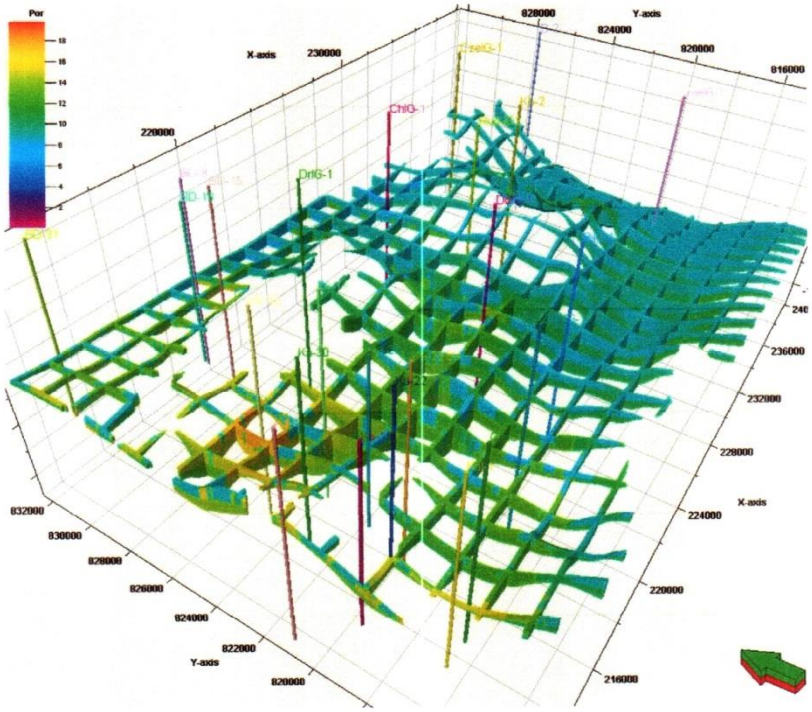


Fig. 1.1.18_173 Model porowatości efektywnej utworów warstw dębowieckich (diagram płotowy)

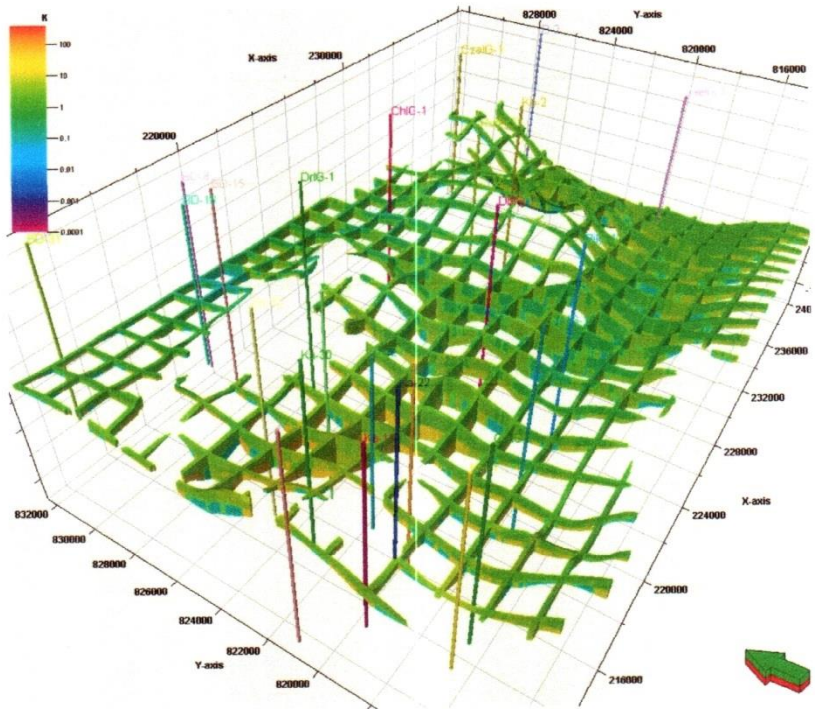


Fig. 1.1.18_174 Model przepuszczalności utworów warstw dębowieckich (diagram płotowy)

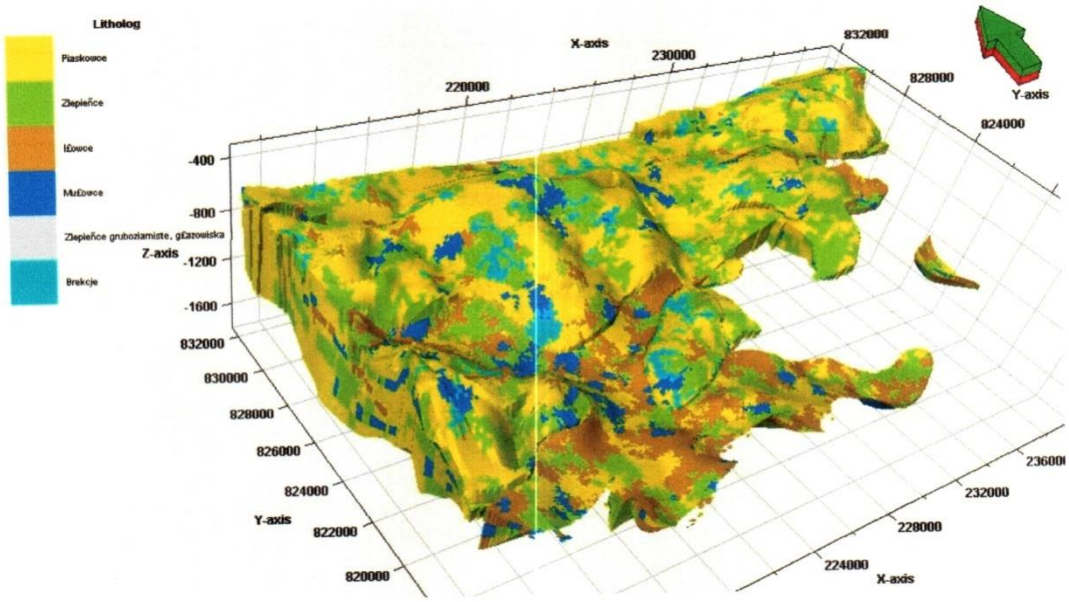


Fig. 1.1.18_175 Przestrzenny model litologiczny utworów podłoża warstw dębowieckich

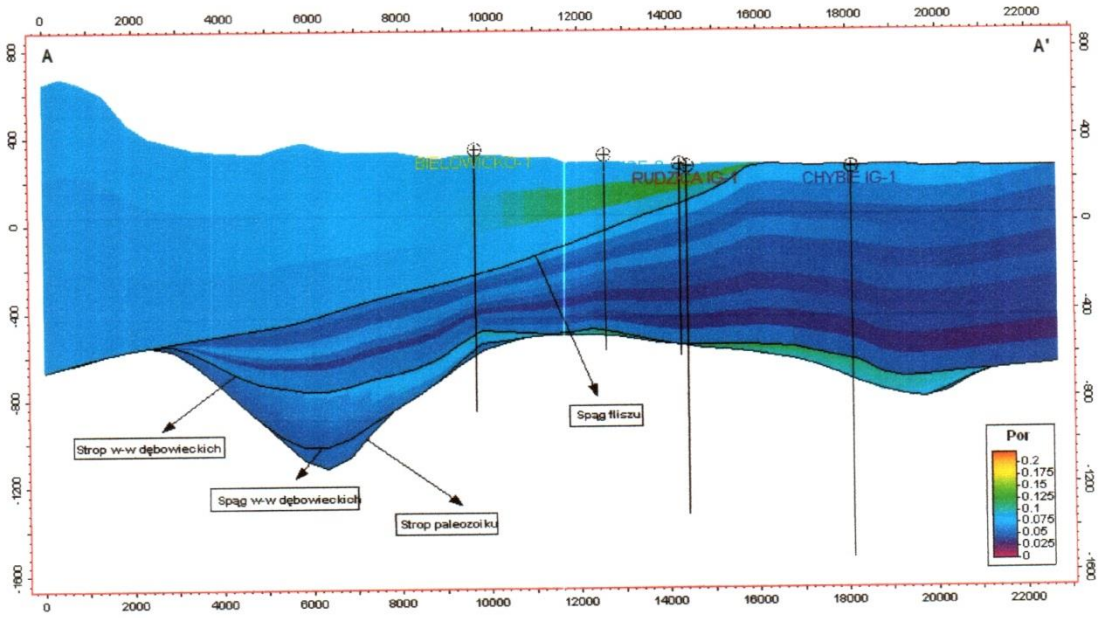


Fig. 1.1.18_176 Przekrój A-A’ dla parametru porowatości

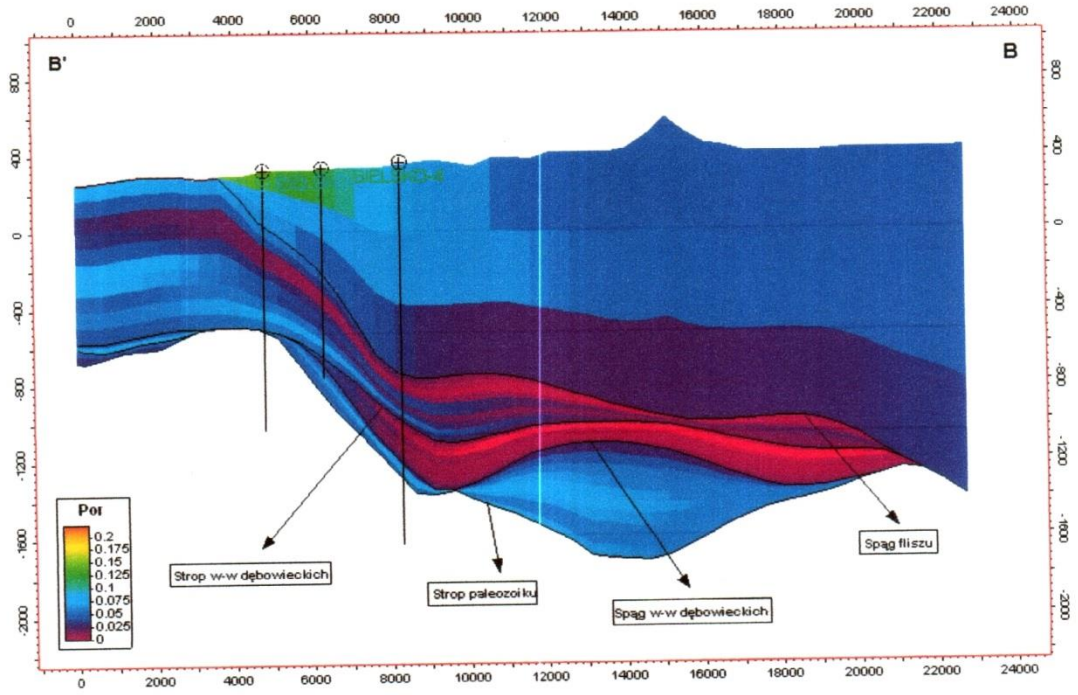


Fig. 1.1.18_177 Przekrój B’-B dla parametru porowatości

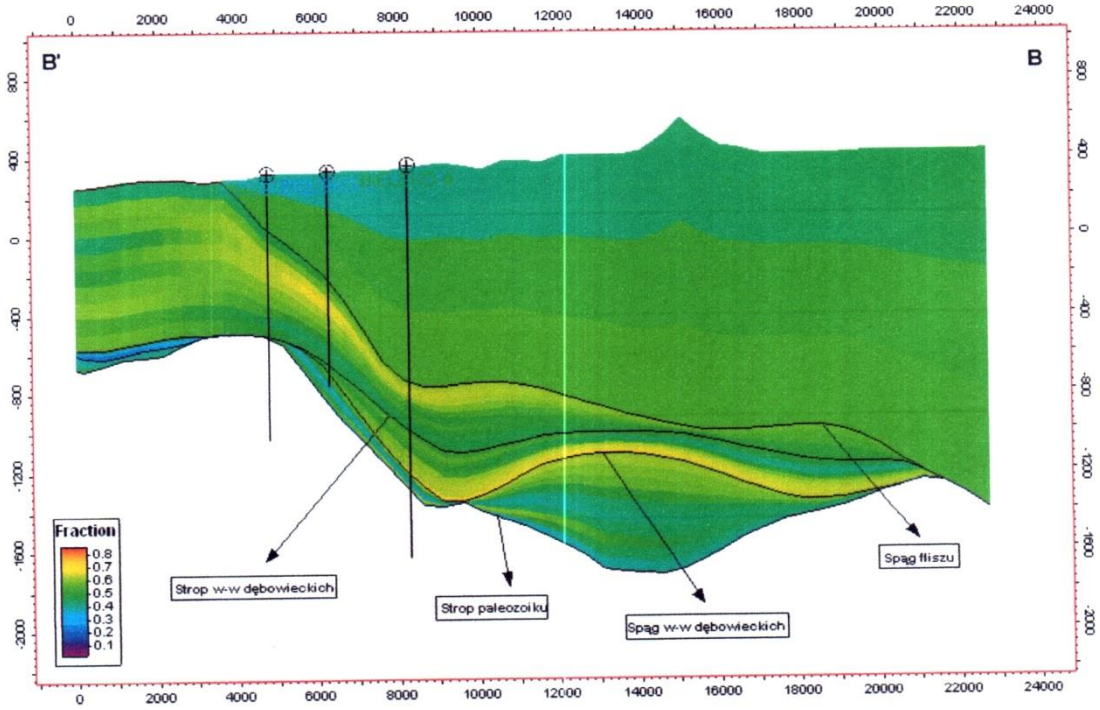


Fig. 1.1.18_178 Przekrój B'-B dla parametru zailenia

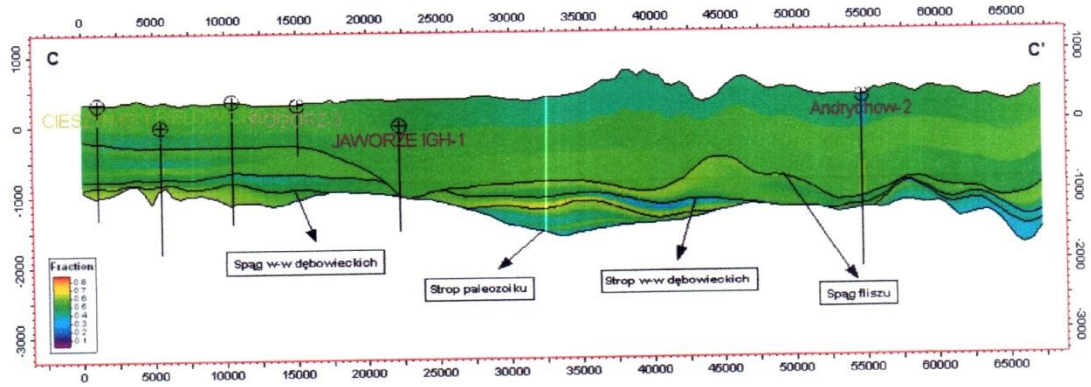


Fig. 1.1.18_179 Przekrój C-C' dla parametru zailenia

Autorzy interpretacji danych otworowych (zadanie **1.1.15**; Czopek B. i in.; w: Wójcicki & Jureczka (red.), 2010) piszą: „… trudności interpretacyjne sprawiły, iż opracowany model w zachodniej części obszaru badań ma wybitnie trendowy charakter". Stąd więc określone wnioski na temat monitoringu.

Ocena dostępnych materiałów geologicznych i geofizycznych

Biorąc pod uwagę jakość dostępnych materiałów geofizycznych, a szczególnie sejsmicznych, próbę przygotowania projektu monitoringu podjęto wyłącznie dla obiektu Nosówka. Do szczegółowych analiz wybrano 4 profile sejsmiczne, krzyżujące się w bezpośredniej bliskości otworów Nosówka 7 (IL 413, XL 294) oraz Nosówka 2 (IL 495, XL 278).

Sytuację tych profili oraz pola falowe przedstawiono na **Fig. 1.1.18_180** – **1.1.18_185** oraz **1.1.18_186** i **1.1.18_187**. Integracja danych otworowych i sejsmicznych (pomimo bardzo złej jakości tych ostatnich w strefie obiektu Nosówka) pozwala na zlokalizowanie sejsmiczno – czasowe horyzontu węglanowego karbonu na czasie ~2050 ms, co odpowiada głębokości ~3500 m (poziom odniesienia + 170 m npm wysokość odwiertu 248,0 m), **Fig.1.1.18_188**.

Warto zwrócić uwagę jak bardzo zróżnicowana jest jakość danych sejsmicznych zarejestrowanych identyczną metodyką akwizycji w obrębie tego samego projektu.
Przykładem niech będą dwa pojedyncze rekordy polowe (2000 i 10172). Na tym pierwszym można zauważyć horyzont na czasie ok. 2050 (prawdopodobnie węglany karbonu), na tym drugim na większych czasach widzimy praktycznie układ chaotyczny (**Fig.1.1.18_189** i **1.1.18_190**).

Analogicznie na sekcjach sumowanych na tym samym poziomie przetwarzania (migracja STOLTA) w części SW projektu (**Fig. 1.1.18_191**) widzimy wyraźny horyzont karboński, podczas gdy poruszając się w kierunku NE (obszar złoża Nosówka, **Fig. 1.1.18_192**) śledzenie horyzontu nie jest możliwe. Na **Fig. 1.1.18_193** przedstawiono wynik interpretacji zaawansowanej wykonanej w Geofizyce Kraków po ponownym processingu danych (2005 – 2007).

Jak widać z powyższego, jakość danych istotnie uległa zmianie, co może silnie rzutować na szczegółowość modelu geologicznego.
Na figurach od **1.1.18_194** do **1.1.18_201** zaprezentowano niektóre wybrane wyniki interpretacji danych sejsmicznych z rejonu Sędziszów – Będziemyśl 3D (2007) o znacznie podwyższonym standardzie. Są to kolejno:

- mapa wyznaczona na podstawie atrybutu amplitudowego
- przekrój impedancji akustycznych (**Fig.1.1.18_194**)
- przekrój parametru AVO (**Fig.1.1.18_195**)
- przekrój i porównanie atrybutu AVO i współczynnika Poissona (**Fig.1.1.18_196**)
- mapa impedancji akustycznej (fragment, **Fig.1.1.18_197**)
- przekrój sejsmiczny, dla atrybutu czas fazy (**Fig.1.1.18_198**),
- porównanie atrybutów (**Fig.1.1.18_199**)
- przekrój L 480 – faza (**Fig.1.1.18_200**)
- przekrój L 480 – impedancja (**Fig.1.1.18_201**).

Analizując kolejne obrazy zauważamy, że granica C_1 jest interpretowana raczej intuicyjnie niż w oparciu o fakty, co potwierdza „trendowość" modelu. Nawet tzw. dane otworowe nazwane są przez autorów interpretacji z Geofizyki Kraków jako „czas interwałowo syntetyczny" i gęstość syntetyczna.

Dla wykazania możliwości zwiększenia rozdzielczości danych sejsmicznych, a więc zbliżenia modelu do modelu szczegółowego na **Fig.1.1.18_202** do **Fig.1.1.18_214** pokazano wyniki takiej właśnie sekwencji.

Szczególnie sekcja impedancji akustycznej, która najczęściej decyduje o rozkładzie prędkości akustycznych (**Fig.1.1.18_212** i **1.1.18_214**) pozwala definiować znacznie dokładniej charakterystyczne fakty geologiczne (np. podwójna ujemna faza w utworach węglanowych na czasie 2050 ms, co odpowiada głębokości 3599 metrów i stwierdzonym tu podczas perforacji śladom ropy – **Fig.1.1.18_188**).

Nie będę powtarzać uwag o wadze rozdzielczości, szczególnie przy analizie porowatości i nasyceń jak też rodzaju płynów nasycających. Tu szczególną rolę odgrywa sejsmika wielokomponentowa i możliwość pozyskania informacji o prędkości fal poprzecznych.

Pomimo że aktualnie sejsmika aplikuje szereg operacji zwiększających rozdzielczość, jednak w procedurze monitorowania ważny jest element powtarzalności również i przede wszystkim w zakresie schematu akwizycji.

Podsumowując: nawet jeżeli na etapie processingu uzyskamy sekcję bazową dostatecznie rozdzielczą, pamiętać musimy o różnym statusie danych do porównania.

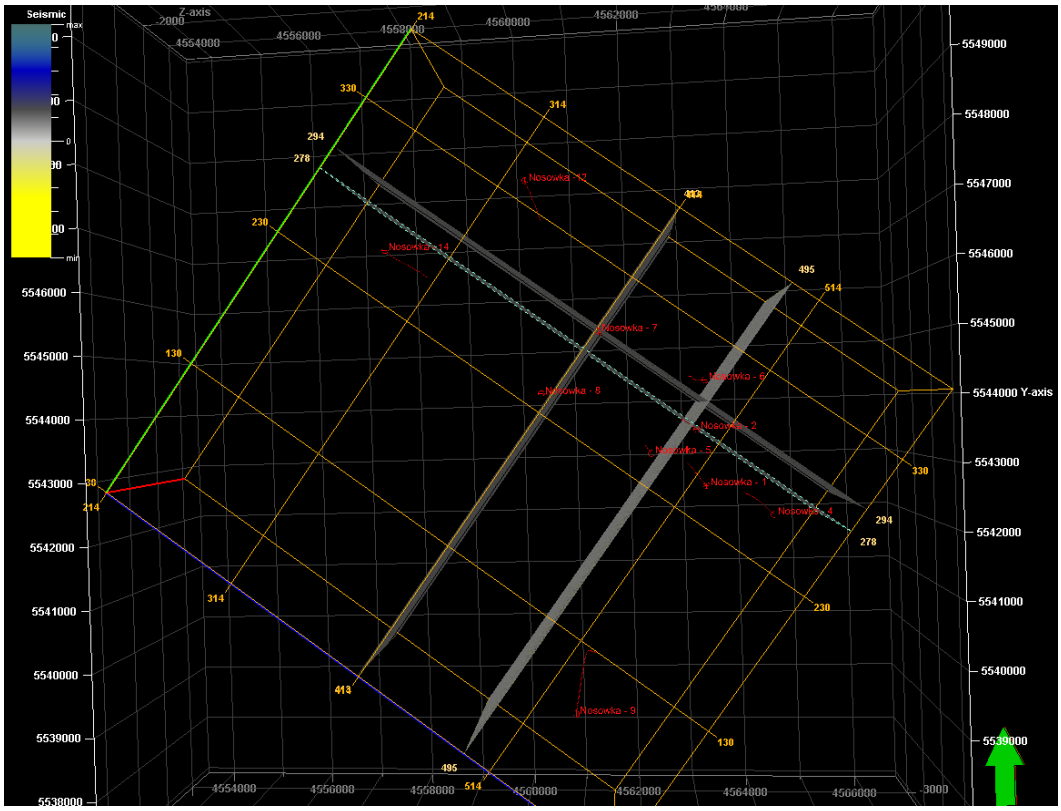


Fig. 1.1.18_180 Przebieg profili IL413, IL495, XL294, XL278 (kostka ograniczona obszarowo w stosunku do powierzchni zdjęcia Sędziszów-Będziemyśl 3D)

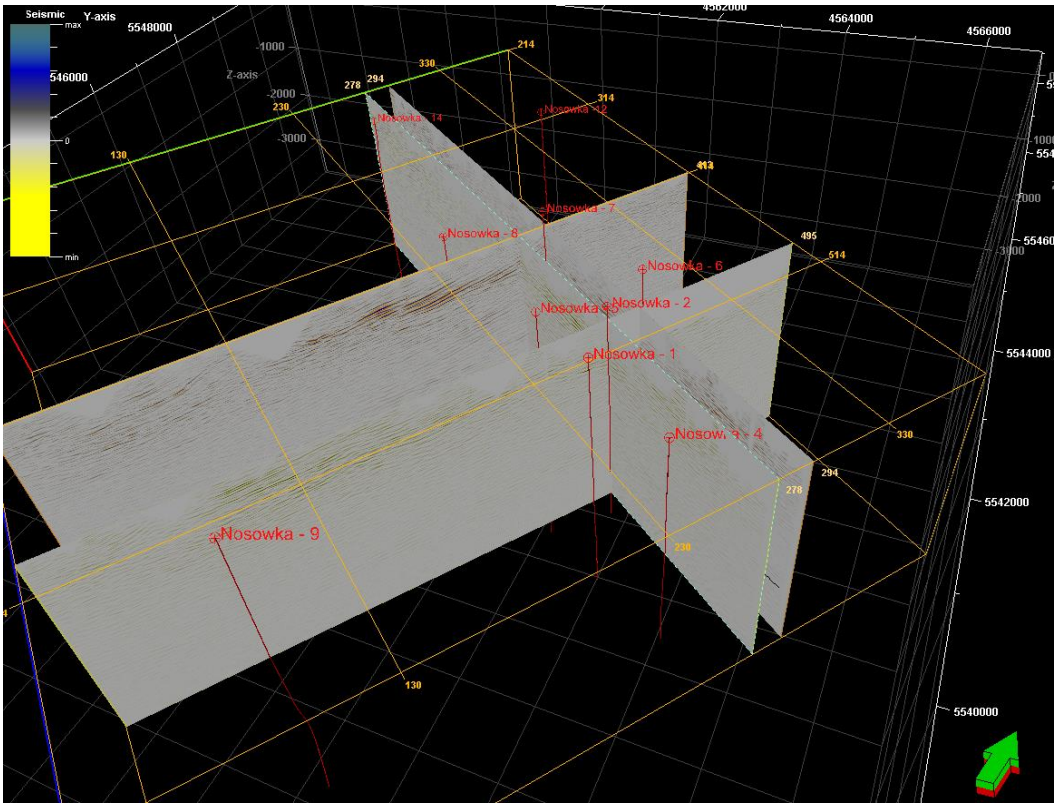


Fig. 1.1.18_181 Przebieg profili IL413, IL495, XL294, XL278 (kostka ograniczona obszarowo w stosunku do powierzchni zdjęcia Sędziszów-Będziemyśl 3D)

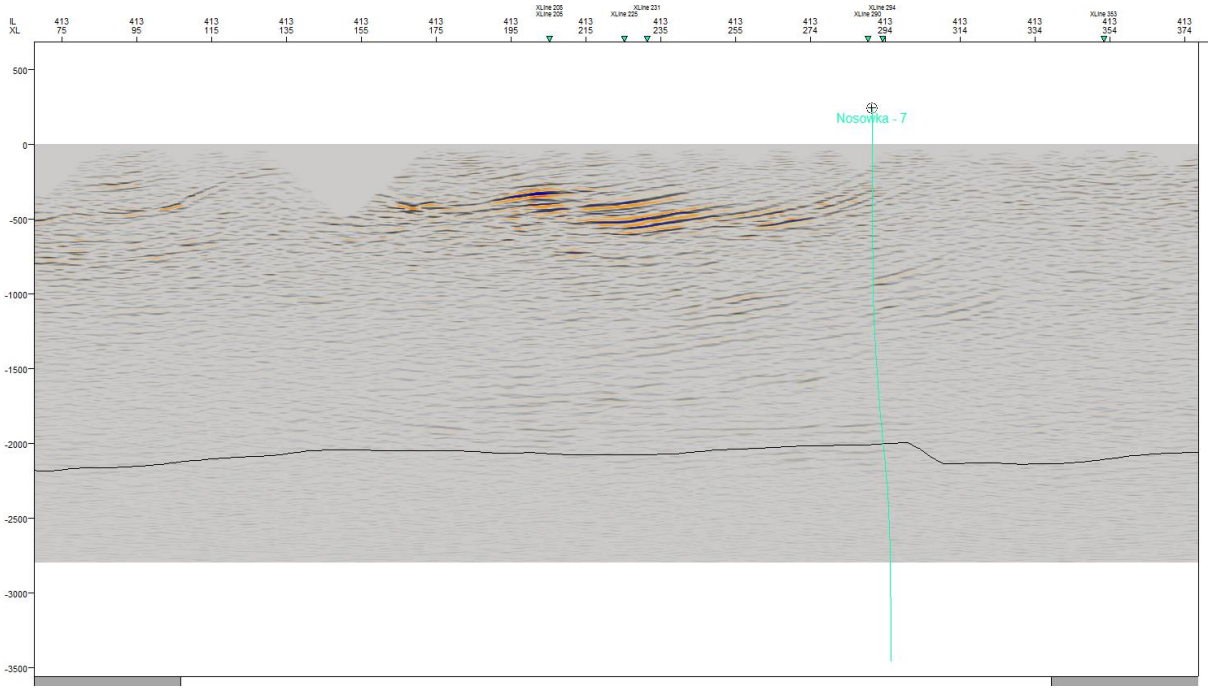


Fig. 1.1.18_182 IL413, otwór w skali głębokościowej

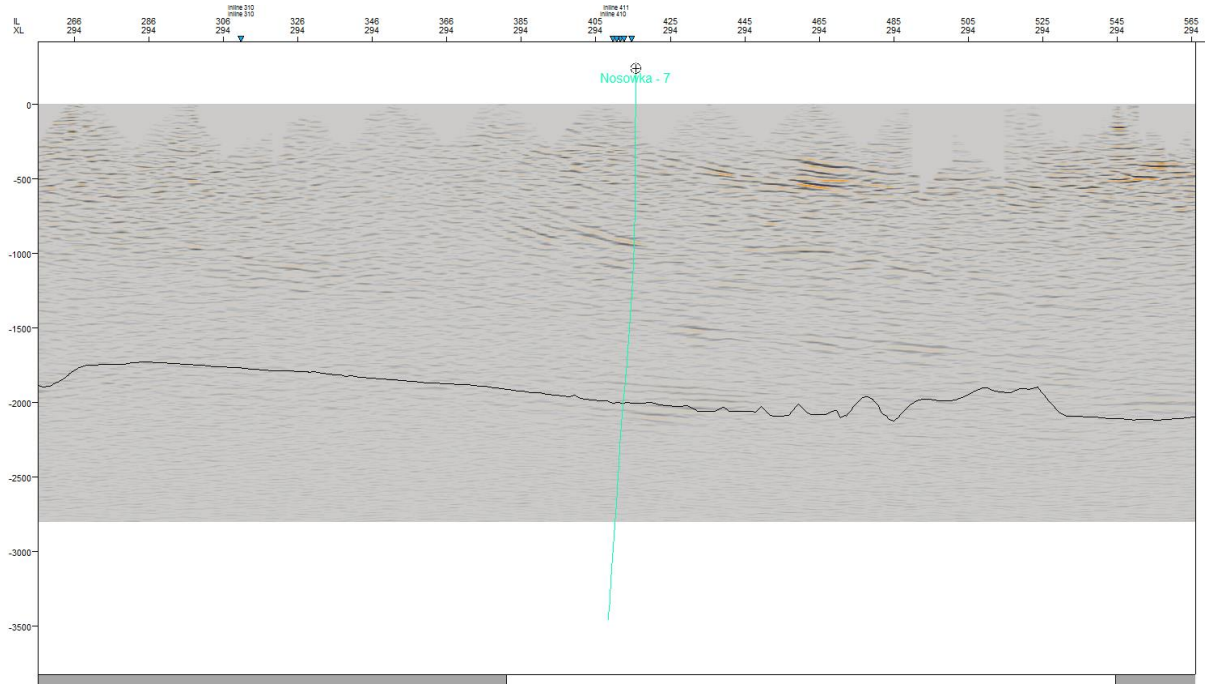


Fig. 1.1.18_183 IL294, otwór w skali głębokościowej

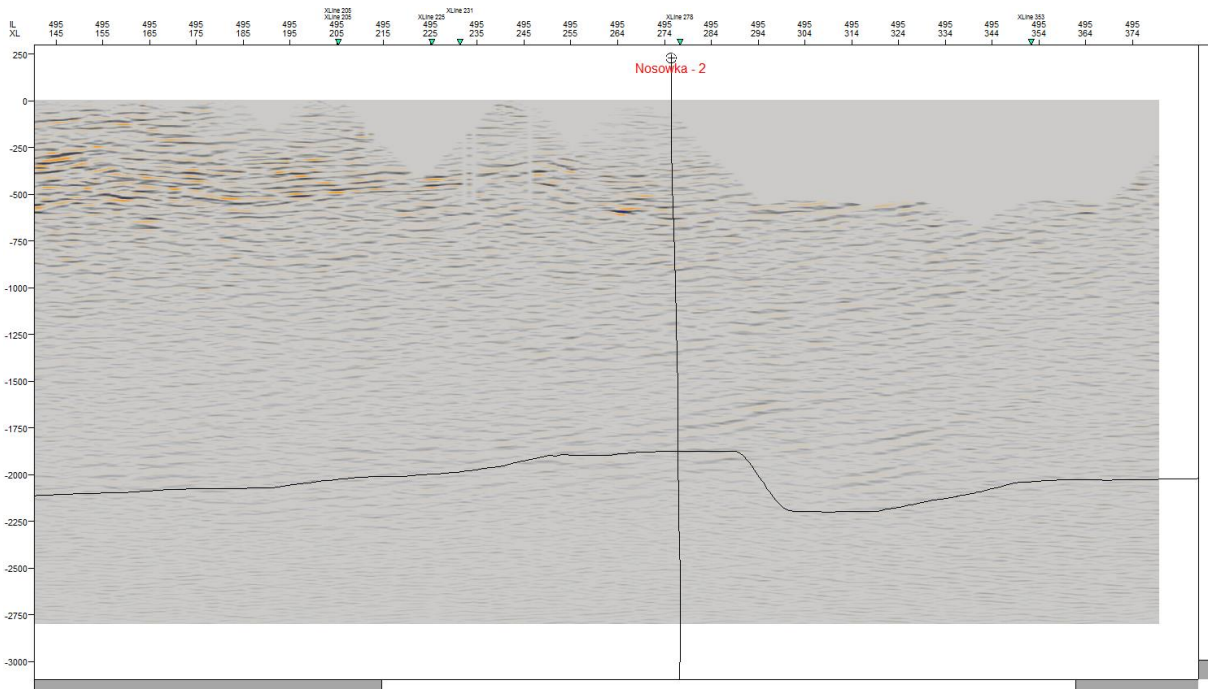


Fig. 1.1.18_184 IL 495, stropu utworów wizenu. UWAGA: sejsmika w skali czasowej, otwór w głębokościowej

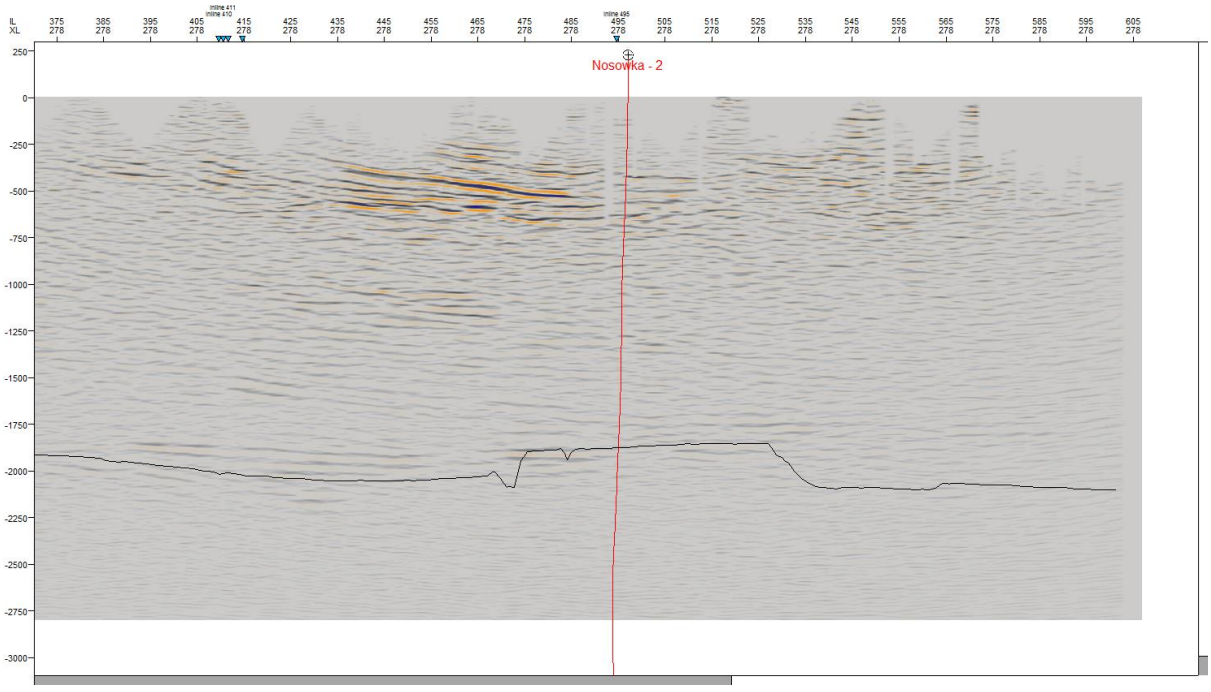


Fig. 1.1.18_185 XL 278; otwór w skali głębokościowej

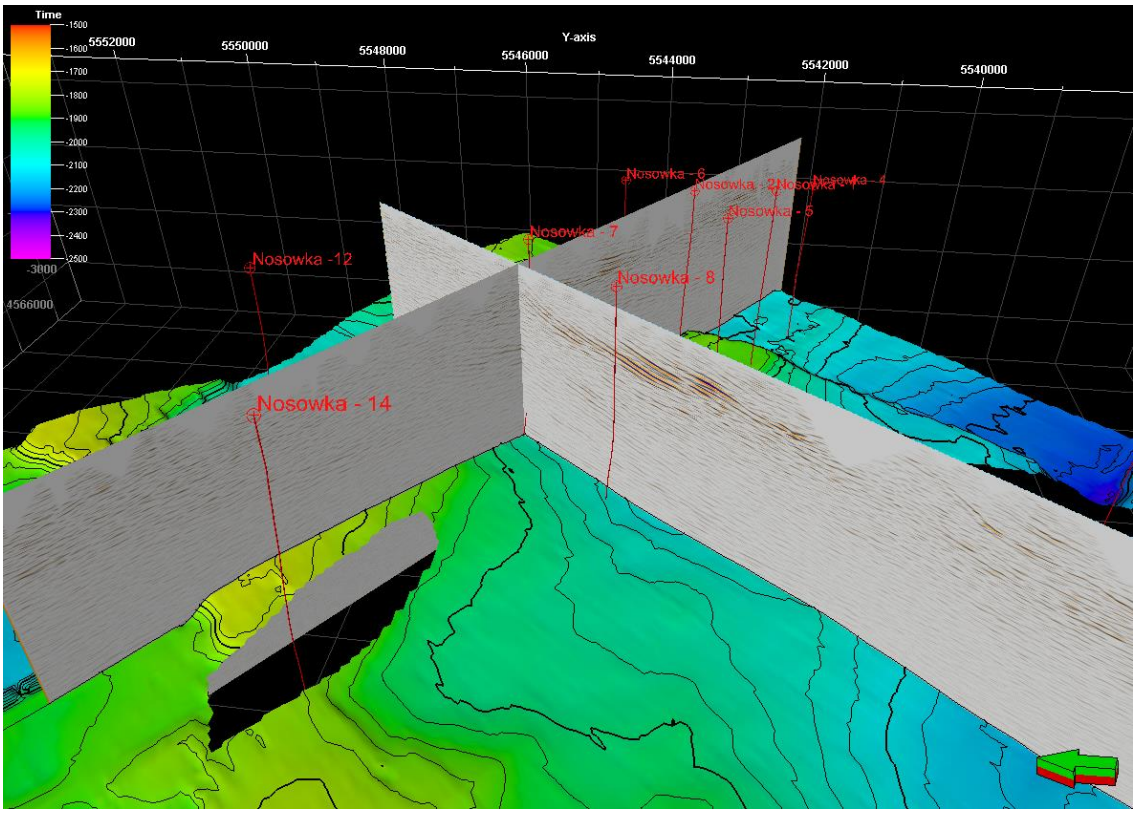


Fig. 1.1.18_186 IL413, XL294 (Otwór Nosówka-7)

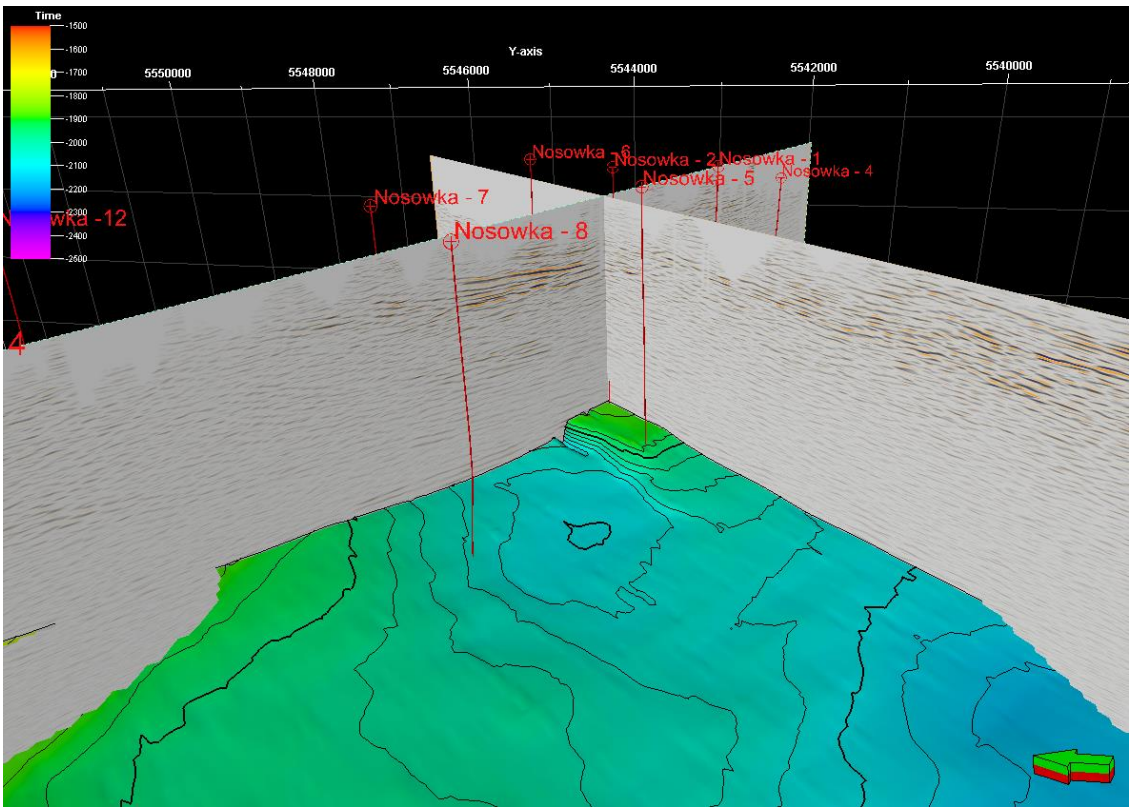


Fig. 1.1.18_187 Przebieg IL495 i XL278 (odwiert Nosówka-2)

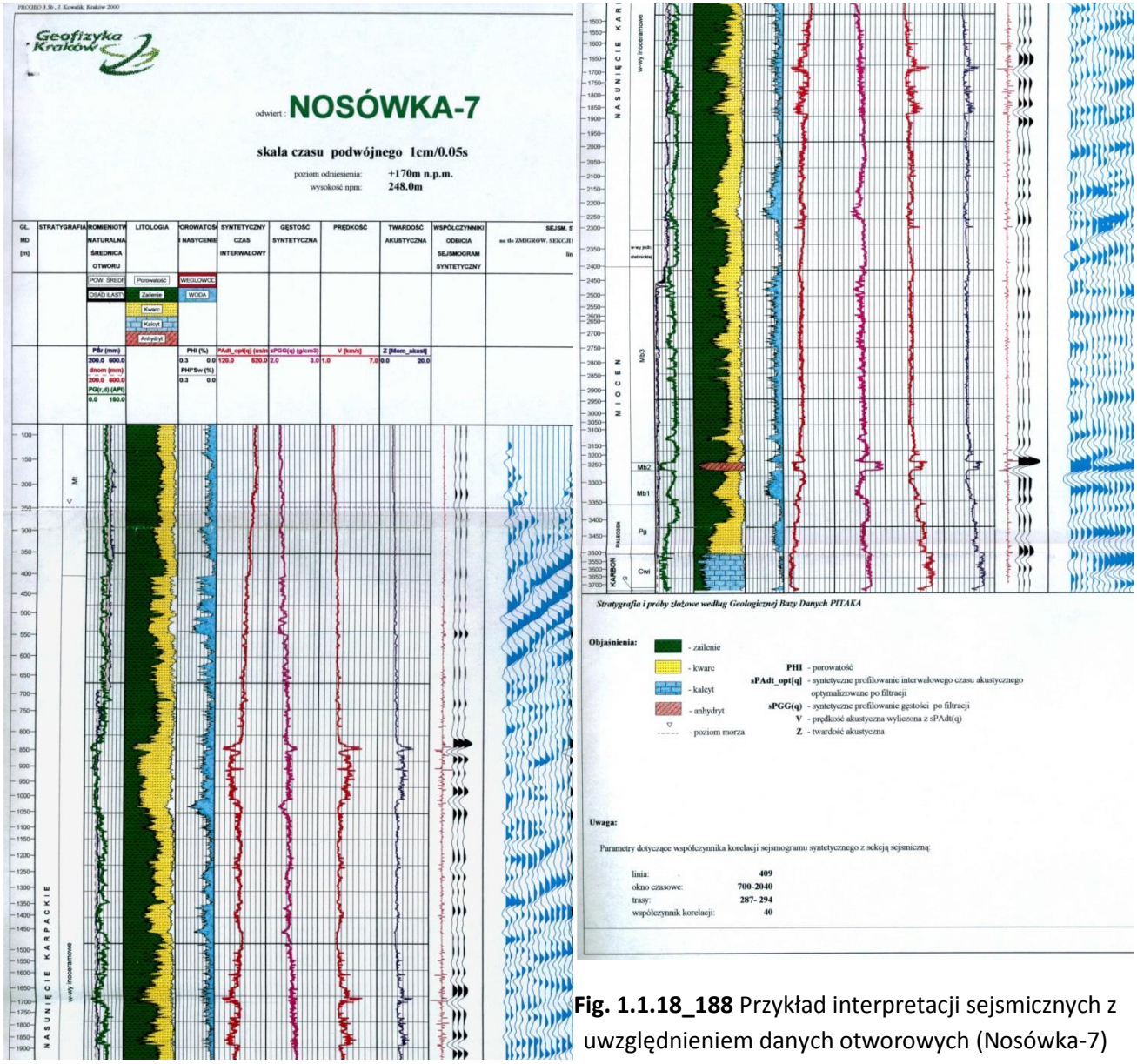


Fig. 1.1.18_188 Przykład interpretacji sejsmicznych z uwzględnieniem danych otworowych (Nosówka-7)

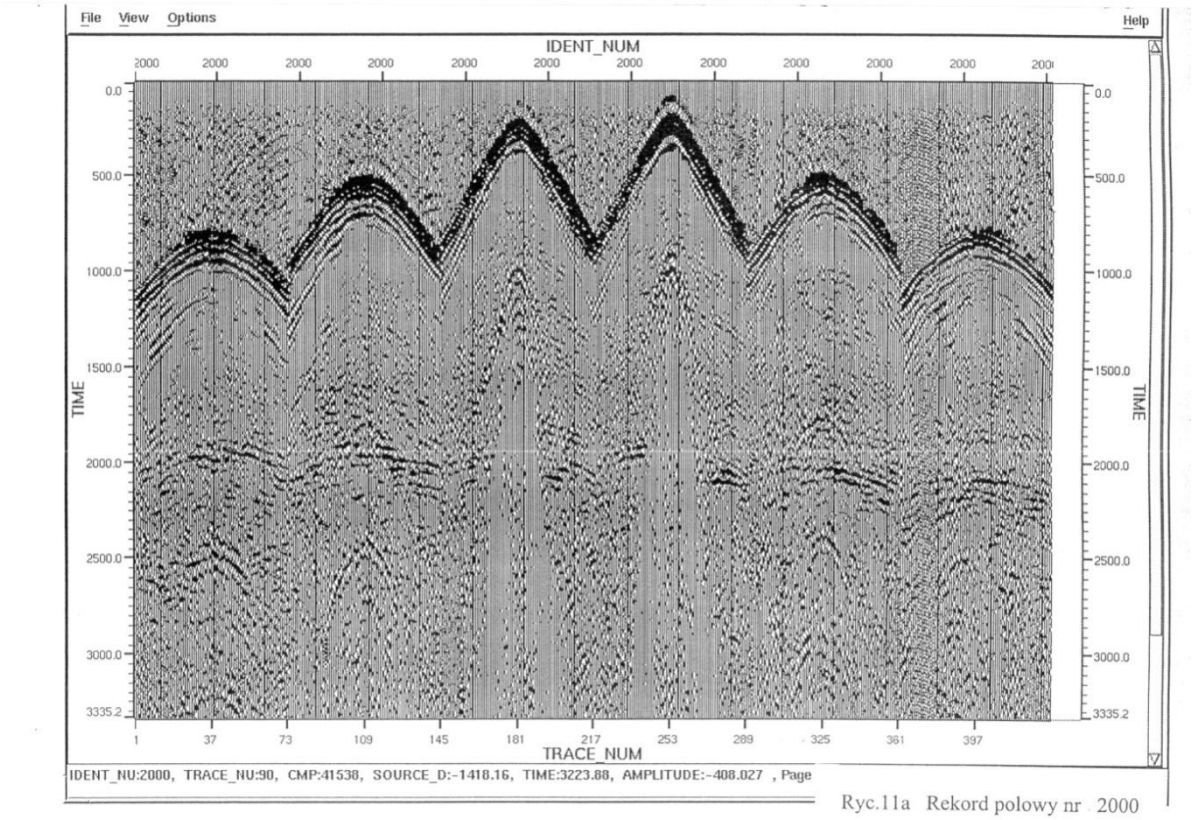


Fig. 1.1.18_189 Dane Geofizyki Kraków; temat Sędziszów - Będziemyśl

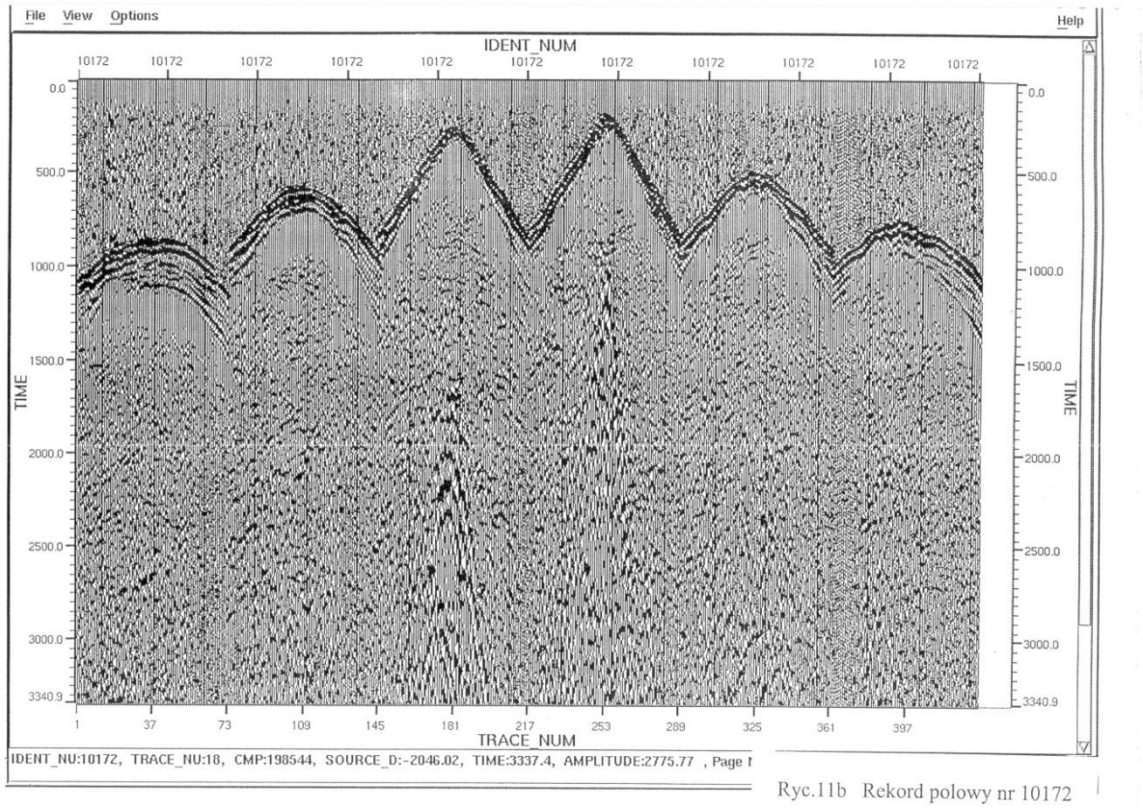


Fig. 1.1.18_190 Dane Geofizyki Kraków; temat Sędziszów - Będziemyśl

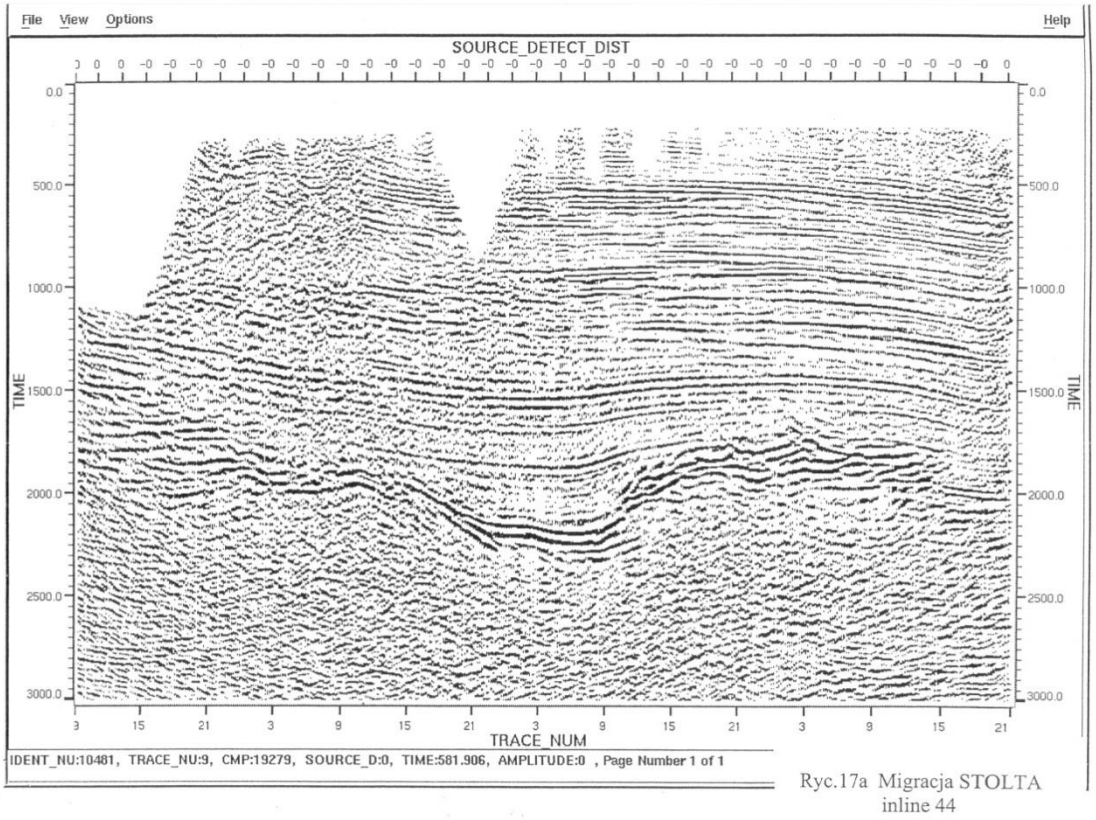


Fig. 1.1.18_191 Dane Geofizyki Kraków; temat Sędziszów - Będziemyśl

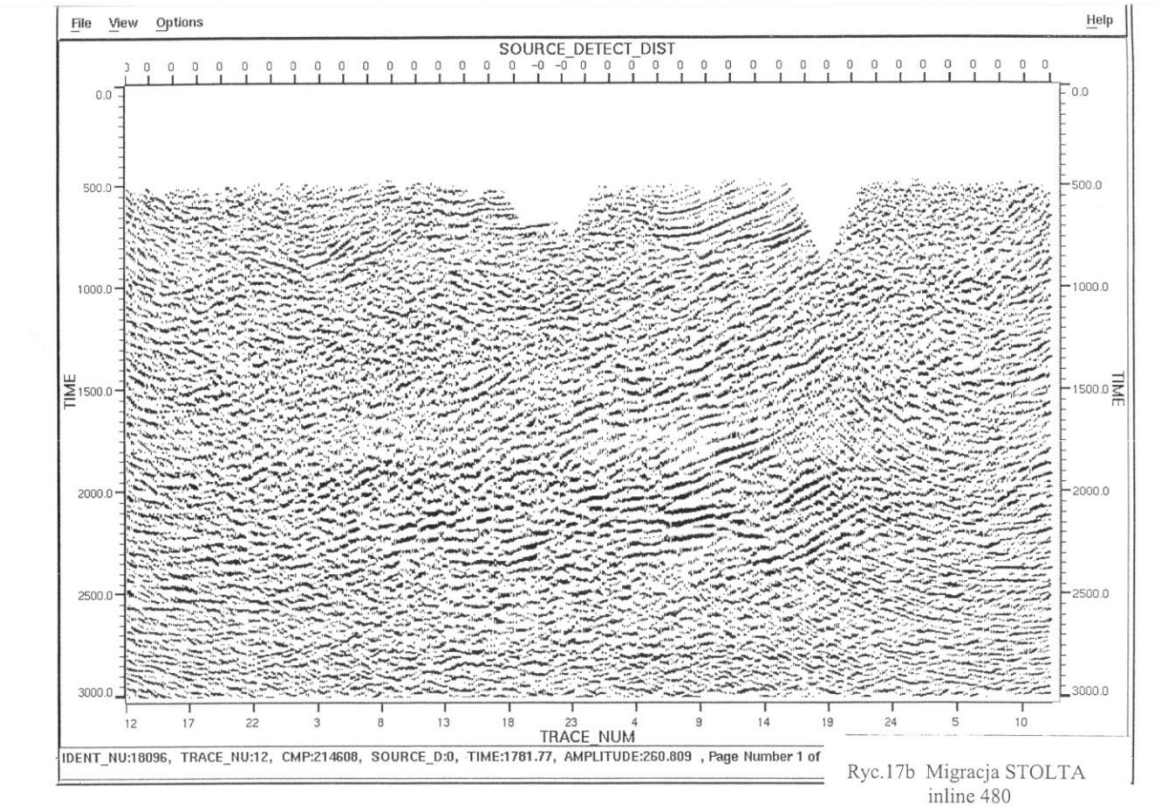


Fig. 1.1.18_192 Dane Geofizyki Kraków; temat Sędziszów - Będziemyśl

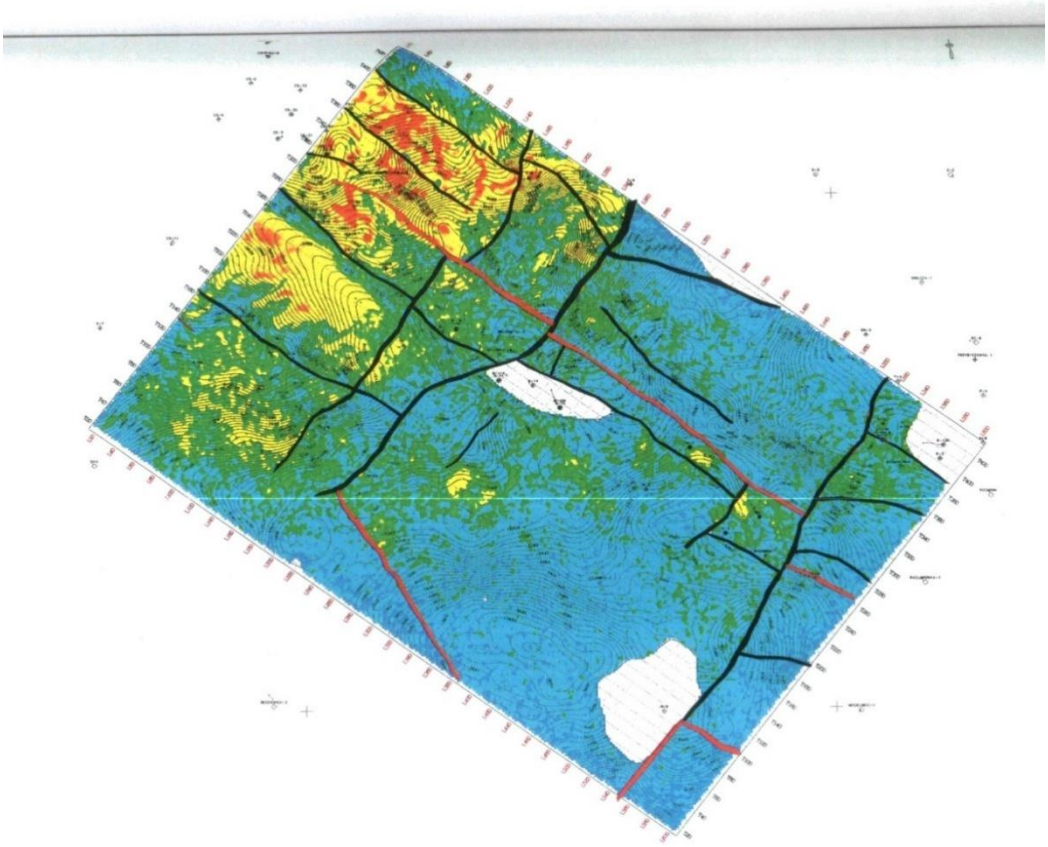


Fig. 1.1.18_193 Mapa maksymalnych dodatnich wartości amplitud w bramce czasowej C1wstr 0ms, C1wstr+50ms na tle mapy strukturalnej C1wstr

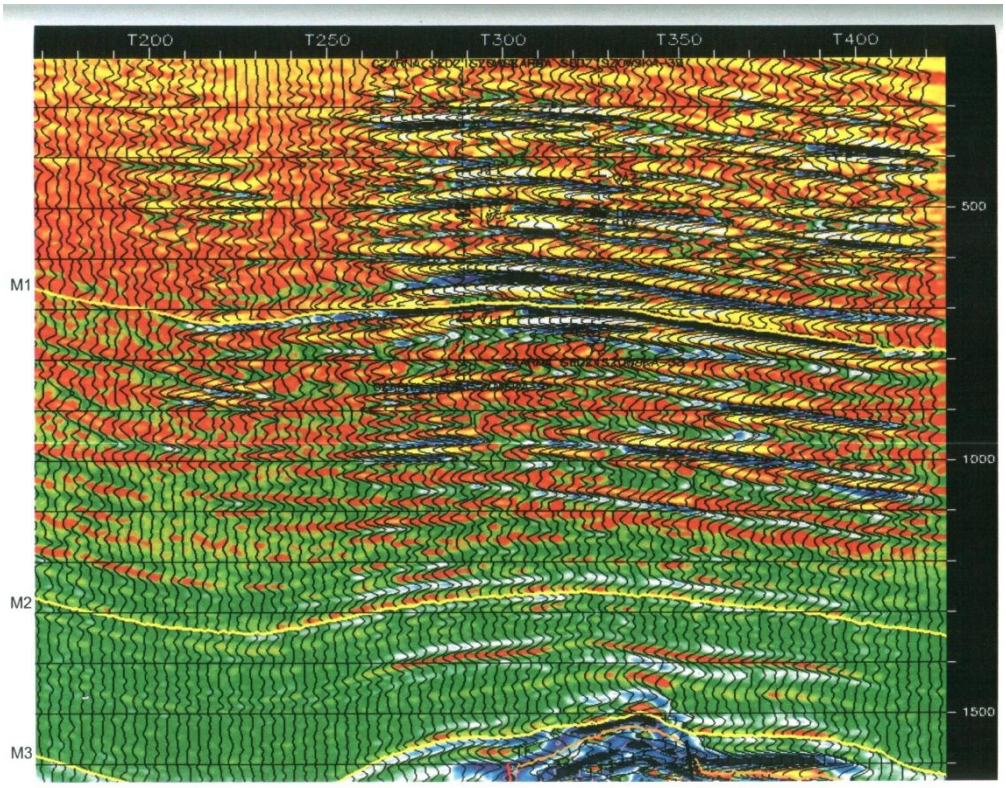


Fig. 1.1.18_194 Linia 50 – impedancja akustyczna

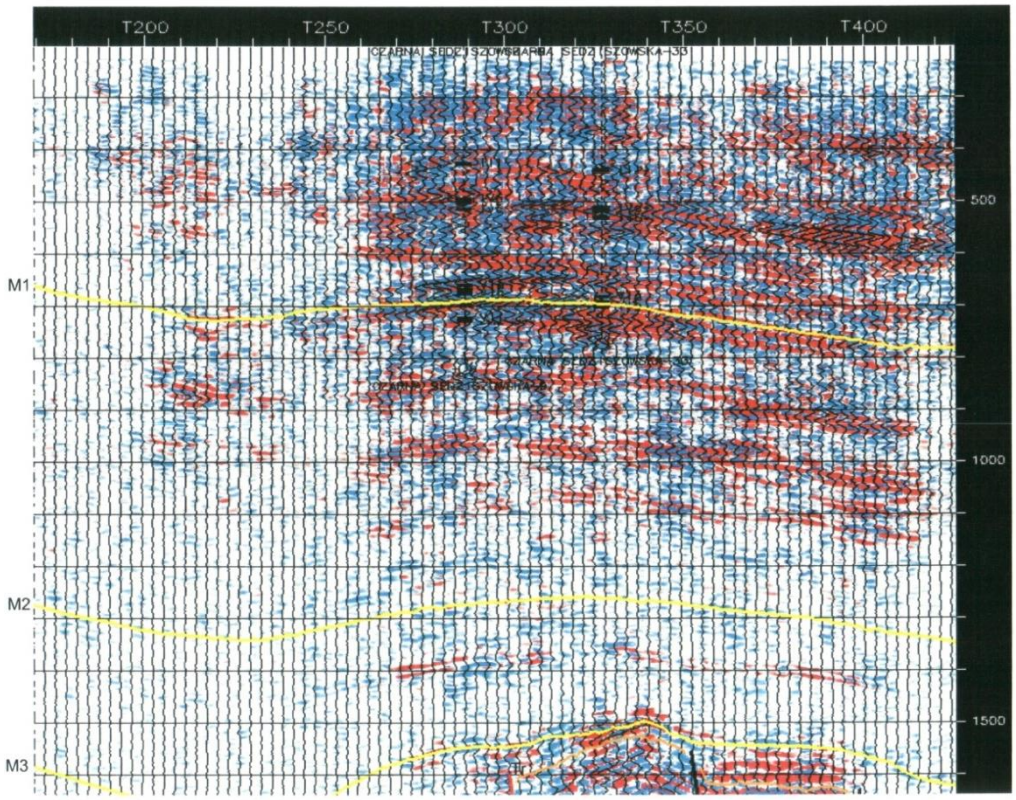


Fig. 1.1.18_195 Linia 50 – AVO

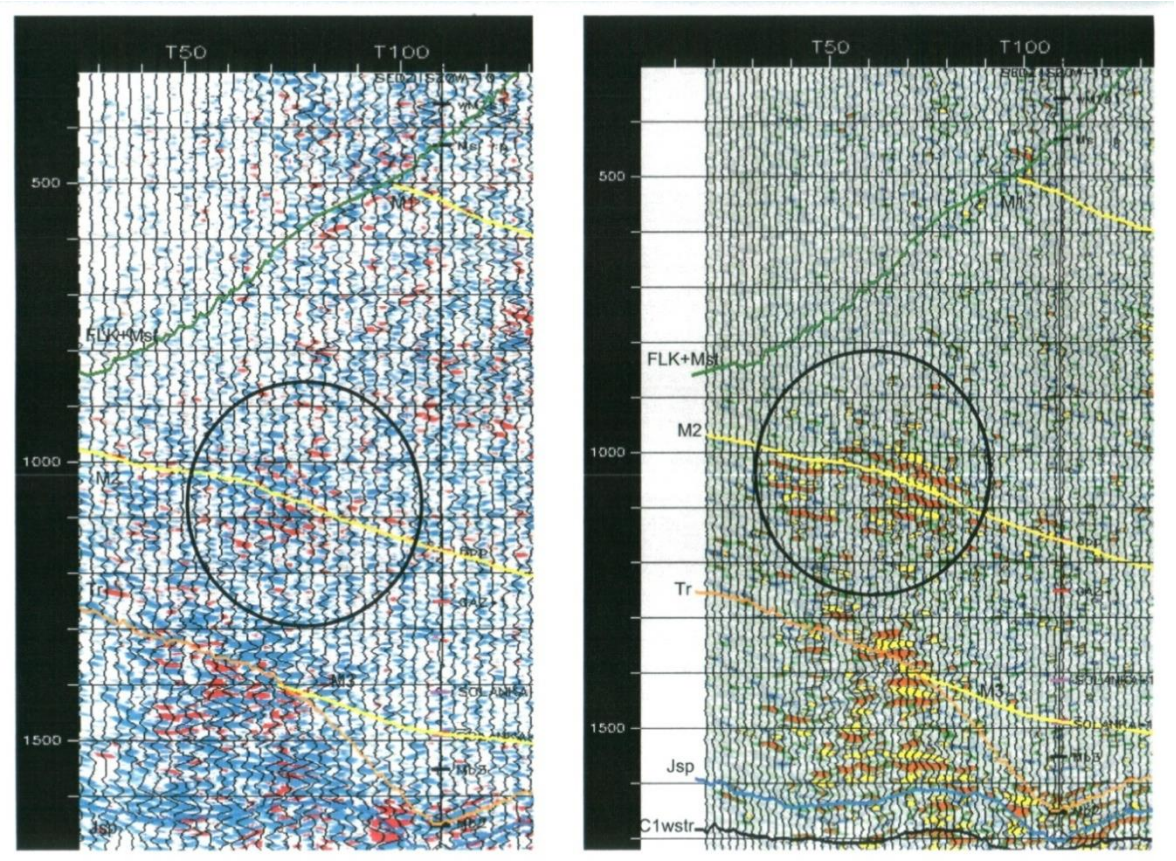


Fig. 1.1.18_196 Linia 50-AVO i zmiana współczynnika Poissona

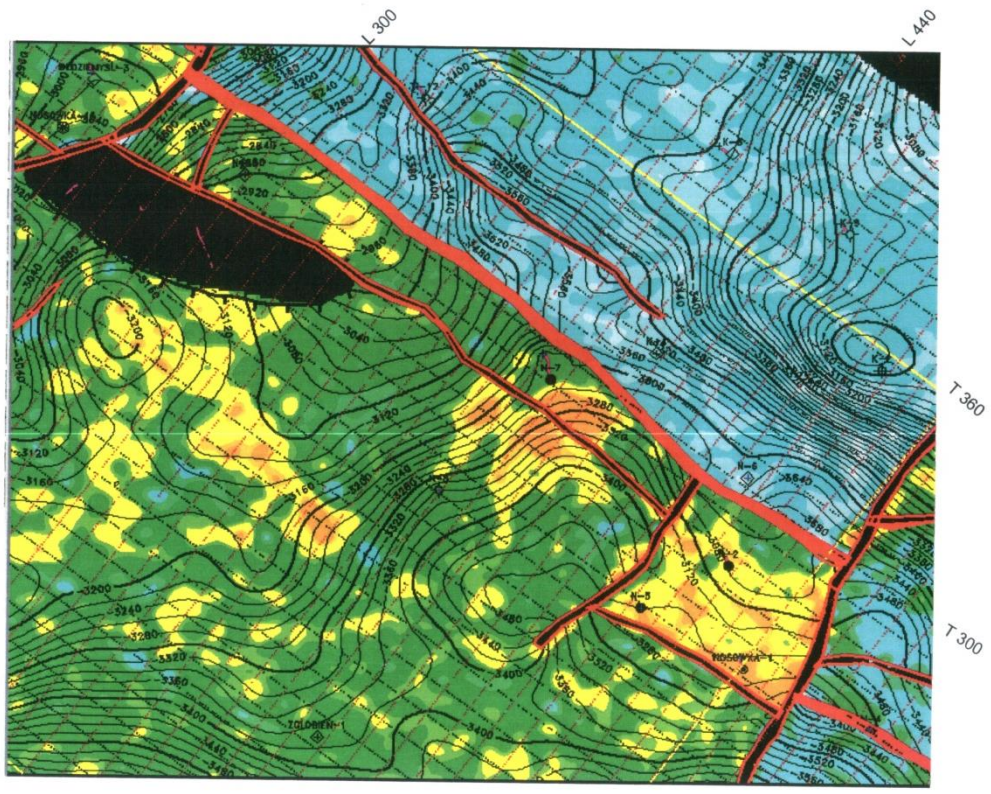


Fig. 1.1.18_197 Mapa impedancji akustycznej granicy sejsmicznej C1wstr – bramka czasowa C1wstr 0 ms do C1wstr +70ms

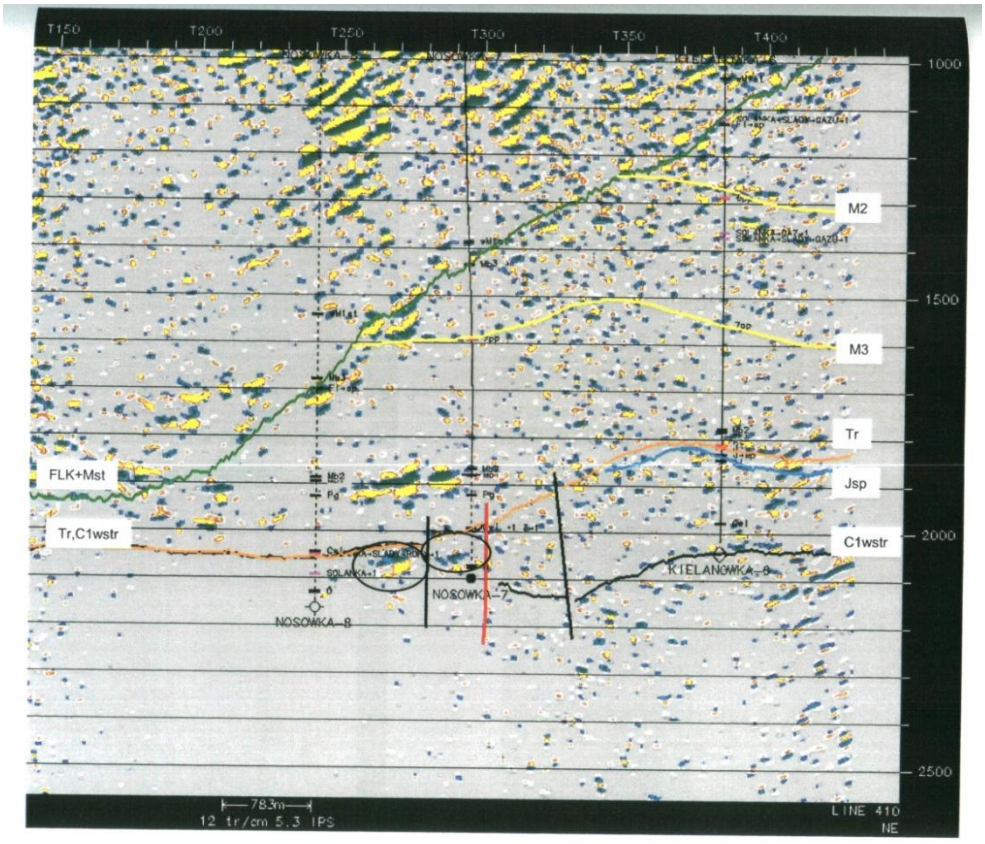


Fig. 1.1.18_198 Przekrój sejsmiczny L410 – perigram x cosinus fazy

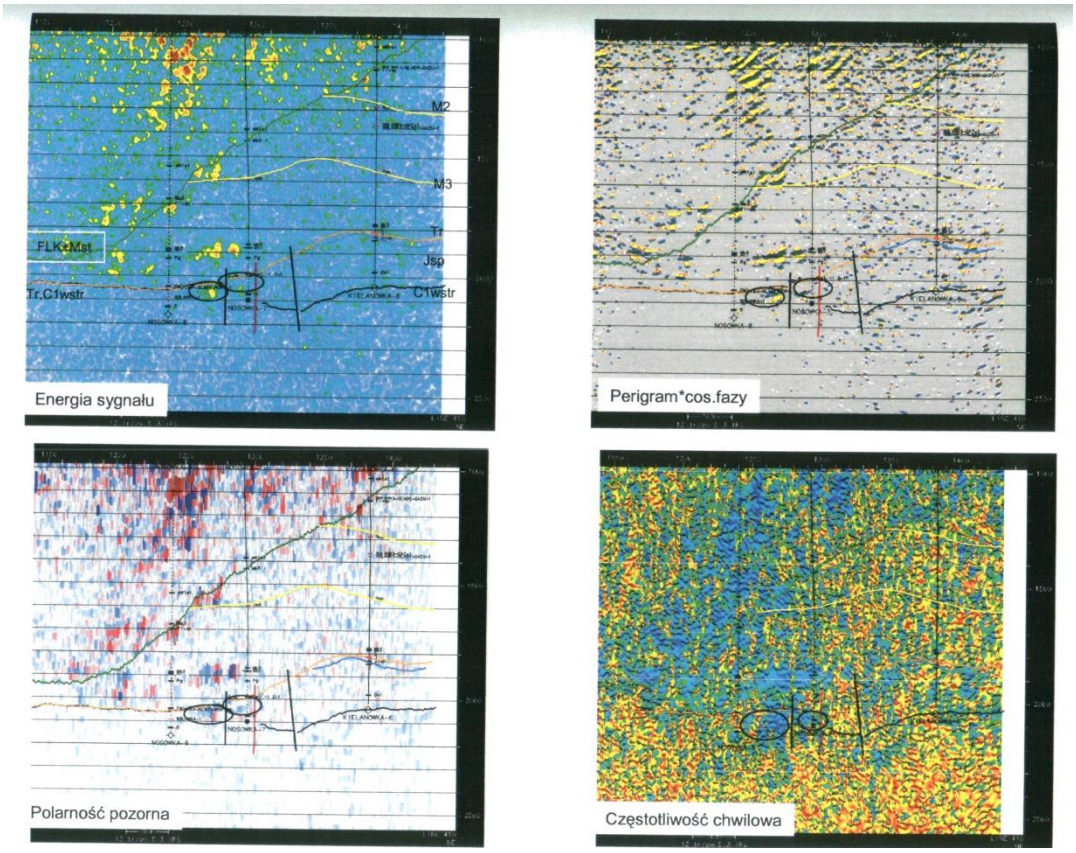


Fig. 1.1.18_199 Przekrój sejsmiczny L410

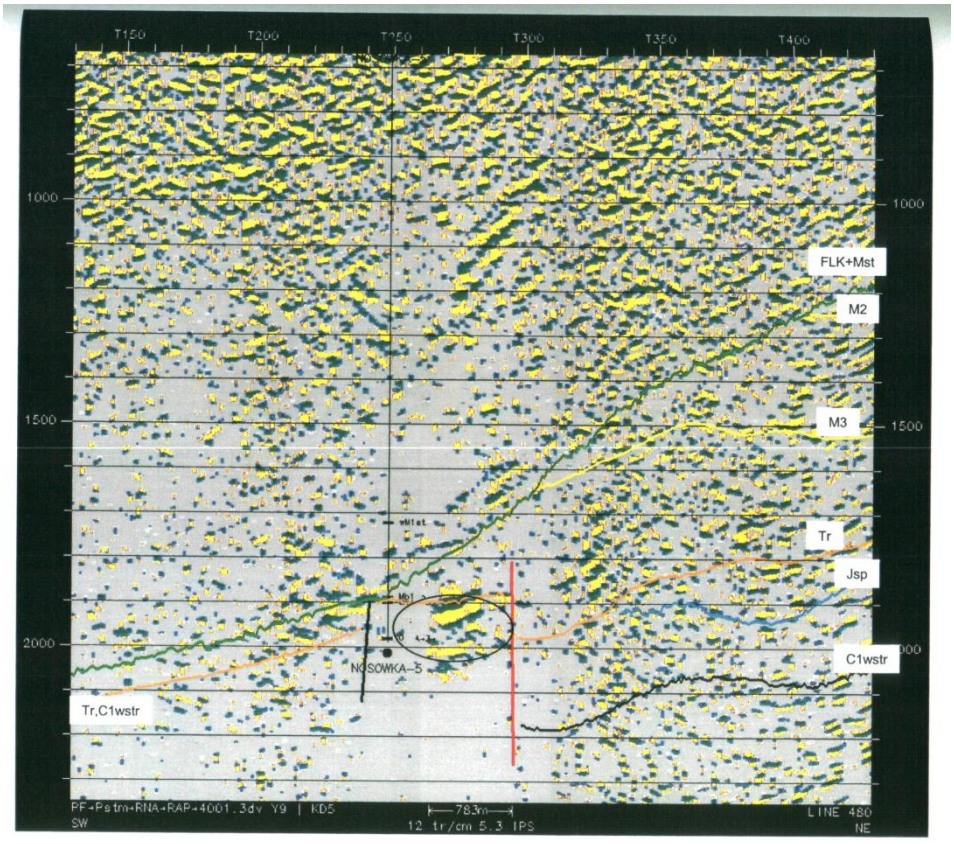


Fig. 1.1.18_200 Przekrój sejsmiczny L480 – perigram x cosinus fazy

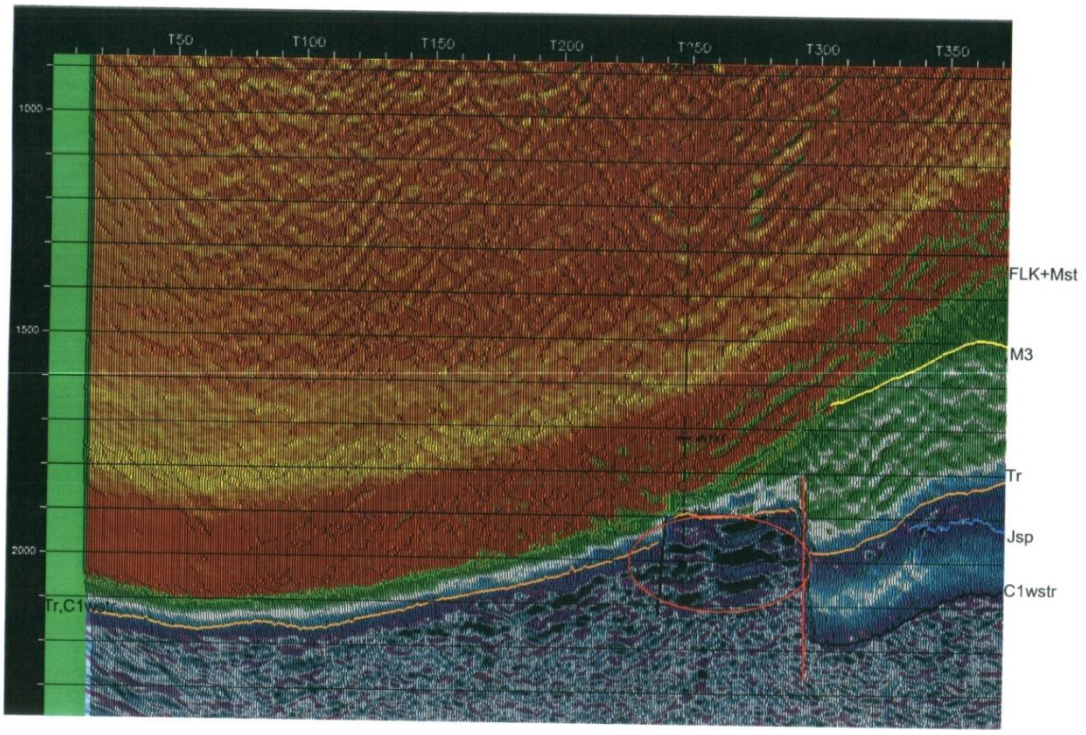


Fig. 1.1.18_201 Linia 480 – impedancja akustyczna

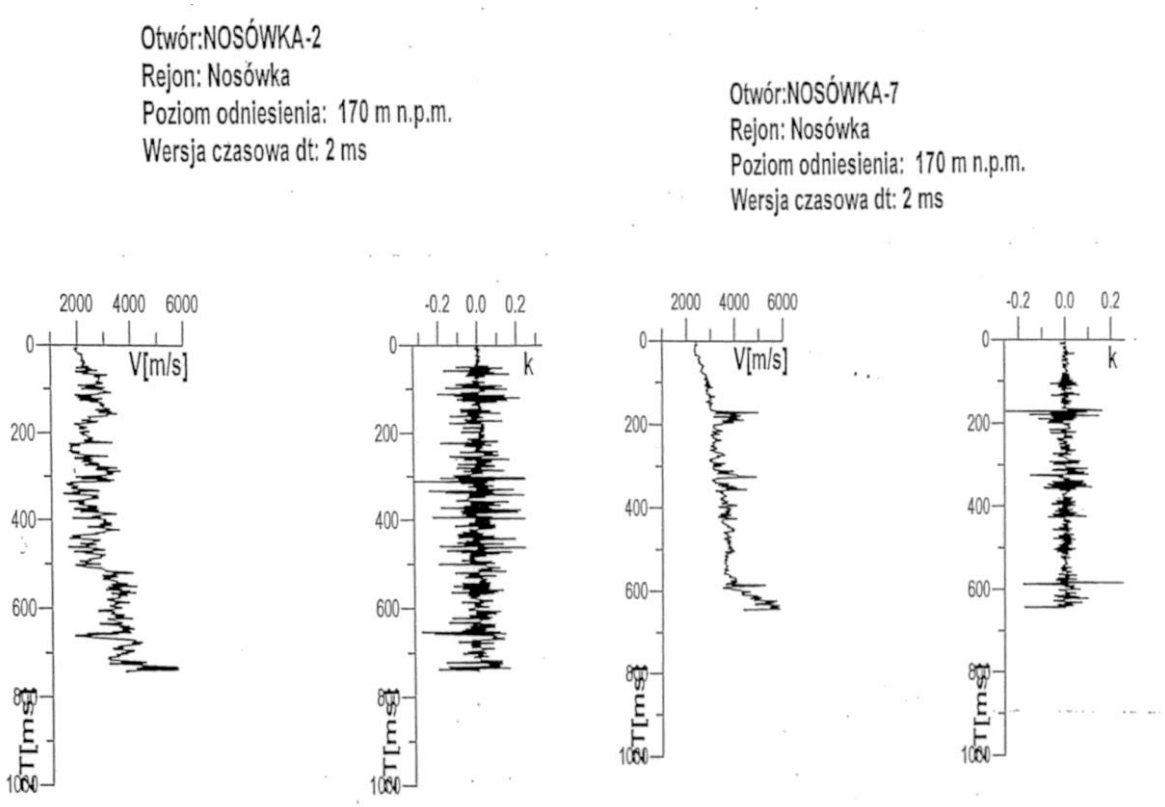


Fig. 1.1.18_202 Profilowanie akustyczne i krzywa **Fig. 1.1.18_203** Profilowanie akustyczne i krzywa

refleksyjności refleksyjności

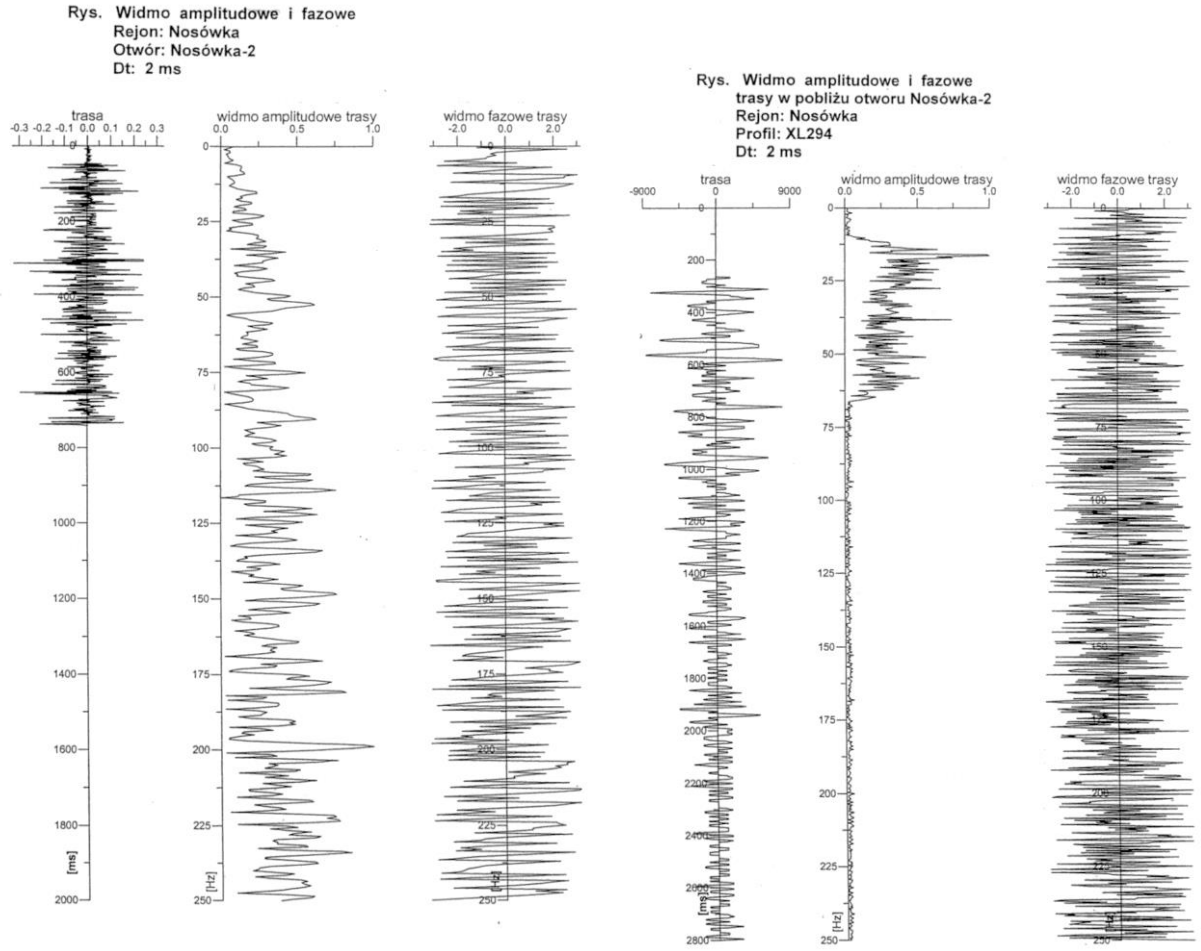


Fig. 1.1.18_204 i **205** Wyniki analizy spektralnej danych otworowych

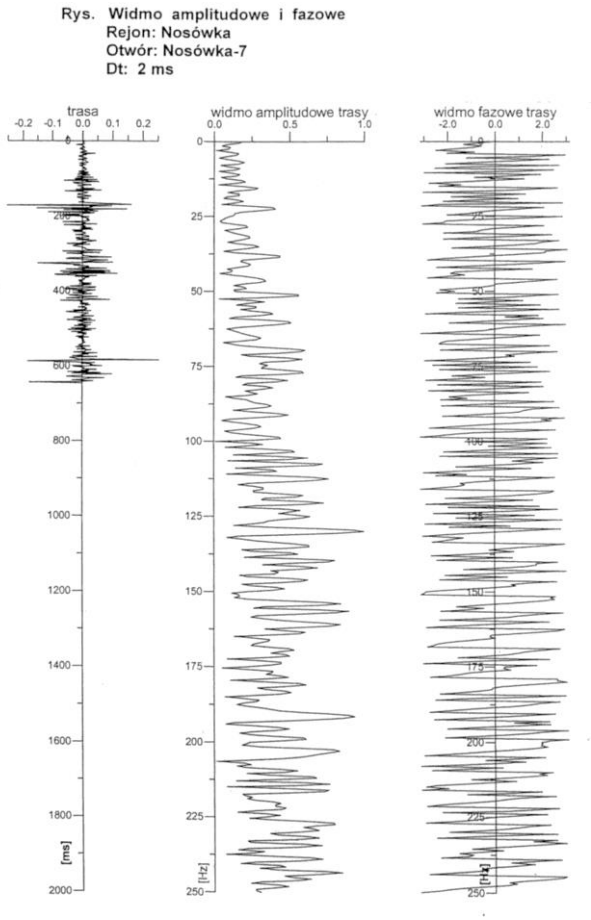


Fig. 1.1.18_206 Wyniki analizy spektralnej danych sejsmicznych

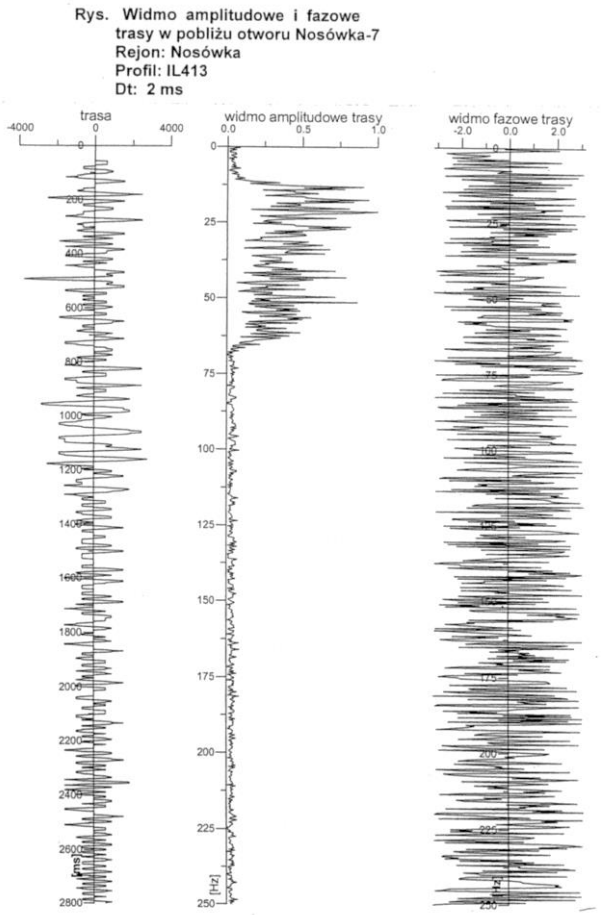


Fig. 1.1.18_207 Wyniki analizy spektralnej danych sejsmicznych

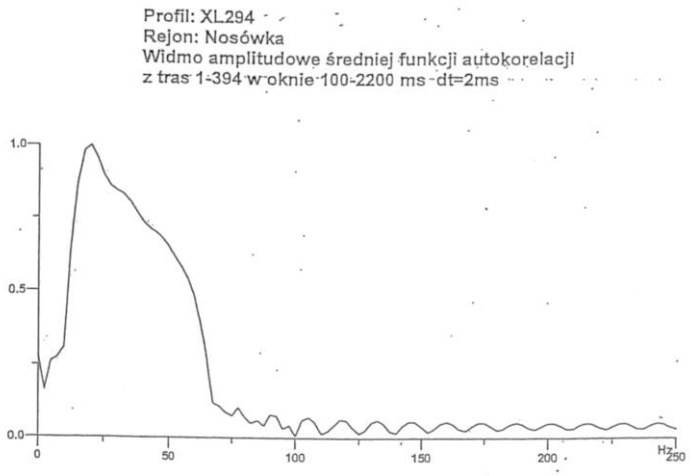


Fig. 1.1.18_208 Definiowanie widma kryterialnego

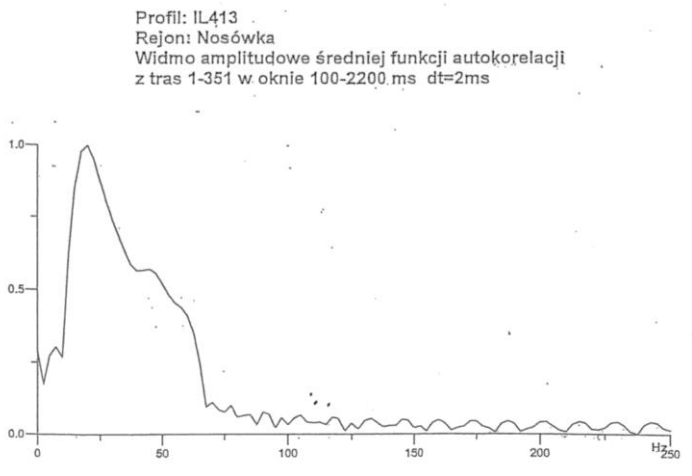


Fig. 1.1.18_209 Definiowanie widma kryterialnego

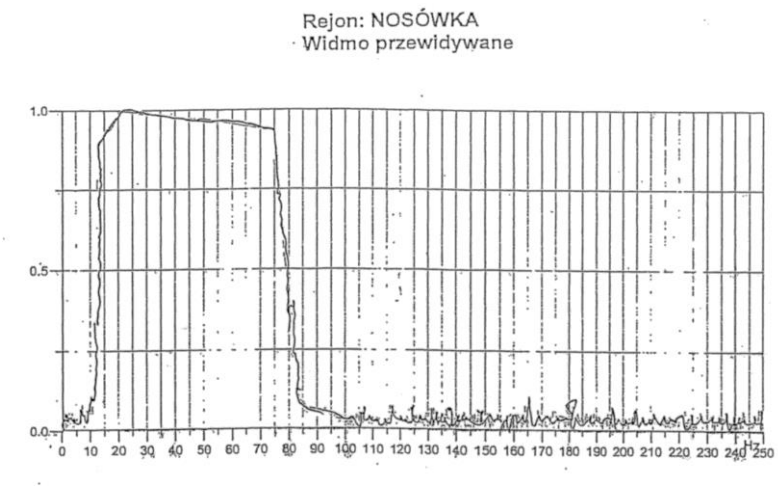


Fig. 1.1.18_210 Definiowanie widma kryterialnego

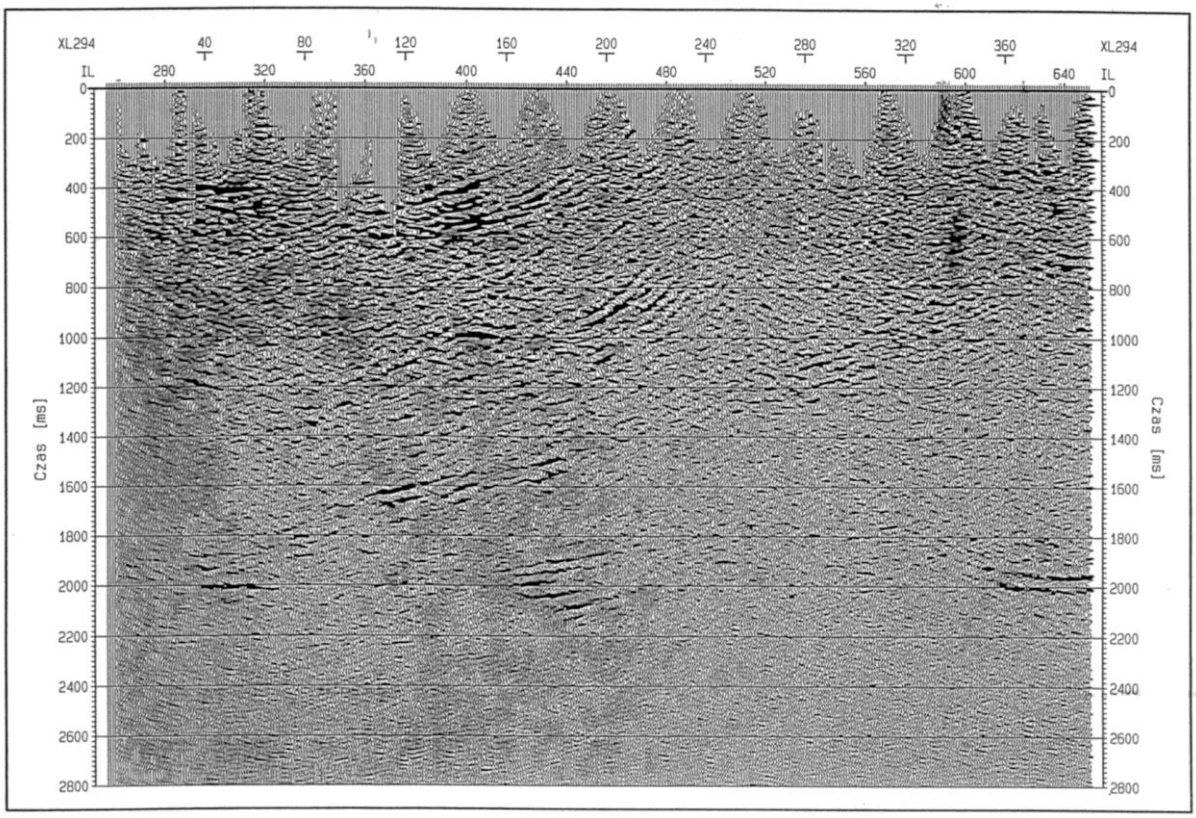


Fig. 1.1.18_211 Sekcja sejsmiczna przed aplikacją procedury zwiększenia rozdzielczości

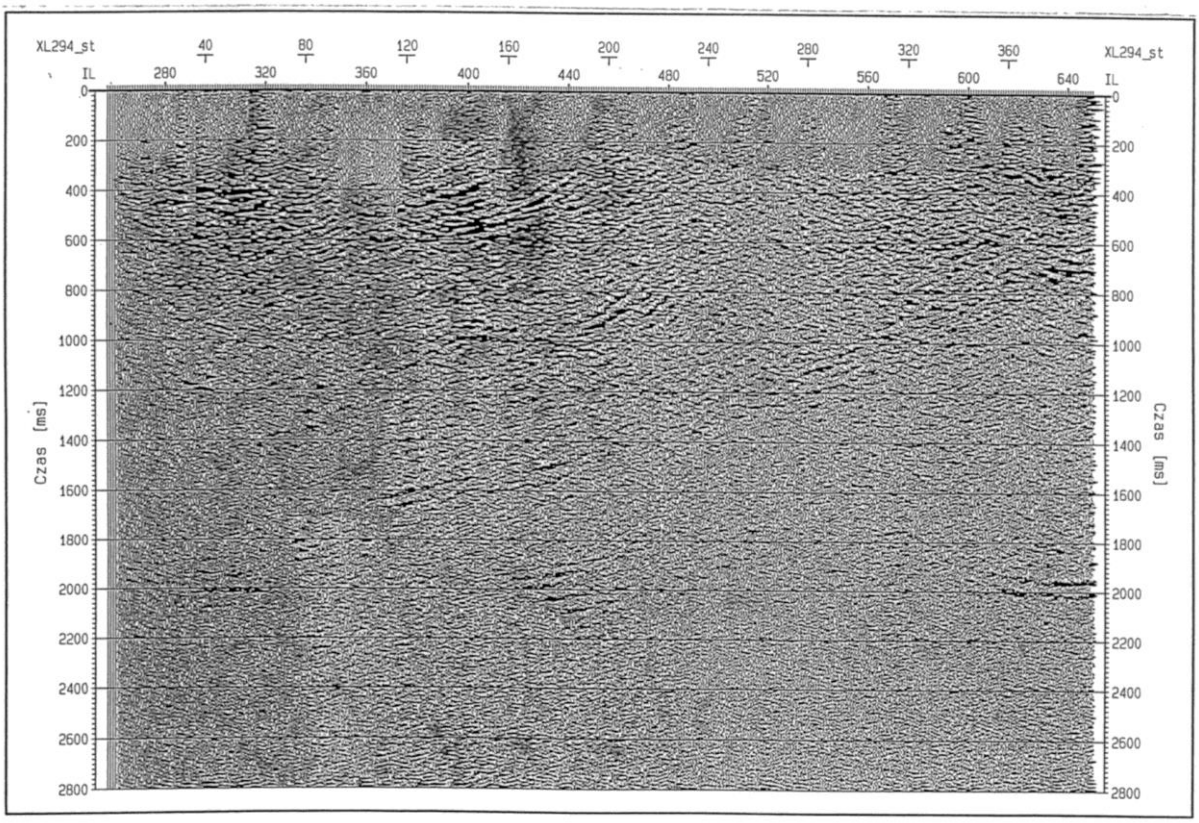


Fig. 1.1.18_212 Sekcja sejsmiczna po aplikacji procedury zwiększenia rozdzielczości

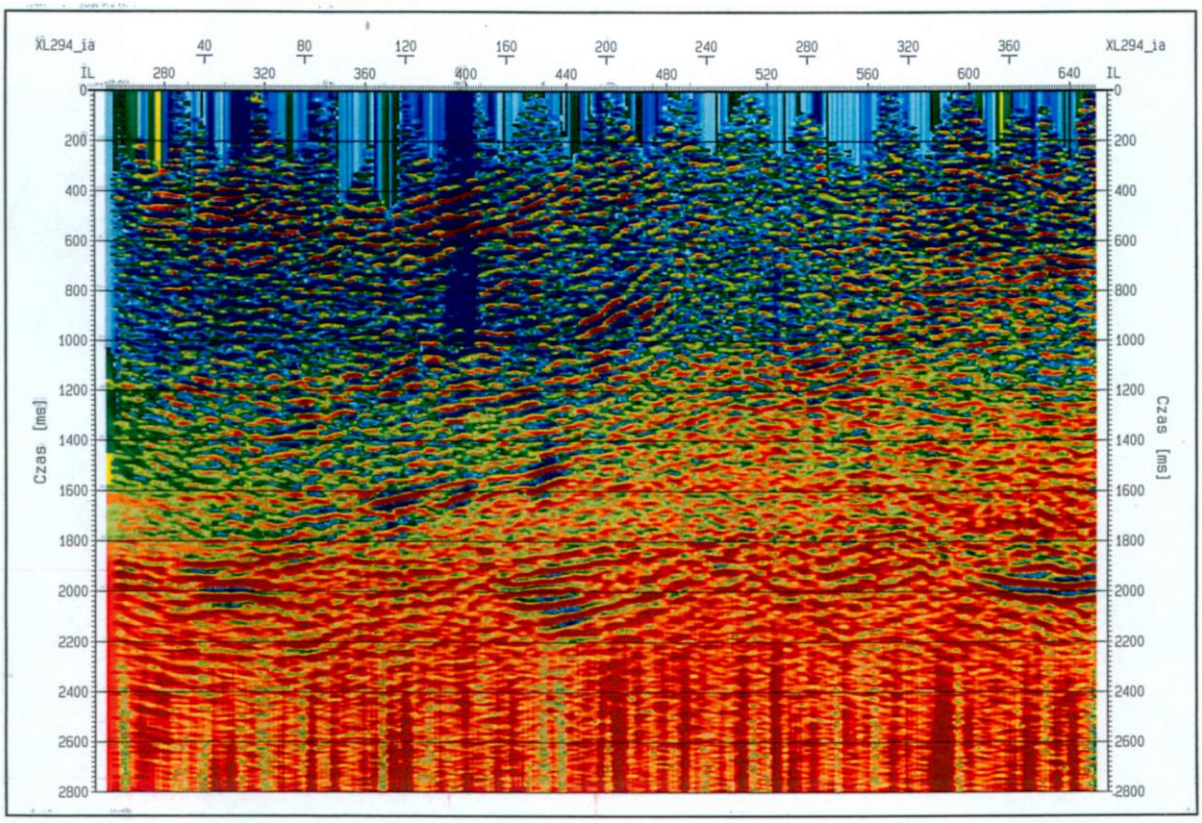


Fig. 1.1.18_213 Sekcja impedancji akustycznej przed aplikacją procedury zwiększenia rozdzielczości

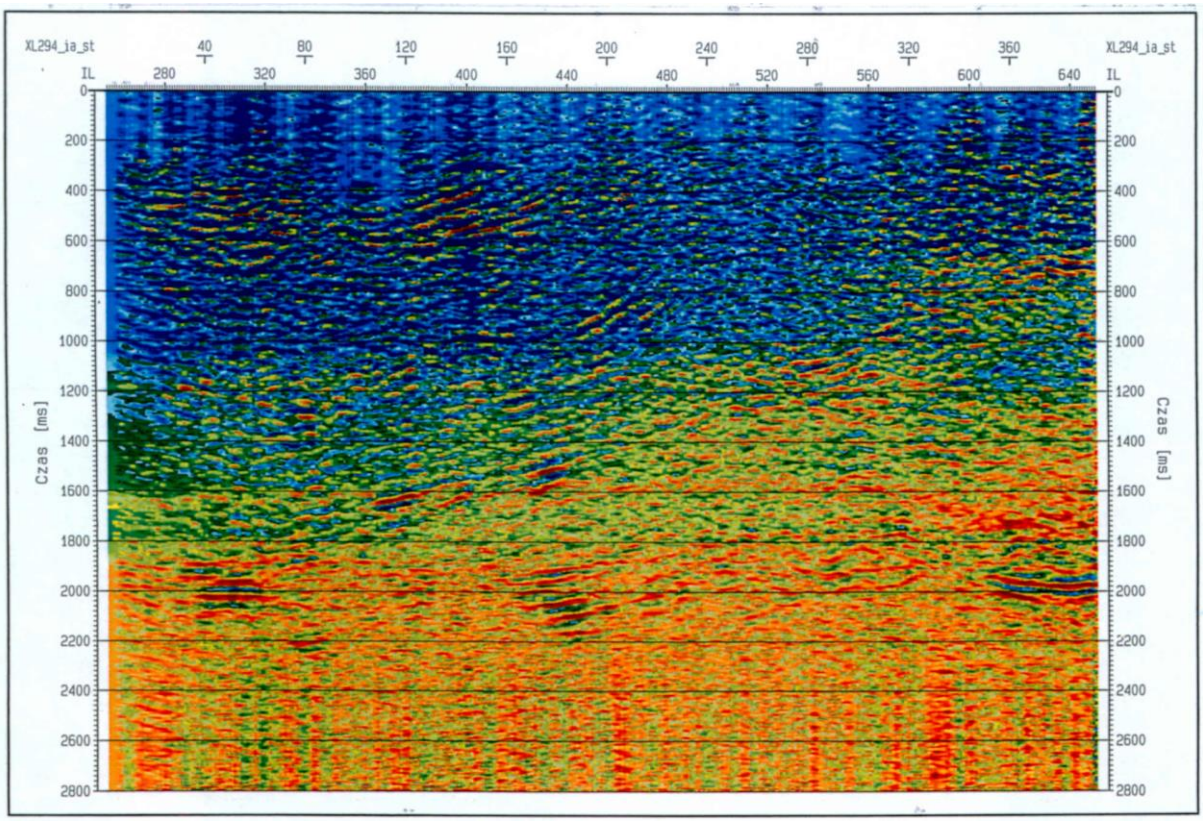


Fig. 1.1.18_214 Sekcja impedancji akustycznej po aplikacji procedury zwiększenia rozdzielczości

Wstępny projekt monitorowania obiektu Nosówka

Kłopotliwym jest fakt, że przygotowując projekt monitorowania opierać się trzeba praktycznie wyłącznie na doświadczeniach zagranicznych. I tak, w dużym kończącym raporcie British Geological Survey – The IEA Weyburn CO_2 Monitoring and Storage Project (2001 – 2004) rozdz. II zatytułowany Reservoir Monitoring and Characterisation, podzielony jest na sześć sekcji (analiza rdzenia, analizy płynów i rozpuszczonych gazów, modelowanie hydrogeologiczne i hydrochemiczne, procesy geochemiczne i monitorowanie mikrosejsmiczne) i realizowany jest pod kątem oceny długoterminowych dróg migracji CO_2 oraz wzajemnych reakcji ze środowiskiem geologicznym aby w efekcie przedstawić kluczową zmienność ośrodka wywołaną zatłaczaniem CO_2.

Ważną rolę odgrywała możliwość pozyskiwania informacji z otworów i wykorzystywania ich do eksperymentów laboratoryjnych i następnie do modelowania fizycznego i matematycznego, przyjmując warunki symulowane „in situ".

Sejsmiczne monitorowanie pola naftowego Weyburn prowadzone było w celu określenia „seismic hazards", czyli zmienności pola sprężystego wywołanego przez iniekcję CO_2 i wywołane tym tworzenie się nowych lub reaktywację istniejących szczelin jako reakcji na lokalny wzrost ciśnienia (*local overpressure*).

Rejestrację prowadzono specjalnie w tym celu zainstalowanymi w opuszczonych otworach geofonami trójskładnikowymi o częstotliwości rezonansowej 20 Hz (w interwale 1181 – 1356 m z krokiem 25 m) w okresie wrzesień 2003 – marzec 2004. Rejon pola Weyburn znajduje się w strefie sejsmicznie nieaktywnej. Magnituda zapisanych drgań mikrosejsmicznych obejmowała zakres 1 – 3,5, nie przekraczając typowych drgań związanych z zatłaczaniem gazu lub zawodnieniem. Model prędkości obliczono na podstawie profilowania akustycznego (dipole sonic log) w jednym z otworów.

Analiza zarejestrowanego pola falowego wykazuje obecność 3 typów drgań:

- związane z procesem wiercenia
- niskoczęstotliwościowe o częstotliwości bliskiej częstotliwości rezonansowej
- wyraźnie wysokiej częstotliwości, umożliwiających określanie faz fal podłużnych i poprzecznych.

Wymienione typy drgań zostały zinterpretowane w związku z faktami w eksploatacji złoża. I tak, niskoczęstotliwościowe skojarzono z maksymalnym wydobyciem w jednym z horyzontalnych odwiertów, natomiast wysokoczęstotliwościowe ze spadkiem produkcji całkowitej.

Fakty powyższe przytaczam jako uzasadnienie wniosku na temat monitorowania efektów zatłaczania CO_2 na polu naftowym Weyburn. W podsumowaniu autorzy piszą: „zaprezentowane wyniki świadczą jednoznacznie o możliwościach technicznych wykorzystania metody mikrosejsmicznej do monitorowania procesów wynikających w ośrodku wskutek zatłaczania CO_2.
Natomiast na pytanie, w jakim stopniu (ilościowo) i w jakiej danej określonej lokalizacji, odpowiedzieć można tylko po wykonaniu szerokiego wachlarza analiz.

W konkretnej sytuacji złoża Nosówka i jakości danych geofizycznych otworowych i powierzchniowych, najbardziej uprawniona wydaje się propozycja monitorowania sposobem sejsmiki pasywnej (Passive Seismic Monitoring), jakkolwiek jest to metodyka mniej dokładna niż sejsmika 4D.

Zaletą jej byłby identyczny sposób pozyskania danych, a więc mniejsza niepewność wyników podczas porównywania na różnym poziomie zatłaczania CO_2.

Jedna z ważniejszych firm zajmująca się monitorowaniem obiektów geologicznych MICRO-SEISMIC z siedzibą w Houston, Denver i Calgary - pola swojego działania określa następująco: obserwacja i rejestracja drgań sprężystych ośrodka spowodowanych przez szczelinowanie hydrauliczne, osiadanie złoża, zatłaczanie wody, pary lub CO_2 w technolog EOR (Enhanced Oil Recovery) oraz typową sekwestrację CO_2.
Wymieniona firma oferuje badania mikrosejsmiczne w 3 modyfikacjach:

Downhole monitoring (monitorowanie otworowe) – opcja możliwa do realizacji jeżeli monitorowany obszar posiada otwór (otwory) monitorujące nie dalej niż 300 m (~ 1000 stóp) od przewidywanego źródła drgań. Opcja relatywnie mało kosztochłonna.

Surface Array Monitoring (monitorowanie rozstawem powierzchniowym), opcja chroniona patentem, przeznaczona specjalnie do monitorowania dużych obiektów i dużych powierzchni z wieloma otworami, ale bez otworu monitorującego. Również gdy w przypadku dla danych otworowych nie ma możliwości ponownego uruchomienia produkcji.

Burried Array (rozstawu pogrążonego), czyli w układzie geofonów dość płytko zakopanych w ziemi. Opcja pomyślana specjalnie dla długiego okresu monitorowania rozległego zbiornika o dużej perspektywie rozwoju.

Zaproponowana technologia „powierzchniowa" opiera się na zbliżonej do sejsmiki 3D zasadzie sumowania wielu refleksów do określonego punktu odbioru.

Pomimo, że zagadnienie CCS (Carbon Capture and Sequestration) zostało formalnie „zarejestrowane" w środowisku geologów i geofizyków już 18 lat temu na „First International Conference on Carbon Dioxide Removal, w Amsterdamie w 1992 r i jest silnie powiązane z technologiami występującymi w EOR, problem monitorowania jest nadal otwarty. Przede wszystkim dlatego, że tak bardzo zależy od jakości i ilości danych którymi dysponujemy.

Ale najbardziej kłopotliwym elementem w przypadku krajowym jest jakby nieuświadomiona potrzeba pełnej synchronizacji działań pomiędzy właścicielami obiektów typowanych w ramach segmentu II w realizowanym projekcie „Rozpoznanie formacji i struktur …".
Takim typowym przykładem może być likwidacja otworu który mógłby służyć jako otwór monitorujący.

Czyli traktując działania na rzecz monitoringu rzetelnie, zawczasu należałoby narzucić pewne ograniczenia dotyczące własności i zagospodarowania na te obiekty, które znajdują się w kolejnych segmentach. Bowiem, ze względów formalnych nawet najbardziej wyrafinowany projekt monitoringu może okazać się papierowym, a nawet elektronicznym zbiorem komunałów.

W sytuacji braku wyraźnych uregulowań prawnych w aspekcie sekwestracji CO_2, najbezpieczniejszym sposobem monitorowania wydaje się być Surface Array Monitoring (**Fig. 1.1.18_205)**. Nie wymaga wcześniejszych danych, pierwszy pomiar traktuje jako dane dla modelu bazowego.

Fig. 1.1.18_205 Surface Array Monitoring

Proponowany scenariusz dla projektu monitoringu

Sejsmika 4D

Zapoznanie się z istniejącymi danymi geofizycznymi i geologicznymi oraz z modelem statycznym daje możliwość wstępnego określenia parametrów pomiaru monitorującego. Wg opracowania K. Sowiżdżał 2010, średnia porowatość na obiekcie Nosówka osiąga wartość 7 – 10%. Nasycenie wodą złożową jest na poziomie 30 – 40%.

Parametry akwizycji terenowej opisane w „Opracowaniu wyników badań sejsmicznych. Temat: Sędziszów – Bęździemyśl 3D, 1995 – Geofizyka Kraków, przedstawiają się następująco:

- długość rozstawu aktywnego: 3500 mm
- offset min.: 700 m
- offset maks.: 2730 m
- wielkość binu: 25 m
- linie wzbudzenia: kier. NW- SE
- linie obserwacji: kier. SW – NE
- całkowita powierzchnia ~ 154 km^2 (co skutkowało ilością 12 206 punktów wzbudzenia oraz 4620 punktami obserwacji).

Biorąc pod uwagę głębokość horyzontu docelowego, jaką dla utworów wizenu stanowi wartość głębokości ok. 3100 m przy występujących w części NE zdjęcia dość znacznych upadach rzędu 20 i więcej stopni, długość przyjętego w roku 1995 rozstawu maksymalnego nie była wystarczająca, gdyby ją rozważać w kategoriach typowego projektu sejsmiki 3D. Obserwacja ta znajduje potwierdzenie w obrazie zarejestrowanego obrazu falowego, zarówno na rekordach pojedynczych, jak i na sekcjach sumowanych (rozdz. III); zauważa się wyraźny zanik ciągłości granic głębokich z chwilą wejścia w obszar o większych upadach. Odbity promień sejsmiczny wychodzi poza obszar apertury.

Analizując parametry akwizycji przeprowadzonych badań sejsmicznych i zarejestrowany obraz falowy, łatwo przewidzieć, że w przypadku monitorowania sposobem sejsmiki 4D należy zaproponować wykonanie 3 projektów sejsmiki 3D:

- pierwszy – na etapie przedoperacyjnym
- drugi – wkrótce po rozpoczęciu zatłaczania
- trzeci – po określonym przez operatora obiektu czasie zatłaczania.

Wszystkie 3 projekty muszą być wykonane przy zastosowaniu identycznych warunków pomiaru, może nawet ze stabilizowanymi na stałe na pewien okres czasowy odbiornikami, najlepiej w technologii sejsmiki wielokomponentowe (3C). Przypuszczalna powierzchnia tego zdjęcia stanowi ok. ¼ powierzchni projektu Sędziszów – Będziemyśl, czyli ok. 40 km^2.

Zastosowane parametry akwizycji muszą być skorygowane w ten sposób, aby uwzględnić średnią głębokość zalegania warstwy zbiornikowej (kompleks węglanowy B) rzędu 3300 – 3600 m oraz jej miąższość rzędu 45 – 206 m.

Proponuje się więc zachowanie binu rzędu 25 m, ale zwiększenie offsetu maksymalnego do wartości 1,3 x $H_{maks.}$, czyli do wielkości 4680 m (już z uwzględnieniem upadu) i zwiększenie częstotliwości rezonansowej odbiorników do 30 Hz.
W powyższym przypadku szacunkowy koszt pierwszego, przedoperacyjnego projektu sejsmicznego wynosić będą 12 – 15 mln PLN (co należy na bieżąco sprawdzić z aktualnymi cennikami PGNiG). Kolejne projekty będą tańsze, ale nawet szacunkowe oceny nie są na razie dostępne, bo jak dotąd w Polsce nie wykonywano takich projektów.

W ocenie kosztów należałoby więc też wziąć pod uwagę wykonanie profilowań geofizycznych, chociażby w jednym odwiercie obiektu Nosówka. Całkowity koszt eksperymentu „Monitorowanie" w okresie jednego roku monitorowania stanowić może kwotę rzędu 25 – 30 mln PLN.Kosztochłonność to również element, który ma istotne znaczenie dla przychylenia się w stronę monitoringu mikrosejsmicznego.

Bardzo ważnym zagadnieniem w monitoringu metodą sejsmiki 4D jest rozdzielczość danych sejsmicznych oraz specjalistyczne przetwarzanie. Są to zagadnienia dobrze znane na poziomie ogólnym. Na poziomie szczegółowym należy podjąć działania wtedy, gdy podjęte zostaną konkretne decyzje. Tu tylko przypomnę, iż w poprzednim opracowaniu zwracałam uwagę na etap „Studium wykonalności" projektu sejsmiki 4D (bez względu na to, jakiemu celowi jest dedykowany).

Z artykułu Toma Davisa, który ukazał się w styczniu 2010 w „The Leading Edge" wynika, że korzystnie jest rozpocząć analizę warunków dla *time-lapse seismic* od wstępnej oceny przewidywanej w wyniku zatłaczania zmienności impedancji akustycznej.

I tak, np. przewidując że zastąpienie płuczki przez CO_2 wywoła zróżnicowanie impedancji o 10%, przekonano się, iż była to ocena przewyższona. W rzeczywistości zaobserwowano zmienność na poziomie 6-8%. Jak widać, praktyka monitoringu potwierdza tylko częściowo nasze prognozy, dotyczące dynamiki procesów fizycznych w ośrodku geologicznym i dlatego musi być prowadzona w integracji geologów, geofizyków oraz inżynierów złożowych.

Sejsmika pasywna

Rozważając ewentualność monitorowania metodą sejsmiki pasywnej zwrócić należy uwagę na prezentowaną na str. 45 „kompozycję" trzech różnych propozycji – otworowej, powierzchniowej i odbiorników pogrążonych.
Podstawowym etapem jest rozmieszczenie odbiorników. W przypadku tak głęboko zalegającej warstwy docelowej, jak na obiekcie Nosówka (H ~ 3600 m) dostateczna odległość między odbiornikami na powierzchni powinna być rzędu 50 m.

Ważne jest, aby zdawać sobie sprawę jakie zjawisko fizyczne wywołuje drgania, które chcemy obserwować i jaką wielkość obserwujemy.

Przesuwanie się frontu CO_2 wywołuje powstawanie mikroszczelin; te rozprzestrzeniając się i otwierając powodują mikrodrgania ośrodka i propagację fali sprężystej.

Jakie parametry propagującej fali możemy zarejestrować i ocenić? Podobnie jak w przypadku trzęsień ziemi mówimy o dwóch atrybutach mikrosejsmicznego pola falowego: o magnitudzie i o momencie sejsmicznym (wg Julie Shemeta, Paul Anderson: *It's a matter of size – magnitude and moment estimates for microseismic data* – ILT, 03.2010).

Dla określenia magnitudy najczęściej używa się definicji wg Skali Richtera

$$M_L = \log A - \log A_0$$

gdzie: A – amplituda maksymalna przypisana danemu zdarzeniu mierzona w mm przez sejsmograf

A_0 – poprawka „na odległość" właściwa dla danego rejonu geologicznego

Ch. Richter przypisał magnitudę 3 zdarzeniu, które zostało zapisane w odległości od źródła (ogniska) drgań 100 km z amplitudą 1 mm (przez sejsmograf Wooda Andersona).

Dla określenia momentu sejsmicznego M_0 który jest miarą siły (nie energii) wstrząsu, przyjmuje się poniższe relacje:

$$M_0 = \mu S d$$

gdzie: μ = moduł sztywności
S = powierzchnia odkształcenia
d = średnie przesunięcie.

Posługując się powyższymi relacjami, wyprowadzić można wiele modyfikacji obliczeń, wykorzystując zarówno fale podłużne, jak i poprzeczne.

Odnośnie monitorowania mikrosejsmicznego, można by skorzystać ewentualnie z doświadczeń Instytutu Geofizyki PAN w zakresie monitorowania kopalń węgla.

Na temat kosztów nie można się aktualnie wypowiedzieć. Znane są firmy zagraniczne, które wykonują usługi w tym zakresie, ale koszty są negocjowane dla konkretnych przypadków.

Podsumowanie

Jedyną sensowną drogą przygotowania środowiska polskich geologów i geofizyków do monitorowania procesu zatłaczania CO_2 do ośrodka geologicznego, czy to dla typowej sekwestracji, czy dla pełnej eksploatacji zasobów węglowodorów EOR, jest:

- wykonanie studium wykonalności dla określonego obiektu, poprzez
    - prowadzenie modelowania sejsmicznego uwzględniającego równanie Gassmanna, wyniki symulacji złożowej i modelowania geologicznego, jak też
    - ocenę zmienności pola falowego, jego atrybutów, impedancji akustycznej i elastycznej oraz parametrów AVO dla różnych scenariuszy zatłaczania CO_2. I to zarówno w sensie początkowych parametrów zatłaczania (ciśnienia), jak i ewentualnie chemizmu samego CO_2).

Bez pełnej integracji tych dziedzin kolejne etapy rozpracowywania „monitoringu" będą tylko mniej lub bardziej rozbudowanymi kompilacjami.

Podjęcie takiego zintegrowanego modelowania wymaga zarówno pieniędzy, jak i doskonale przygotowanego zespołu, jak i czasu. Nie mówiąc już o wytypowaniu konkretnego obiektu.

Projekt wiercenia i wyposażenia odwiertu Wilków 9I (AGH, PIG-PIB)

(Stanisław Nagy, Andrzej Gonet)

(Adam Wójcicki)

Cel wiercenia, lokalizacja i planowana głębokość otworu Wilków 9i

Cel – otwór iniekcyjny Wilków 9i do zatłaczania dwutlenku węgla.

Lokalizacja wiercenia: X(N)= 432183 m; Y(E)= 307203 m (Układ 1992).

Otwór obserwacyjny Wilków 9a. Lokalizacja wiercenia:

X(N)= 432103; Y(E)= 307203 (Układ 1992).

Otwory położone są w sąsiedztwie starego odwiertu Wilków 9 (z lat 1970-tych – X(N)= 432143; Y(E)= 307243) który nie nadaje się do wykorzystania i powinien być ponownie zacementowany.

Projektowana głębokość – 1561 m ± 10% (strop karbonu).

Na całej długości wierconego otworu dopuszcza się maksymalny kąt odchylenia od osi pionowej 1° przy czym maksymalny przyrost kąta odchylenia nie powinien przekraczać 1°/30 m. W czasie wiercenia należy wykonywać punktowo pomiary kąta odchylenia i azymutu inklinometrem wrzutowym co ok. 100 m oraz przed każdym wyciąganiem przewodu. Uwaga! W celu pomiaru azymutu należy w zestawie przewodu wiertniczego umieścić obciążnik niemagnetyczny. Profil otworu oraz zwiercalność skał w tabeli **1.1.18_19**.

Tab. 1.1.18_19 Przewidywany profil stratygraficzno-litologiczny otworów wraz z kategorią zwiercalności skał

Głębokość	Stratygrafia	Kategoria zwiercalności
0 – 278 m	czwartorzęd i trzeciorzęd – piaski, gliny, iły	kat. 1-2
- 308 m	wapień muszlowy środkowy – wapienie	kat. 3-4
- 483 m	wapień muszlowy dolny – wapienie, margle i dolomity	kat. 3-4
- 632 m	pstry piaskowiec górny – margle, iłowce i wapienie	kat. 3-4
- 896 m	pstry piaskowiec środkowy – piaskowce drobnoziarniste, wkładki iłowców	kat. 3-4
- 1210 m	pstry piaskowiec dolny – mułowce, iłowce	kat. 3-4
- 1235 m	cechsztyn Aller – iłowce z okruchami anhydrytu	kat. 3-4
- 1278 m	cechsztyn Leine – anhydryt biały	kat. 3-4
- 1280 m	cechsztyn Leine – szary ił solny	kat. 3-4
- 1304 m	cechsztyn Stassfurt – anhydryt biały	kat. 3-4
- 1327 m	cechsztyn Stassfurt – dolomit (główny) beżowy	kat. 3-4
- 1370 m	cechsztyn Werra – anhydryt (górny) biały	kat. 3-4
- 1468 m	cechsztyn Werra – sól najstarsza	kat. 3-4
- 1538 m	cechsztyn Werra – anhydryt (dolny) biały	kat. 3-4
- 1541 m	cechsztyn Werra – wapień (podstawowy) drobnokrystaliczny	kat. 3-4
- 1542 m	cechsztyn Werra – łupek czarny	kat. 3-4
- 1561 m	czerwony spągowiec – piaskowce drobno i średnioziarniste o spoiwie ilasto-wapiennym	kat. 3-4
	karbon	kat. 3-4

Zarurowanie i cementowanie otworów (**Tab. 1.1.18_20**)

Tab. 1.1.18_20 Zarurowanie i cementowanie otworu

Średnica rur	Średnica [mm]	Głębokość	Cementowanie
13 3/8''	438	0-280 m	Cementowane do wierzchu
9 5/8''	311	0-1210 m	Cementowane do wierzchu
7''	216	0-1542 m	Cementowane do wierzchu +paker zewn.
Liner 4 ½ '	149	0-1561 m	

Wszystkie horyzonty wodonośne powyżej powinny być zamknięte przed zakończeniem wiercenia. Proces cementowania powinien być przeprowadzony w sposób uniemożliwiający przepływ CO2 poza rurami do izolowanych horyzontów, zarówno po rozpoczęciu wiercenia jak i w długim okresie po zakończeniu zatłaczania.

Przewidywane występowanie horyzontów

W utworach czwartorzędu i trzeciorzędu przewiduje się występowanie wód gruntowych oraz horyzontów nasyconych wodami słodkimi.

W utworach triasu przewiduje się występowanie horyzontów nasyconych wodami słonawymi i solankami.

W utworach czerwonego spągowca występują horyzonty nasycone solankami o bardzo dużym stężeniu oraz węglowodorami (gazem ziemnym).

Przewidywane występowanie gazów toksycznych

W profilu projektowanego otworu nie przewiduje się występowania gazów toksycznych.

Przewidywane gradienty ciśnienia złożowego w profilu projektowanego otworu

W projektowanym profilu otworu przewiduje się występowania gradientów ciśnienia złożowego w zakresie: 0,09-0,11 MPa/10 m.

Przewidywane gradienty ciśnienia szczelinowania w profilu projektowanego otworu

W profilu otworu przewiduje się następujących występowanie gradientów ciśnienia szczelinowania:

w interwale 0-120 m - 0,170-0,200 MPa/10 m.

w interwale 120-1561 m - 0,180-0,240 MPa/10 m.

Przewidywane właściwości zbiornikowe oraz gradienty ciśnień złożowych i szczelinowania warstw chłonnych w profilu otworu przedstawiono w **Tab.1.1.18_21**.

Tab. 1.1.18_21 Przewidywane właściwości zbiornikowe oraz gradienty ciśnień złożowych i szczelinowania warstw chłonnych

Poziom zbiornikowy	Porowatość (%)	Przepuszczalność (mD)	Gradient ciśnienia	
			Złożowego (MPa/10m)	Szczelinowania (MPa/10m)
czerwony spągowiec	**10 – 20**	**40 – 60**	**0,11**	**0,18 – 0,22**

Przewidywane trudności w czasie wiercenia

W trakcie przewiercania klastycznych utworów czwartorzędu i trzeciorzędu przewiduje się możliwość obsypywania, kawernowania i zaciskania ściany otworu.

W trakcie przewiercania klastycznych utworów pstrego piaskowca przewiduje się możliwość zaników płuczki w poziomach piaskowcowych o dobrych parametrach zbiornikowych.

Projektowane pobieranie prób okruchowych

Projektuje się pobierać próbki okruchowe w interwałach nie rdzeniowanych co 10 m, a od głębokości 500 m co 5 m. W zakresie głębokości ok. 632-1561 m, w przypadku niemożności pobrania rdzenia w jakimkolwiek odcinku, należy pobierać próby okruchowe z tych odcinków co 3 m. Z każdej głębokości należy pobrać: próbkę 500 g, nieprzemytą i wysuszoną. W całym profilu otworu należy pobierać co 30 m 2 próbki po 100 g, przemyte i wysuszone do badań geochemicznych. Próby okruchowe powinny być przechowywane w odpowiednio przygotowanych skrzynkach. Skrzynki powinny być opisane czytelnie i trwale na boku, wierzchu i szczycie. Każda skrzynka powinna zawierać nazwę otworu oraz interwał z którego pobrano próby okruchowe. Zarówno na wiertni jak i podczas transportu, skrzynki muszą być przykryte wieczkami.

Projektowane rdzeniowanie

Projektuje się rdzeniowanie w następujący sposób interwałów:

Rdzeniowanie ciągłe:

- poziom uszczelniający (cechsztyn Werra – anhydryty i sole)

- poziom zbiornikowy (czerwony spągowiec)

Rdzenie powinny być układane do znormalizowanych (o długości 1 m) pojedynczych lub podwójnych skrzynek, przestrzegając ułożenia rdzenia „góra-dół". Skrzynki powinny być opisane czytelnie i trwale na boku, wierzchu i szczycie. Opis powinien zawierać numer i nazwę otworu, numer kolejny skrzynki, numer marszu, głębokość (od-do). Rdzeń kruchy, niewypełniający skrzynki, należy unieruchomić przegródkami o opisanych głębokościach. Zarówno na wiertni jak i podczas transportu, skrzynki muszą być przykryte wieczkami.

Uwaga: Przewiduje się możliwość zmiany zakresu rdzeniowania w zależności od faktycznie przewiercanego profilu geologicznego i facjalnego rozwoju warstw oraz bieżących ustaleń z osobami nadzoru prac geologicznych i autorami projektu.

Przekazanie i przechowywanie rdzeni wiertniczych oraz prób okruchowych

Rdzenie wiertnicze oraz próby okruchowe powinny zostać zabezpieczone i przekazane odpowiedniemu organowi administracji geologicznej zgodnie z:

- art. 45. Prawa geologicznego i górniczego z 4 lutego 1994 r.

- art. 1. Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 19 grudnia 2001 r. w sprawie sposobu i zakresu wykonywania obowiązku udostępniania i przekazywania informacji oraz próbek organom administracji geologicznej przez wykonawcę prac geologicznych

- art. 2, 3, 4, 6 Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 19 grudnia 2001 r. w sprawie gromadzenia i udostępniania próbek i dokumentacji geologicznych.

Po zakończeniu wiercenia skrzynki z pozyskanym rdzeniem wiertniczym oraz próbami okruchowymi zostaną przewiezione do magazynu rdzeni Państwowego Instytutu Geologicznego lub innego wskazanego przez Ministra Środowiska.

Zakres badań laboratoryjnych:

- powierzchniowe zdjęcia gazowe oraz monitoring środowiska naturalnego w strefie odwiertu przed rozpoczęciem i po ukończeniu wiercenia

- badania własności fizycznych i chemicznych próbek rdzeni

- analizy mikrofaunistyczne, w utworach karbonu również makroflorystyczne, miosporowe oraz makrofunistyczne
- analizy petrograficzne
- analizy wód złożowych
- analizy płuczki i płynów porównawczych
- badanie parametrów zaczynu i kamienia cementowego.

Analizy petrograficzne, analizy geochemiczne, analizy mikrofaustyczne, inne badania rdzeni i kamienia cementowego poddanego oddziaływaniu CO2 powinny zostać wykonane po pobraniu rdzeni; analizy wód złożowych powinny zostać wykonane bezzwłocznie po oczyszczeniu odwiertu zgodnie z wytycznymi zawartymi w pracy „Zasady i metodyka dokumentowania zasobów wód termalnych i energii, 1997”.

Zakres badań geofizycznych

ODC. I - w interwale 0-1210 m przed zapuszczeniem kolumny rur 9 5/8”

profilowanie średnicy – XYC

profilowanie krzywizny - DEV

profilowanie oporności

profilowanie akustyczne - BSC

profilowanie gęstości - CDL

profilowanie gamma - GR

profilowanie porowatości neutronowej - CNT

profilowania - DIL + LL3 + PS

obliczenie objętości otworu pod rury 13 3/8”

ODC. II - w interwale 1210-1542 m przed zapuszczeniem kolumny rur 7”

profilowanie średnicy - XYC

profilowanie krzywizny - DEV

profilowanie oporności - DLL + PS, MSFL

profilowanie gęstości - CDL

profilowanie gamma - GR

profilowanie porowatości neutronowej - CNT

cementomierz akustyczny w rurach 9 5/8” - RBT

obliczenie objętości otworu pod rury 7”

ODC. III - w interwale 1542 -1561 m przy głębokości końcowej otworu

profilowanie gamma spektrometryczne - SCR

profilowanie średnicy profilowanie krzywizny - DEV

profilowanie akustyczne - BCS

profilowanie gęstości profilowanie gamma - GR

profilowanie - DLL + PS, HRAI + PS

profilowanie porowatości neutronowej - CNT

profilowanie temperatury - BHTP

cementomierz akustyczny w rurach 7''

profilowanie gamma - GR

opcjonalnie: profilowanie neutron -gamma spektrometryczne SGR

opcjonalnie: rezonans magnetyczny MRL

opcjonalnie: dipolowa sonda akustyczna z orientacją przestrzenną

opcjonalnie: skaner opornościowy ultradźwiękowy XRMI

opcjonalnie: skaner akustyczny Borhole Telev.

próbniki (typu RTF lub MFT) (dla określenia zmienności poziomej i pionowej przepuszczalności, ciśnienia złożowego oraz poboru próbek wody złożowej m.in. do badań RSA)

Po osiągnięciu głębokości końcowej i wykonaniu końcowych pomiarów geofizycznych przewiduje się opcjonalnie wykonanie pomiarów sejsmometrycznych „time lapse" VSP.

Końcowa średnica otworu

Końcowa średnica otworu wynosić będzie 149 mm.

Przewidywane opróbowania w czasie i po ukończeniu wiercenia

Opcjonalnie przewiduje się badania mikroszczelinowania (minifrac) dla warstwy zatłaczającej CO2 i uszczelnienia

Przewiduje się badania próbnikiem typu RST – celem poboru wody do analizy RSA oraz innych analiz, określenie ciśnienia porowego i zgrubną estymację przepuszczalności pionowej i poziomej

W przypadku stwierdzenia dobrej przepuszczalności warstwy chłonnej i jej stabilnej budowy otwór nie musi być poszerzany ani filtrowany.

Udostępnione poziomy przewiduje się opróbować próbnikami złoża.

Zakres głębokościowy pracy laboratorium kontrolno - pomiarowego

Projektuje się pracę laboratorium kontrolno-pomiarowego w interwale od ok. 1210 m (rozpoczęcie wiercenia) pod butem rur 9 5/8" do końcowej głębokości otworu.

Szczegółowy projekt konstrukcji otworu

Przyjmuje się, że kolektorami, do których może być zatłaczane CO2 są utwory czerwonego spągowca (dolny perm) zbudowane z drobno- i średnioziarnistych piaskowców położonych w głębokości od 1542 m do 1561 m p.p.t.

Mając na względzie bezpieczeństwo planowanych prac i rejonu zaprojektowano otwór, którego konstrukcja powinna być szczelna i wytrzymała przez bardzo długi okres czasu przy równoczesnym zapewnieniu skutecznego wtłaczania CO_2 otworem Wilków 9i w dolnopermski kolektor charakteryzujący się porowatością w granicach 10 – 20% i przepuszczalnością od 40 do 60 mD. Otwór obserwacyjny Wilków 9a ma analogiczną konstrukcję.

Po przygotowaniu terenu wiertni i kolaudacji należy wykonać otwór świdrem o średnicy 17 ¼”(438 mm) i zapuścić do otworu kolumnę wstępną o średnicy 13 3/8” najlepiej do warstwy ilastej położonej na głębokości 6–12 m (czwartorzęd i strop jego podłoża). Wskazane jest ją zacementować do wierzchu i po stójce na związanie zaczynu dalsze wiercenie otworu wskazane jest realizować stosując świder o średnicy 12 ¼ ”. Po dowierceniu do głębokości 650 m tj. po przewierceniu nasunięcia karpackiego zakłada się zapuszczenie do otworu kolumny rur okładzinowych o średnicy 9 5/8” i zacementowanie jej do wierzchu.

Kolejna średnica świdra powinna wynosić 8 ½ ” i otwór należy wiercić do osiągnięcia głębokości 1542 m. W ten odcinek otworu zaleca się zapuścić kolumnę rur okładzinowych 7” z pakerem zewnętrznym i uszczelnić ją na całej długości zaczynem cementowym. Do zasadniczych warstw, w które może być wtłaczany CO_2 w otworze Wilków 9i, do głębokości 1461 m ppt (spąg kolektora) trzeba dowiercić otwór świdrem o średnicy 6 ¼” (159 mm) i/lub aparatem rdzeniowym oraz zapuścić do otworu kolumnę rur traconych szlicowanych o średnicy 4 1/2”. Ze względu na możliwy kontakt tej kolumny rur z CO_2 zaleca się, aby była ona odporna na CO_2. To samo dotyczy zaczynu uszczelniającego. Ponadto dla poprawienia szczelności układu otwór zatłaczający – górotwór kolumna rur musi być w paker zewnętrzny odporny na CO_2, a kolumnę rur okładzinowych należy zacementować do wierzchu.

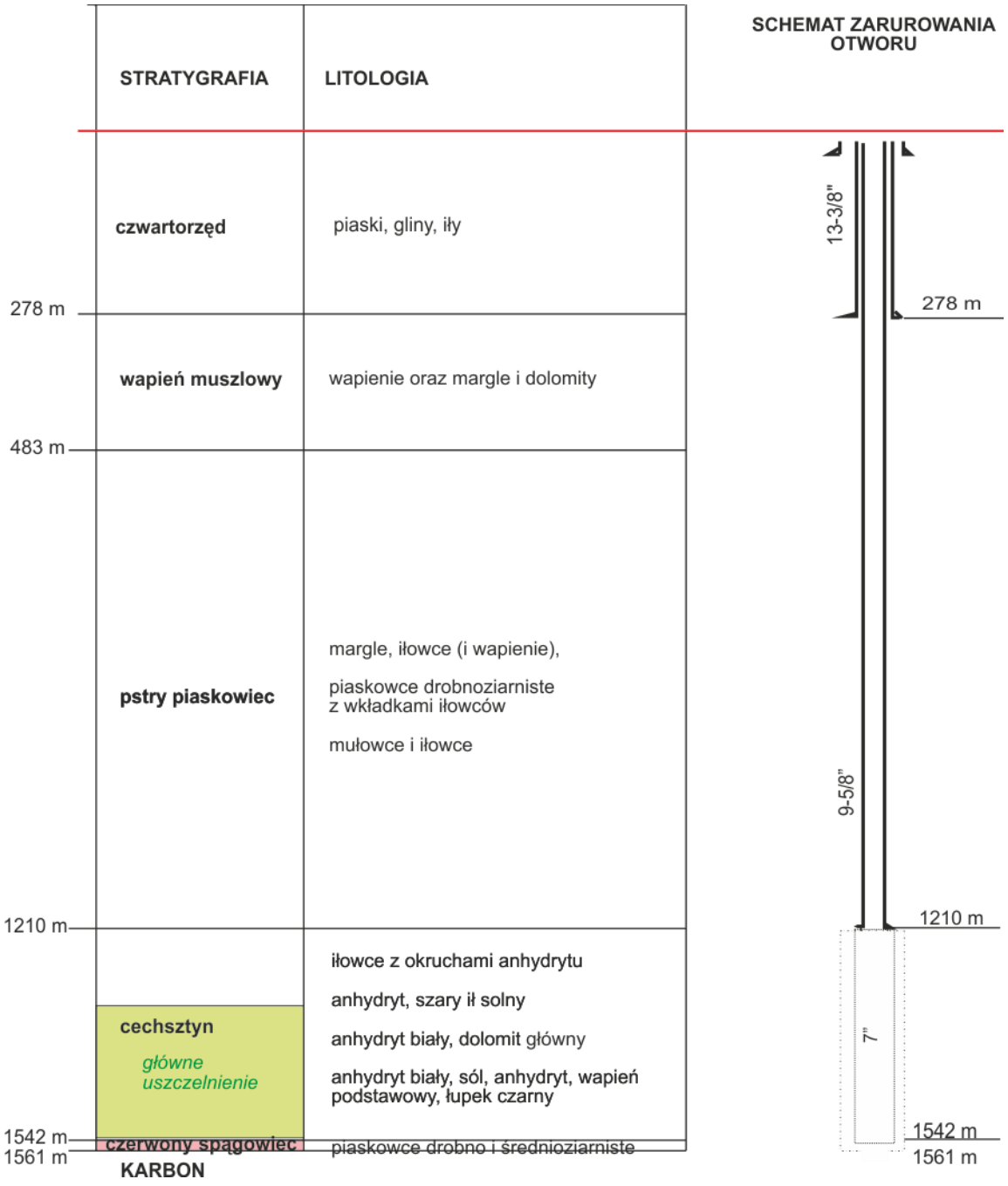


Fig. 1.1.18_206 Schemat zarurowania i uzbrojenia wgłębnego odwiertów

Ponadto w zależności od rozpoznania górotworu otworem badawczym zasadnicze warstwy izolacyjne i chłonne mogą być rdzeniowane. Na podstawie aktualnego rozpoznania geologiczno-złożowego sugeruje się, że priorytet w zatłaczaniu CO_2 powinna mieć formacja czerwonego spągowca.

Schemat konstrukcji dla otworu do zatłaczania przedstawiono na **Fig. 1.1.18_206**.

Do właściwego zrealizowania otworu konieczne jest odpowiednie dobranie płuczki. Stąd na podstawie rozeznania rejonu wierceń proponuje się zastosowanie płuczek o poniższych parametrach w wyróżnionych interwałach.

Podstawowe parametry płuczki:

Interwał 0 – 1210 m / płuczka bentonitowa /

gęstość 1,05 – 1,15 g/cm^3

filtracja poniżej 20 ml/0,7 MPa/30 min.

lepkość plastyczna możliwie niska

granica płynięcia 12 -15 Pa

pH 9,0 -11,0

Interwał 1210 – 1542 m płuczka polimerowo – potasowa

gęstość 1,10 - 1,20 g/cm^3

filtracja poniżej 6 ml/0,7 MPa/30 min

lepkość plastyczna: możliwie niska

granica płynięcia 7-14 Pa (w temperaturze 50 ^{0}C)

K^+ około 60 g/l KCL (25-30 g/l K^+)

pH 7,5-9,0

Interwał 1542 – 1561 m płuczka polimerowo-potasowa z blokatorami

gęstość: 1,05 - 1,10g/cm^3

filtracja API: do uzyskania filtracji HTHP

filtracja HTHP: pon.10 ml/30 min. (90 ^{0}C,ciśn. różnicowe 35 at)

lepkość plastyczna: możliwie niska

K^+ około 60 g/l KCL (25-30 g/l K^+)

granica płynięcia: 9 – 11 Pa

blokator węglanowy 60-100 kg/m^3

pH: 8,5 – 10,0

Interwał 0 - 1210 m płuczka bentonitowa

Receptura płuczki:

Bentopol - 50 kg/m^3

NaOH - 2 kg/m^3

CMC LV - 8 kg/m^3

Detergent W - 2 kg/m^3

$NaHCO_3$ - wg.potrzeb

Gips - wg.potrzeb

Interwał 1210 – 1542 m płuczka polimerowo-potasowa

Receptura płuczki:

KCL - 60 kg/m^3

PHPA - 4 kg/m^3

NaOH - 2 kg/m^3

CMC LV - 10 kg/m^3

Skrobia - 10 kg/m^3

PAA - 3 kg/m^3

PAC - w miarę potrzeb

Detergent W - w miarę potrzeb

Biostat - w miarę potrzeb

Blokator węgl. - przy wystąpieniu zaników płuczki

CMC HV - w miarę potrzeb

$NaHCO_3$ - „

Na_2CO_3 - „

XCD - „

Defpol - w miarę potrzeb

Interwał 1542 – 1561m płuczka polimerowa-potasowa z blokatorami

Receptura płuczki:

KCl - 60 kg/m^3

NaOH - 2 kg/m^3

Filter-chek - 20 kg/m^3

XCD - 2 kg/m^3

PAC - 3 kg/m^3

Blokator - do uzyskania ciężaru

Blokator organiczny – wg. potrzeb

Odpieniacz - w miarę potrzeb

Biocyd - wg.potrzeb

Polimer HPHT - 3 kg/m^3

Również ważnym czynnikiem prac wiertniczych jest dobór odpowiednich zaczynów uszczelniających. Na obecnym poziomie rozpoznania problemu dla otworu Iskrzyczyn 1 proponuje się receptury zaczynów podane poniżej.

Rury 9 5/8" (0 – 650 m cdw.) Cementowanie przez przewód wiertniczy.

Przed zaczynem wtłoczyć przemywkę ilości około 5 m^3

SKŁAD ZACZYNU CEMENTOWEGO:

Cement wiertniczy G - 100%

CaCl2 - 3%

PSP 061 - 0,3%

Gęstość zaczynu – 1,8 g/cm3 w/c – 0,5

Wytrzymałość kamienia cem. około – 10 MPa

Rury 7" (0 – 1040 m cdw.) Cementowanie jednostopniowe z użyciem dwóch klocków cementacyjnych.

Przed zaczynem wtłoczyć przemywkę w ilości około 6 m^3

SKŁAD ZACZYNU CEMENTOWEGO ODPORNEGO NA KOROZJĘ CO2:

CO2 R MIX* - 100%

KCl - 3%

PSP 031 - 0,17%

PSP 042 - 0,17%

PSP 061 - 0,4%

Gęstość zaczynu – 1,86 g/cm3 w/c – 0,5

Wytrzymałość kamienia cementowego około – 15 MPa

*) CO2 R MIX – mieszanina uszczelniająca odporna na korozję CO2

Program monitoringu zawartości dwutlenku węgla w powietrzu podglebowym oraz biomonitoringu na obszarze złoża Wilków oraz złoża Nosówka (IGSMiE)

(Barbara Uliasz-Misiak, Radosław Tarkowski, Wiesław Sroczyński, Lidia Dziewińska, Magdalena Wdowin, Katarzyna Luboń)

Realizowane w ramach zadania **1.1.18** prace IGSMiE PAN w II półroczu 2010 roku dotyczyły opracowania programu monitoringu w zakresie badań zawartości dwutlenku węgla w powietrzu podglebowym, pomiarów strumienia tego gazu oraz biomonitoringu na obszarze złoża Wilków oraz złoża Nosówka. 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 dotychczasowe doświadczenia i wyniki badań wykonanych przez Zakład Geotechnologii IGSMiE PAN w ramach prac statutowych i projektów badawczych, jak również na podstawie dostępnej literatury.

Powietrze i mikroorganizmy glebowe

Ogólna charakterystyka powietrza glebowego

Gleba, jako ożywiony układ trójfazowy, jest złożonym utworem, który stwarza doskonałe środowisko bytowania faunie glebowej, mikroorganizmom i roślinom. Dwutlenek węgla stanowi część fazy gazowej, czyli część tak zwanego powietrza glebowego. Skład powietrza glebowego, jego wymiana pomiędzy atmosferą a glebą oraz transport w samej glebie, jego wpływ na system korzeniowy roślin oraz na procesy biologiczne i chemiczne w glebie zaliczane są do grupy zagadnień określanych pod pojęciem „aeracji gleb" lub „natlenienia gleb" (Kowalik, Stepniewski 1976; Armstrong 1979).

Podstawowe składniki powietrza glebowego (N_2, O_2, CO_2, H_2O para) występują zarówno w fazie gazowej jak i ciekłej gleby (w porach wypełnionych powietrzem i wodą), a ich prężność w fazie gazowej zależy od temperatury i ciśnienia atmosferycznego (Stępniewska i in., 2004). Skład powietrza glebowego podlega nieustannym zmianom, jest on bowiem warunkowany efektem biologicznych i chemicznych procesów zachodzących w glebie. Pochłanianie i wydzielanie gazów uzależnione jest od aktywności biologicznej mikroorganizmów glebowych i korzeni roślin oraz od procesów fizycznych transportu gazów, których wartość wypadkowa wyznacza stan aerobiozy (Tretyn, 1998; Marscher, 1986).

Masa organiczna w glebie zawiera kilkakrotnie więcej węgla niż znajduje się go w atmosferze (Post i in. 1982). Dlatego nawet niewielkie ilości węgla uwolnione z gleb zwiększają koncentracje CO_2 w powietrzu (Jenkinson 1991). W atmosferze CO_2 stanowi niewielki ułamek całej masy gazów, natomiast powietrzu glebowym jest go kilkakrotnie więcej (**Tab. 1.1.18_23**), czasami może dochodzić do 2%, a na polach ryżowych nawet do 21% (Dobrzański 1993; Kędziora 1995, Boroń 1983).

Tab. 1.1.18_23 Główne składniki powietrza atmosferycznego w troposferze oraz powietrza glebowego (Boroń 1983; Kędziora 1995)

Składnik powietrza	**Powietrze atmosferyczne (%)**	**Powietrze glebowe (%)**
Tlen	20,94	10,4-20,7
Azot	78,08	70,8-80,24
Dwutlenek węgla	0,03	0,15-0,65

Podstawowe znaczenie dla składu powietrza glebowego mają przemiany tlenu i dwutlenku węgla. Tlen głównie jest pobierany w procesie oddychania (respiracji) przez aeroby obecne w tym środowisku, może być również wydzielany np. przez organizmy asymilujące dwutlenek węgla (glony, sinice). Dwutlenek węgla, obok dominującego procesu jego wydzielania (produkt dekarboksylacji i mineralizacji substancji organicznej) może podlegać również asymilacji przez autotrofy, a także niektóre heterotrofy glebowe. Poza wymienionymi procesami biologicznymi, tlen i dwutlenek węgla mogą również wchodzić w reakcje chemiczne z mineralnymi i organicznymi składnikami gleby (rozkład węglanów, utlenianie zredukowanych form żelaza, manganu itp.) (Stępniewska i in. 2004).

Ilość powietrza glebowego, a w nim CO_2, zależy od: struktury, porowatości i wilgotności gleby, wahań temperatury, oddychania korzeni itp. (Dobrzański, Zawadzki 1993). Źródłem CO_2 w powietrzu glebowym jest oddychanie mikroorganizmów rozkładających substancje organiczną oraz oddychanie korzeni roślin (Radecki-Pawlik, Boroń 1998). W stabilnych ekosystemach i niezmiennych warunkach środowiskowych ilość wydzielanego CO_2 wykazuje stan równowagi, która może być zachwiana w wyniku działania pewnych czynników oraz procesów powodujących nadmierne uwalnianie węgla organicznego i wydzielanie go do atmosfery w postaci dwutlenku węgla. Do procesów tych można zaliczyć (Falkowska, Korzeniewski 1998):

- rozkład tlenowy materii organicznej: $C_6H_{10}O_5 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 5H_2O$,
- rozkład beztlenowy materii organicznej: $C_6H_{10}O_5 + H_2O \rightarrow 3CH_4 + 3CO_2$,
- rozkład mocznika: $CO(NH_2)_2 + 2H_2O \rightarrow (NH_4)2CO_3 \rightarrow 2NH_3 + CO_2 + H_2O$ (Kowalik 2001),
- amonifikacje: $CH_2NH_2COOH + 1{,}5O_2 \rightarrow NH_3 + 2CO_2 + H_2O$ (Buresh, Patrick 1978),
- denitryfikacje: $5(CH_2O) + 4NO_3^- + 4H^+ \rightarrow 5CO_2 + 2N_2 + 7H_2O$

Równowagę tę łatwo naruszyć poprzez antropogeniczne działania, takie jak: zmiany użytkowania terenu, wylesianie, działalność rolnicza itp. (Rogalski i in. 2004).

Ilość dwutlenku węgla w glebie zmienia się dynamicznie, podobnie jak zawartość tlenu; przy dobrym przewietrzaniu jest w przybliżeniu równa ubytkowi tlenu, z reguły nie przekracza kilku procent objętościowych powietrza glebowego, nawet na głębokości kilku metrów. W glebach o wysokim poziomie wody gruntowej stężenie CO_2 często osiąga maksimum w środkowej części profilu. Maksymalne stężenie dwutlenku węgla w powietrzu glebowym występuje w okresach zwiększonego uwilgotnienia i

podwyższonej temperatury gleby. Koncentracja dwutlenku węgla zależy od nawodnienia, obecności szaty roślinnej, nawożenia świeżym materiałem roślinnym, stosowaniem obornika, ścieków oraz gnojowicy (Gliński, Stępniewski 1985; Stępniewska i in. 2004).

Wymiana gazowa obejmuje dopływ do gleby tlenu z powietrza atmosferycznego oraz odprowadzenie wytworzonego w niej dwutlenku węgla. Od ciągłości tej wymiany i jej intensywności uzależniony jest skład chemiczny powietrza glebowego i stopień natlenienia korzeni roślin. Wymiana gazowa w glebie następuje w wyniku działania wielu czynników, z których najważniejsza jest dyfuzja stężeniowa. Przepływ powietrza występuje przede wszystkim w warstwie powierzchniowej gleby. W warstwach głębszych, począwszy od 5 cm, przepływ gazu jest nieznaczny i może w ogóle nie zachodzić, co powodować może gromadzenie się np. CO_2. Należy zaznaczyć, że intensywność przepływu gazów związana jest z różnicami ciśnień, spowodowanych różnicami temperatur, zmianami ciśnienia atmosferycznego, nasileniem wiatru, wsiąkaniem wody opadowej, wahaniami zwierciadła wody gruntowej itp. Jednakże głównym mechanizmem wymiany gazów w glebie jest dyfuzja, która powoduje około 90% całkowitej wymiany gazowej. Dyfuzja jest również jedynym sposobem przemieszczania się gazów w fazie ciekłej wokół korzeni i wewnątrz nasyconych wodą agregatów glebowych.

W naturalnych systemach ekologicznych, w przypadku, gdy nie ma emisji tego gazu z głębszych warstw Ziemi koncentracja w powietrzu podglebowym i strumień dwutlenku węgla zależy głównie od fotosyntezy, oddychania korzeni, rozkładu substancji organicznej, odgazowywania wód podziemnych i wymiany z atmosferą (**Fig. 1.1.18_207**).

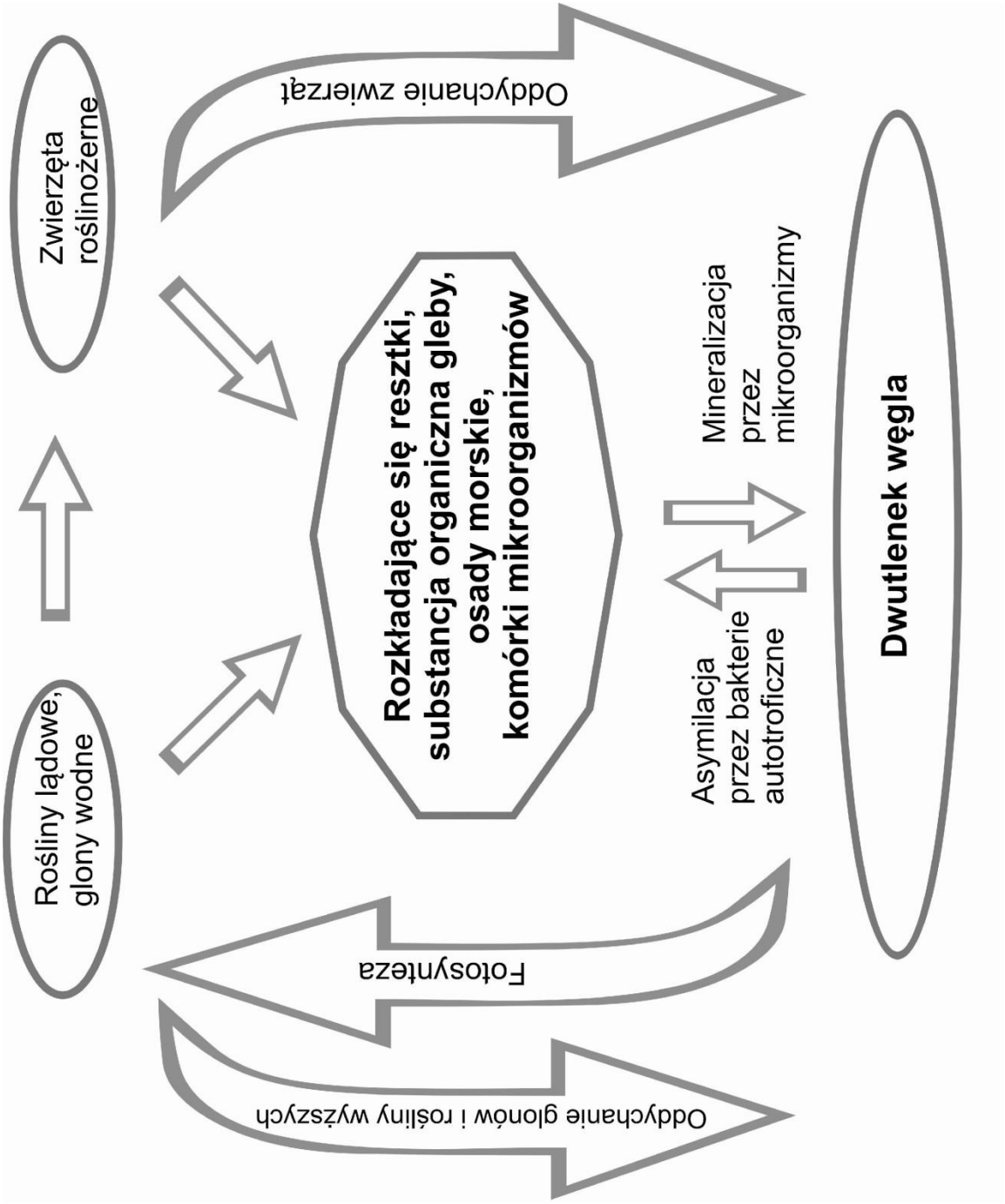


Fig. 1.1.18_207 Udział mikroorganizmów w przemianach materii organicznej - obieg węgla (Kołwzan i in., 2005)

Ogólna charakterystyka mikroorganizmów glebowych

W skład gleby wchodzą cząstki stałe mineralne i organiczne, powietrze i roztwór glebowy oraz mikroorganizmy (edafon). Mikroorganizmy bytujące w glebie to grzyby, jednokomórkowce roślinne i zwierzęce, rośliny naczyniowe i bezkręgowce. Edafon może stanowić od 1 do 10% suchej masy substancji organicznej gleby. Organizmy żywe żyjące w glebie ze względu na wielkość możemy podzielić na trzy grupy (Kołwzan i in. 2005):

- mikrobiota (niedostrzegalne gołym okiem) – wirusy, bakterie, grzyby, glony i pierwotniaki,
- mezobiota (0,2-2 mm) – wazonkowce, nicienie, owady bezskrzydłe, wije, roztocza i inne, małe rośliny,
- makrobiota (> 2mm) – dżdżownice, gryzonie, większe owady, korzenie roślin i drzew.

Podstawową masę mikroorganizmów glebowych stanowią bakterie, które charakteryzują się wysoką aktywnością metaboliczną. Większość bakterii wykazuje adhezję do cząstek mineralnych gleby i koloidów glebowych.

Liczebność bakterii w glebie jest różna i waha się od kilku milionów do kilku miliardów komórek na 1 gram gleby. Najwięcej bakterii znajduje się w warstwie gleby uprawnej do głębokości 30 cm. W głębszych warstwach szybko spada.

Zespoły drobnoustrojów występujące w glebach są na ogół złożonymi zbiorami populacji różnych gatunków, których różnorodność jest olbrzymia. Przypuszcza się, że tylko w glebie leśnej jest dużo większa liczba gatunków bakterii niż można wyizolować za pomocą hodowli w warunkach laboratoryjnych. Torsvic i in. (1990) na podstawie analizy DNA w próbek gleby wykazali, że w glebie może być około 4000 do 7000 genotypów należących do różnych organizmów prokariotycznych. Na podstawie innych badań, stwierdzono że w środowisku glebowym może znajdować się nawet 12000 do 18000 różnych gatunków bakterii. Obliczenia innych autorów wskazują na występowanie w biosferze 40 000, a nawet 2 do 3 milionów różnych gatunków bakterii (Trevors i in. 1995; Tunlid i in. 1991). Należy przypuszczać, że w środowisku glebowym wśród tak wielkiej bioróżnorodności mikroorganizmów znajdą się zawsze jakieś drobnoustroje, które są przystosowane do specyficznych warunków panujących w mikroniszach ekologicznych. Dwutlenek węgla, jako gaz naturalnie występujący w środowisku glebowym wpłynął na ewolucję drobnoustrojów w taki sposób, że na pewno znajdują się w niej takie, które są przystosowane do egzystencji w obecności tego gazu w podwyższonej ilości, a nawet mogą go koniecznie wymagać do prawidłowego wzrostu i rozwoju.

Migracja CO_2 do górnych przypowierzchniowych warstw gleby może powodować widoczne zmiany w biocenozie glebowej. Normalna zawartość CO_2 w warstwie gleby ornej waha się w granicach od 0,05 do 0,3 % (De Jong i in. 1972, 1974). Liczne badania wskazują, że organizmy glebowe w bardzo małym stopniu reagują na zmiany zawartości CO_2 w glebie (Fireston, Chapin 1999; Gołębiowska, Pędziwilk 1984; Sadowsky, Schortemeyer 1997; Weyman-Kaczmarkowa, Głuchowska 2004). Należy wspomnieć, że gleba jest naturalnym środowiskiem występowania różnych grup systematycznych drobnoustrojów, których biomasa w warstwie ornej może wynosić 5-15 ton/ha. Środowisko glebowe sprzyja ich rozwojowi, bowiem posiada wszystkie niezbędne warunki dla ich prawidłowego życia i rozwoju. Jednakże ich biomasa i skład gatunkowy uzależniony jest od wielu czynników natury fizycznej, chemicznej i biologicznej, a w szczególności od składników pokarmowych, szaty roślinnej, stosunków wodno-powietrznych, klimatu, odczyn gleby itp., które wywierają decydujący wpływ na dynamikę rozwoju mikroorganizmów w glebie i ich aktywność biochemiczną (Aleksander 1975; Badura 2002). Cała ta masa żywych organizmów stanowi olbrzymi,

niezwykle czynny pod względem metabolicznym mechanizm, przerabiający ogromne ilości rozmaitych substancji organicznych i związków mineralnych oraz wzbogacających gleby w węgiel, azot, substancje wzrostowe, substancje antybiotyczne i inne.

Przegląd prac prowadzonych w zakresie geochemicznego powierzchniowego monitoringu CO_2

Proces geologicznego składowania CO_2 niesie za sobą różnego rodzaju zagrożenia dla ludzi i środowiska w skali globalnej lub lokalnej. Wymaga on kontroli przy pomocy monitoringu, poczynając od momentu wyboru miejsca składowania, kończąc na monitoringu po zakończeniu procesu i zamknięciu składowiska. Monitoring geologicznego składowania CO_2 jest podstawą dla pomyślnego przeprowadzenia całego zabiegu. Celem monitoringu podziemnego składowania CO_2 jest śledzenie rozprzestrzeniania się CO_2 pod ziemią, kontrola czy otwory w trakcie zatłaczania i po jego zakończeniu nie wykazują nieszczelności, weryfikacja ilości dwutlenku węgla zatłoczonego pod ziemię, jak również kontrola parametrów związanych z zatłaczaniem. Dodatkowe cele to kontrola jakości wód podziemnych, ekosystemów i bezpieczeństwa ludzi na terenach potencjalnie narażonych na wyciek CO_2 z miejsca składowania i inne.

Wymogi związane z prowadzeniem monitoringu geologicznego składowania CO_2 na wszystkich etapach użytkowania składowiska, są zawarte w Dyrektywie Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie geologicznego składowania dwutlenku węgla (Dyrektywa..., 2008). Przedstawione są w niej cele monitoringu składowania CO_2: porównanie faktycznego i modelowanego zachowania gazu w składowisku, wykrycie migracji, wykrycie wycieku, wykrycie niekorzystnego wpływu na otaczające środowisko, populacje ludzkie lub użytkowników otaczającej biosfery, ocena skuteczności działań korygujących oraz ocena, czy składowany CO_2 zostanie związany w pełni i na stałe. W Załączniku II Dyrektywy zawarte są kryteria do opracowania i aktualizacji planu monitoringu. Powinien on zawierać szczegółowe ustalenia dotyczące monitoringu prowadzonego w czasie głównych etapów składowania: monitorowanie poziomu odniesienia, w czasie eksploatacji i po zamknięciu składowiska. Dla każdego z etapów należy określić: monitorowane parametry, zastosowaną technologię monitorowania i uzasadnienie wyboru technologii, monitorowane punkty i uzasadnienie wyboru prób, częstotliwość realizacji i uzasadnienie wyboru prób.

W monitoringu geologicznego składowania dwutlenku węgla stosowane są różne metody geofizyczne, geochemiczne, mikrobiologiczne i inne. Przedstawiony w opracowaniu program monitoringu obejmuje część dotyczącą geochemicznych pomiarów powierzchniowych stężenia i strumienia CO_2 oraz badań mikrobiologicznych.

Badania koncentracji i przepływu dwutlenku węgla w powietrzu podglebowym, oprócz monitoringu geologicznego składowania CO_2, prowadzone są w różnych celach: monitorowania zawartości dwutlenku węgla w powietrzu glebowym w rejonach wulkanicznych, przy poszukiwaniach zasobów geotermalnych, prowadzeniu racjonalnej gospodarki szczawami oraz określenia ewentualnego zagrożenia, jakie dwutlenek węgla może stanowić dla ludzi.

Na obszarze Polski takie badania były prowadzone w obszarach występowania szczaw i naturalnych źródeł CO_2 (Sudety, Karpaty - rejon Krynicy) (Ciężkowski i in. 2002; Żak i in. 2008). W latach 1999-2001 w rejonie likwidowanych kopalń węgla kamiennego w Wałbrzyskim Zagłębiu Węglowym prowadzono pomiary koncentracji CO_2 w powietrzu podglebowym (Kotarba red. 2002). W ramach prac statutowych w Zakładzie Geotechnologii IGSMiE PAN, w latach 2005-2008 prowadzono badania koncentracji dwutlenku węgla w powietrzu podglebowym na obszarze złoża Jastrząbka Stara koło Tarnowa, które zostało wybrane na miejsce podziemnego zatłaczania dwutlenku węgla (Tarkowski i in. 2008a).

Powierzchniowe pomiary geochemiczne strumienia i koncentracji dwutlenku węgla zostały również uwzględnione w monitoringu geologicznego składowania dwutlenku węgla w projektach Weyburn, RECOPOL, MOVECBM, CO2SINK, In-Salah i projektu Frio.

Badania mikrobiologiczne związane z monitoringiem mikrobiologicznym składowania dwutlenku węgla przeprowadzono na terenie występowania wycieków dwutlenku węgla na obszarze Muszyny i Złockiego oraz w ramach projektu CO2SINK w rejonie Ketzin. Badania na obszarze Muszyny miały na celu zidentyfikowanie drobnoustrojów żyjących na terenie mofety H. Świdzińskiego (Rajchel L. i Rajchel J., 2006) oraz w badania mikroflory w glebach z obszaru Muszyny i Złockiego (Uliasz-Misiak red., 2006; Tarkowski i in. 2008b). W ramach projektu CO2SINK opracowywano i testowano wykorzystanie mikroorganizmów wskaźnikowych do wykrywania zwiększonego stężenia CO_2 w glebie.

Badania koncentracji CO_2 w powietrzu podglebowym i strumienia tego gazu do wykrywania systemów geotermalnych

Badania koncentracji CO_2 w powietrzu glebowym i strumienia tego gazu zaproponowano do wykrywania systemów geotermalnych, które nie manifestują się na powierzchni (Lewicki, Oldenburg 2005). Emisji względnie słabo rozpuszczalnych gazów (CO_2, He, CH_4) może być jednym z pierwszych sygnałów istnienia takich zasobów. Stwierdzenie na jakimś terenie anomalnie wysokiej emisji tych gazów może być ważnym narzędziem przydatnym do wykrycia nowych zasobów (Klusman i in. 2000).

Zaproponowano wykrywanie i monitoring CO_2 w strefie podglebowej w celu znalezienia systemów geotermalnych ze względu na to, że CO_2 jest głównym gazem nieulegającym kondensacji w systemie geotermalnym (Ellis, Mahon 1977). Dwutlenek węgla jest średnio rozpuszczalny w wodzie, dlatego większość CO_2 pochodzącego ze źródeł wulkaniczno-hydrotermalnych migrującego w strefy przypowierzchniowe jest w fazie gazowej, mniejsza część jest rozpuszczona w wodach podziemnych (Cruz i in. 1999; Favara i in. 2001; Evans i in. 2002).

Do wykrywania systemów geotermalnych zaproponowano zastosowanie dostępnych technik monitoringu, analizy statystycznej i modelowania. Do detekcji podwyższonej zawartości dwutlenku węgla w strefie przypowierzchniowej zaproponowano punktowe pomiary strumienia i koncentracji dwutlenku węgla przy wykorzystaniu przenośnych mierników IRGA oraz komór akumulacyjnych. Szczególną uwagę należy zwrócić na przepływ gazu w strefach o wysokiej przepuszczalności, takich jak uskoki i szczeliny. Należy również zbadać przestrzenną i czasową zmienność strumienia i koncentracji dwutlenku węgla. Do wykrycia istnienia anomalii związanej z systemem geotermalnym wykorzystana została analiza statystyczna Bayesian. Do mapowania przestrzennego rozkładu stężenia dwutlenku węgla zostanie zastosowana metoda geostatystyczna (Lewicki, Oldenburg 2004).

Badania monitoringowe strumienia powierzchniowego i koncentracji CO_2 w powietrzu podglebowym w projektach składowania

Badania koncentracji CO_2 w powietrzu glebowym oraz strumienia tego gazu w celu wykrycia jego wycieku ze składowiska prowadzone są w monitoringu geologicznego składowania dwutlenku węgla. Badania takie realizowano w ramach projektów Frio (USA) i In Salah (Algieria).

Badania w projekcie Frio

Projekt Frio miał na celu zademonstrowanie, że dwutlenek węgla może być bezpiecznie zatłaczany do poziomów wodonośnych. Był to projekt pilotowy, zlokalizowany w Teksasie (w pobliżu Dayton) na obszarze złoża ropy naftowej. W 2004 roku zatłoczono około 3800 ton dwutlenku węgla na głębokość 1500 m do formacji piaskowcowej Frio.

W ramach badań wykonanych w tym projekcie przeprowadzono prace związane z monitoringiem i weryfikacją składowania dwutlenku węgla. Istotnym ich elementem były badania powierzchniowe i przypowierzchniowe pod kątem identyfikacji ewentualnych wycieków CO_2 z miejsca składowania. Przeprowadzono badania terenowe i laboratoryjne składu płytkich wód, gazów rozpuszczonych w tych wodach i powietrza glebowego. Wykonano badania hydrogeochemiczne płytkiego poziomu wodonośnego, zalegającego powyżej formacji do składowania dwutlenku węgla. Pomiary te wykonano miernikami polowymi w 4 otworach o głębokości około 28,96 m każdy oraz rurki z absorpcją kapilarną (*capillary absorption tubes - CATs*). Powietrze glebowe badano przy wykorzystaniu (Nance i in. 2005):

- strzykawek do iniekcji płytkich (podskórnych) (*hypodermic syringe)* w czterech około 13 metrowych, uszczelnionych, suchych otworach wykonanych w strefie aeracji,
- CAT umieszczonych w 40 aluminiowych rurowych instalacjach o głębokości od 0.3 do 1 metra,
- przenośnych komór akumulacyjnych.

Zastosowano cztery metody monitoringu powierzchniowego i przypowierzchniowego w celu monitorowania strefy aeracji i saturacji (**Fig. 1.1.18_208**):

Otwory do monitoringu wód podziemnych (głębokość około 28,96 m); zlokalizowano je w uwzględniając gradient hydrauliczny ruchu wód w badanym poziomie wodonośnym. Otwory są zarurowane 4” rurami PCV zakończonymi 3,05 m gruboziarnistym filtrem instalowanym na głębokości 25,91-28,96 m. Na rurach umieszczony jest nakładka (kapturek) z zaworem umożliwiającym usuwanie drobnych cząsteczek. Rury wystają około 0,6 m ponad powierzchnię terenu, zakończone są kapturkiem z PCV. W kapturkach zacementowany jest *rubber scepta*, który pozwala na dostęp do rur, w których zamontowane są strzykawki do iniekcji i stalowy haczyk do zawieszania urządzenia CAT. Betonowa podkładka jest zainstalowana na orurowaniu.Zamykający kapturek stalowy jest zainstalowany w betonie. Instalacja jest zaprojektowana tak, aby izolować środowisko otworu od atmosfery.

Monitoring gazów w glebie i atmosferyczny obejmujący obszar o promieniu około 400 m wokół otworu zatłaczającego, okolicznych otworów i struktur tektonicznych potencjalnych miejsc wycieku dwutlenku węgla. Gazy w glebie były monitorowane stalowymi rurkami z odpinanymi głowicami penetrometru,

zapuszczanymi do głębokości 1 metra. Instalacje CATs są umieszczone w otworach monitorujących w celu poboru wskaźników obecnych w glebie. Niektóre z otworów monitorujących są wyposażone w mierniki atmosferyczne. Dwa profile głębokościowe (0-2 m) składu powietrza podglebowego zostały zlokalizowane przy otworze zatłaczającym. Łącznie 62 CATs są okresowo zmieniane w tym samym i próbki atmosfery są pobierane. Próbki pobrano na tydzień przed rozpoczęciem zatłaczania w celu określenia tła i tydzień po rozpoczęciu zatłaczania. Po zakończeniu zatłaczania próbki będą pobierane w okresach od 1,5 do 3 miesięcy.

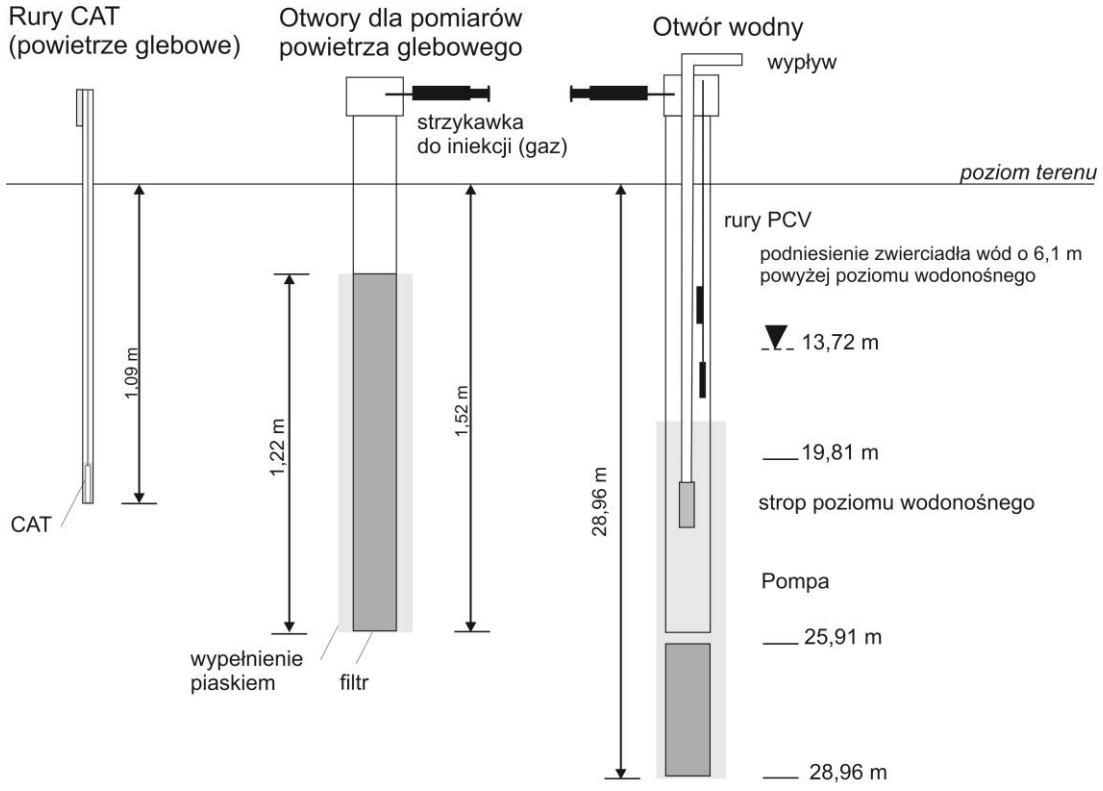


Fig. 1.1.18_208 Instalacje płytkiego monitoringu w projekcie Frio (Nance i in., 2005)

Płytkie otwory (2 m) do poboru próbek powietrza glebowego wykonane w strefie aeracji. Każdy otwór jest orurowany 4” rurami PCV filtrem o długości 1,22 m w dolnej części. Orurowanie wystawało około 0,92 m powyżej poziomu terenu i było zabezpieczone betonową osłoną. Orurowanie jest wyposażone w kapturek PCV, do którego były zacementowane gumowe scepta umożliwiające dostęp do przestrzeni w rurach z podskórną strzykawką.

Badania dyfuzji gazów z gruntu do atmosfery. Do poboru i analizy gazów zastosowano komorę (pleksiglas) o powierzchni 1 m^2 uszczelnioną glebą. Badania wykonano w 22 punktach pomiarowych, w każdej lokalizacji w wykonano 3 pomiary strumienia dwutlenku węgla. W trakcie badań przy użyciu komór pomierzono również strumień CH_4. W każdej lokalizacji wykonano profil stężenia CO_2 i CH_4 do głębokości 1 metra. Pomiary te przeprowadzono przed zatłaczaniem w lutym 2004 oraz po zatłaczaniu w lutym 2005 r.

Próbki powietrza glebowego były pobierane okresowo, część prób była analizowana w terenie (wody podziemne) pozostałe w laboratorium (wody podziemne i atmosfera). Pobór prób był wykonywany raz na miesiąc. Pomiary gazów glebowych w otworach były wykonywane przy wykorzystaniu strzykawek iniekcyjnych. Instalacje CAT są wydobywane z aluminiowych rur i wysyłane do odpowiednich laboratoriów, a na ich miejsce są instalowane nowe instalacje CAT.

Badania w projekcie In Salah

In Salah jest przemysłowym projektem składowania dwutlenku węgla zlokalizowanym na złożu gazu ziemnego Krechba w centralnej Algierii. Wydobywany gaz ziemny zawiera zbyt duże ilości CO_2 od 5 do 10%, musi być on usunięty przed sprzedażą tego gazu. Dwutlenek węgla jest zatłaczany od 2004 roku do poziomu wodonośnego podścielającego złoże gazu na głębokość około 1900 metrów. Do końca 2008 roku zatłoczono około 2,5 mln ton CO_2, przewiduje się, że podczas realizacji całego projektu zostanie zatłoczone około 17 mln ton dwutlenku węgla. Projekt In Salah został wybrany przez *Carbon Sequestration Leadership Forum* (*CSLF*) jako jedno z trzech miejsc na świecie, gdzie w skali przemysłowej prowadzone są prace dotyczące monitoringu i weryfikacji geologicznego składowania dwutlenku węgla. W ramach tego projektu prowadzony jest intensywny monitoring składowania dwutlenku węgla, w tym badania geologiczne, geochemiczne, geofizyczne i satelitarne (Mathieson i in. 2010).

W celu wykrywania wycieków powierzchniowych zastosowano pomiary koncentracji dwutlenku węgla w powietrzu glebowym i strumienia tego gazu oraz badania mikrobiologiczne. Pomiary stężenia i koncentracji dwutlenku węgla przeprowadzono dwukrotnie przed zatłaczaniem w 2004 roku, powtórzono je w 2009 roku. Próbki do badań mikrobiologicznych pobrano w 2009 roku (Mathieson i in. 2010).

Program monitoringu powierzchniowego CO_2 dla składowiska na złożu Wilków

Jednym z elementów monitoringu geologicznego składowania dwutlenku węgla są badania powierzchniowe. W ich zakres wchodzą 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_2 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 wskazywał 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 włączając w to 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 składowania dwutlenku węgla na składowisku w obszarze proponuje się wykonanie następujących badań geochemicznych:
- szczegółowe zdjęcie geochemiczne zawartości dwutlenku węgla na terenie składowiska na obszarze złoża Wilków,
- powierzchniowe badania geochemiczne zawartości CO_2 w pobliżu otworu zatłaczającego,
- sezonowe powierzchniowe badania geochemiczne zawartości CO_2 na terenie składowiska na obszarze złoża Wilków,
- badania geochemiczne rozkładu stężeń CO_2 do głębokości 5 m w wybranych punktach,
- ciągłe pomiary zawartości CO_2 w powietrzu podglebowym w zastabilizowanych punktach pomiarowych.

Na etapie monitorowania poziomu odniesienia badania te mają na celu ustalenie tła zawartości CO_2 w powietrzu podglebowym oraz jego zmian sezonowych i rozkładu głębokościowego dla składowiska na obszarze złoża Wilków. Posłużą 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 zostało wytypowane na obszarze złoże gazu ziemnego Wilków. Złoże to odkryto w 1979 r. w utworach czerwonego spągowca, jego zasoby bilansowe wynoszą 4244 mln Nm^3. Obszar położenia struktury Wilków znajduje się na monoklinie przedsudeckiej w obrębie depresji

zielonogórskiej ograniczonej od północy wyniesieniem wolsztyńskim, a od południa blokiem przedsudeckim.

Złoże gazu ziemnego Wilków jest złożem związanym z przystropową partią piaszczystych utworów czerwonego spągowca (P_1). W utworach P_1 struktura zamknięta jest izobatą -1575 m, a w poziomie partii środkowego pstrego piaskowca (T_{p2}) –600 m (**Fig. 1.1.18_209**). Ekran dla górnej granicy złoża stanowi wapień podstawowy wraz z poziomem łupków miedzionośnych oraz utwory anhydrytowo-solne cyklotemu Werra.

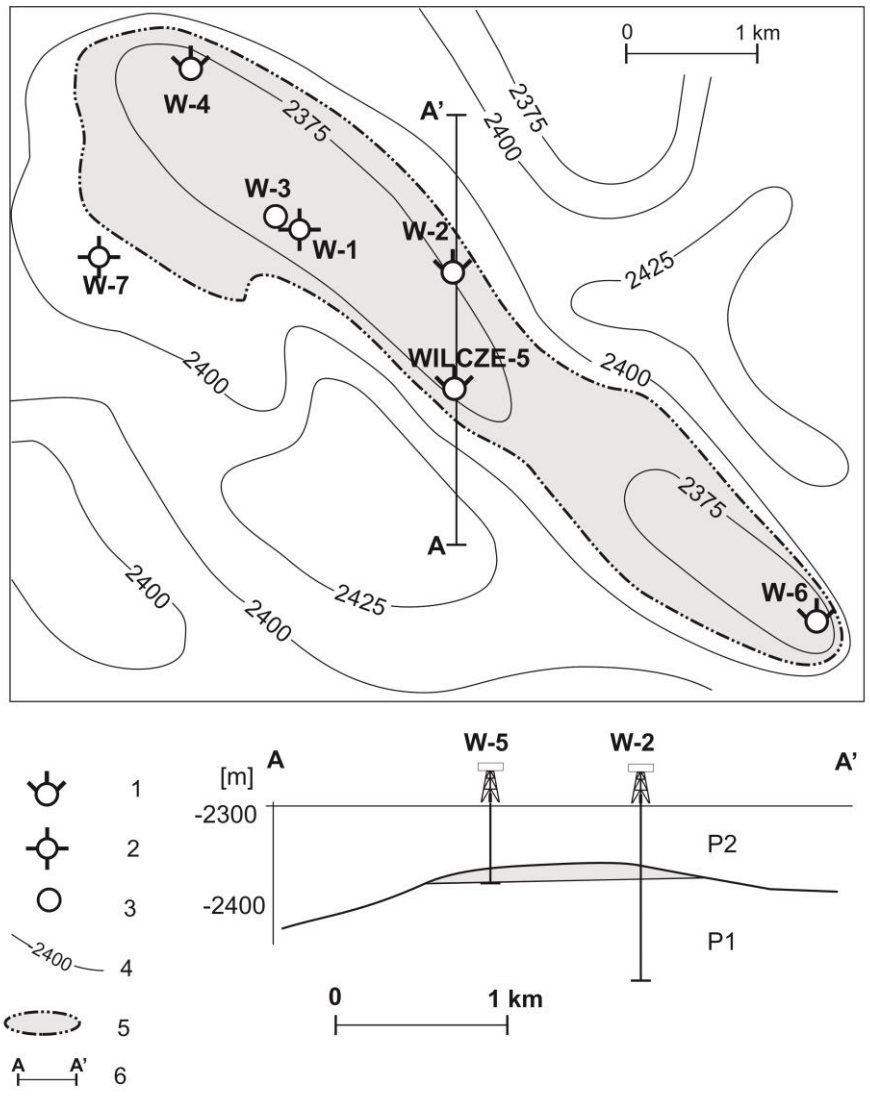


Fig. 1.1.18_209 Mapa i przekrój przez złoże gazu ziemnego Wilków; 1 – otwory eksploatacyjne, 2 – otwory negatywne, 3 – izolinie stropu złoża, 4 – zarys złoża, 5 – linia przekroju geologicznego (Karnkowski, 1999)

W roku 1979 wykonano otwory Wilków 1-4, 6-7, 9-10, 1980 roku otwory Wilków 5, 8 i 11. Ogółem do roku 1981 odwiercono w rejonie złoża 11 otworów. W latach 1986-1988 zrealizowano 21 otworów eksploatacyjnych o numerach od Wilków 21 do Wilków 41, z tego 17 włączono do eksploatacji. W latach 1990 i 1991 odwiercono 2 otwory rozpoznawcze Wilków 12 i Wilków 13 położone pomiędzy złożami gazu ziemnego Wilków i Szlichtyngowa. Ogółem dla rozpoznania i udostępnienia złoża odwiercono 34 otwory o przeciętnej głębokości około 1650 m, z czego w 26 uzyskano przemysłowe przypływy gazu ziemnego.

Utwory czerwonego spągowca na strukturze Wilków charakteryzują się jednorodnym wykształceniem litologicznym oraz własnościami zbiornikowymi. Maksymalna miąższość złoża wynosi 107,9 m. Na podstawie badań laboratoryjnych określono własności skały zbiornikowej P_1 w części serii gazonośnej (przerdzeniowanej). Średnia arytmetyczna porowatość wynosi 15,27%, oznaczona ważoną interwałami przerdzeniowanymi w poszczególnych otworach 14,96%, określona na podstawie badań geofizyki wiertniczej średnia ważona porowatość 15,97%. Średnia przepuszczalność dla całego złoża wynosi 66,75 mD. Temperatura złoża wynosi 326,58^{o}K (Opracowanie... 2010).

Nad utworami uszczelniającymi cechsztynu zalegają utwory triasowe: pstrego piaskowca oraz wapienia muszlowego dolnego i środkowego. Na wapieniu muszlowym zalegają niezgodnie osady trzecio- i czwartorzędowe.

W obrazie sejsmicznym struktura Wilków przedstawiona, jako wydłużone wyniesienie o kierunku NWW-SEE. Składa się ona z kilku kulminacji, różnie interpretowanych. Kulminacja np. obejmująca wiercenia Wilków 12 i 13 w dokumentacjach złożowych przyjmowana jest jako E część zasadniczej struktury Wilków, natomiast w dokumentacjach sejsmicznych włączona jest do struktury Szlichtyngowa. Wykonana interpretacja elementów litologicznych oraz tektonicznych (Opracowanie... 2010) istotnie wzbogaciła zakres informacji przedstawianych w standardowych dokumentacjach sejsmicznych. Nieregularnie rozmieszczone i miejscami zuskokowane formacje skalne poziomów zbiornikowych oraz warstw izolująco-uszczelniających nadkładu tworzą niejednorodną strukturę potencjalnego zbiornika. Gaz wykazuje wyraźną dominację azotu (60,38%), jest pozbawiony siarkowodoru zawiera hel 0,25%.

Metodyka pomiarów zawartości CO_2 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 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. Część 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_2 będą rozmieszczone w siatce podstawowej 200 x 200 m. Obszar składowiska, na którym wykonywane będą pomiary koncentracji CO_2 w powietrzu glebowym jest zlokalizowany w okolicach i ma powierzchnię około 7,5 km^2. Na obszarze tym przewidziano 237 podstawowych punktów pomiarowych (**Fig. 1.1.18_210**, **Tab. 1.1.18_24**).

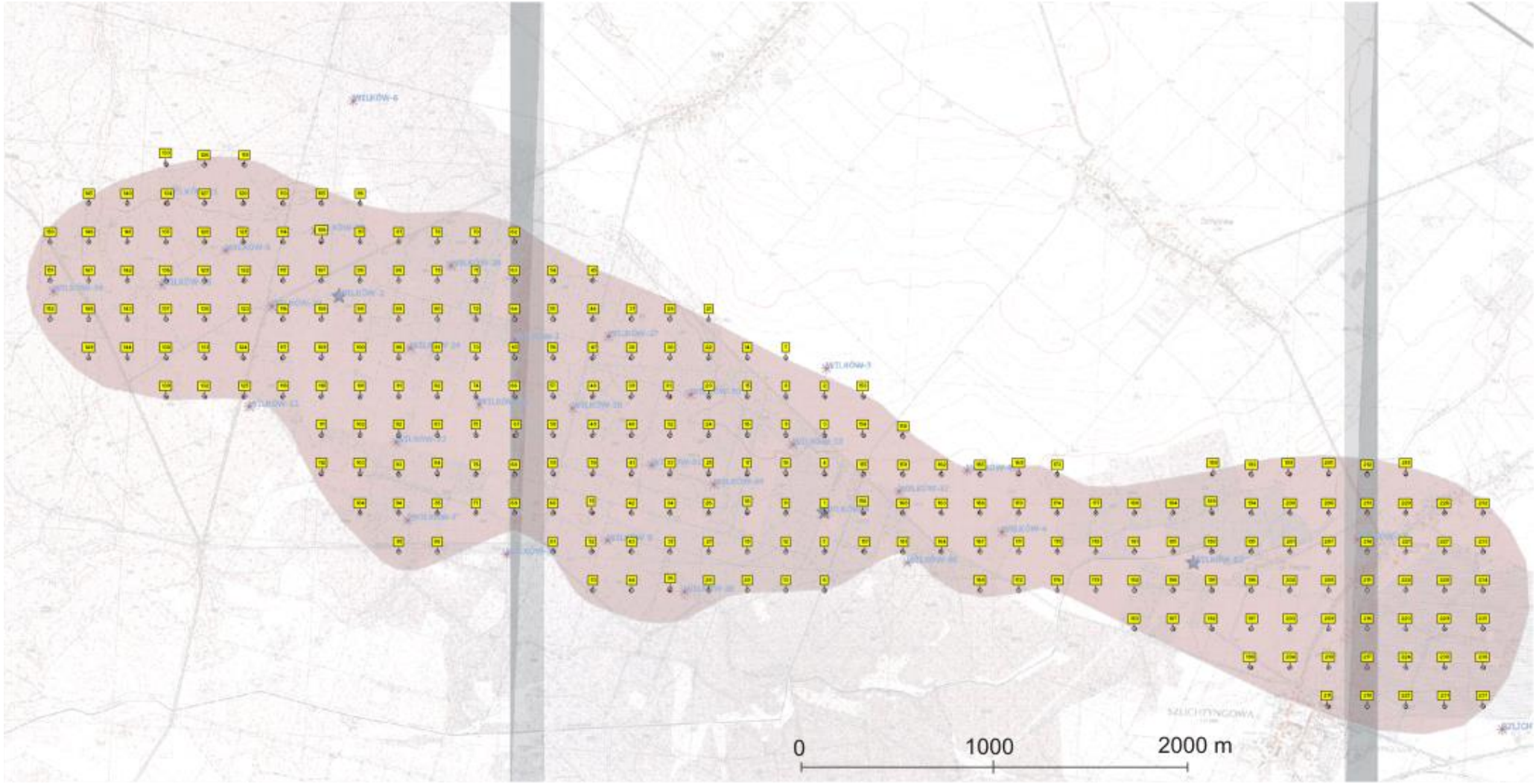


Fig. 1.1.18_210 Lokalizacja punktów pomiarowych zawartości dwutlenku węgla w powietrzu podglebowym na składowisku na obszarze złoża Wilków

Tab. 1.1.18_24 Lokalizacja punktów pomiarowych zdjęcia geochemicznego zawartości CO_2 w powietrzu podglebowym na składowisku na obszarze złoża Wilków

Punkt pomiarowy	Współrzędne geograficzne	
	Długość	**Szerokość**
1	51°43'22,256"	16°12'22,968"
2	51°43'37,693"	16°12'22,968"
3	51°43'32,574"	16°12'22,968"
4	51°43'27,458"	16°12'22,968"
5	51°43'17,141"	16°12'22,968"
6	51°43'12,022"	16°12'22,968"
7	51°43'42,892"	16°12'12,334"
8	51°43'37,776"	16°12'12,510"
9	51°43'32,574"	16°12'12,334"
10	51°43'27,458"	16°12'12,334"
11	51°43'22,256"	16°12'12,334"
12	51°43'17,141"	16°12'12,334"
13	51°43'11,939"	16°12'12,334"
14	51°43'42,892"	16°12'01,876"
15	51°43'37,776"	16°12'01,876"
16	51°43'32,574"	16°12'01,876"
17	51°43'27,458"	16°12'01,876"
18	51°43'22,343"	16°12'01,876"
19	51°43'17,141"	16°12'01,876"
20	51°43'12,022"	16°12'01,876"
21	51°43'48,011"	16°11'51,418"
22	51°43'42,892"	16°11'51,418"
23	51°43'37,693"	16°11'51,418"
24	51°43'32,574"	16°11'51,418"
25	51°43'27,458"	16°11'51,418"
26	51°43'22,256"	16°11'51,418"
27	51°43'17,141"	16°11'51,418"
28	51°43'11,939"	16°11'51,418"
29	51°43'48,011"	16°11'40,960"
30	51°43'42,892"	16°11'40,960"
31	51°43'37,693"	16°11'40,960"
32	51°43'32,574"	16°11'40,960"
33	51°43'27,458"	16°11'40,960"
34	51°43'22,256"	16°11'40,960"
35	51°43'17,141"	16°11'40,960"
36	51°43'12,108"	16°11'40,960"
37	51°43'48,094"	16°11'30,329"

38	51°43'42,892"	16°11'30,329"
39	51°43'37,776"	16°11'30,329"
40	51°43'32,574"	16°11'30,329"
41	51°43'27,458"	16°11'30,329"
42	51°43'22,256"	16°11'30,329"
43	51°43'17,141"	16°11'30,329"
44	51°43'11,939"	16°11'30,329"
45	51°43'53,126"	16°11'19,871"
46	51°43'48,094"	16°11'19,871"
47	51°43'42,892"	16°11'19,871"
48	51°43'37,862"	16°11'19,871"
49	51°43'32,574"	16°11'19,871"
50	51°43'27,545"	16°11'19,871"
51	51°43'22,343"	16°11'19,871"
52	51°43'17,141"	16°11'19,871"
53	51°43'12,022"	16°11'19,871"
54	51°43'53,126"	16°11'09,240"
55	51°43'48,011"	16°11'09,240"
56	51°43'42,892"	16°11'09,240"
57	51°43'37,693"	16°11'09,240"
58	51°43'32,574"	16°11'09,240"
59	51°43'27,458"	16°11'09,240"
60	51°43'22,256"	16°11'09,240"
61	51°43'17,141"	16°11'09,240"
62	51°43'58,328"	16°10'58,782"
63	51°43'53,126"	16°10'58,782"
64	51°43'48,011"	16°10'58,782"
65	51°43'42,892"	16°10'58,782"
66	51°43'37,776"	16°10'58,782"
67	51°43'32,574"	16°10'58,782"
68	51°43'27,372"	16°10'58,782"
69	51°43'22,256"	16°10'58,782"
70	51°43'58,328"	16°10'48,324"
71	51°43'53,213"	16°10'48,324"
72	51°43'48,094"	16°10'48,324"
73	51°43'42,892"	16°10'48,324"
74	51°43'37,693"	16°10'48,324"
75	51°43'32,660"	16°10'48,324"
76	51°43'27,372"	16°10'48,324"
77	51°43'22,256"	16°10'48,324"
78	51°43'58,328"	16°10'37,690"

79	51°43'53,213"	16°10'37,690"
80	51°43'48,094"	16°10'37,690"
81	51°43'42,892"	16°10'37,690"
82	51°43'37,693"	16°10'37,690"
83	51°43'32,574"	16°10'37,690"
84	51°43'27,458"	16°10'37,690"
85	51°43'22,256"	16°10'37,690"
86	51°43'17,141"	16°10'37,690"
87	51°43'58,328"	16°10'27,232"
88	51°43'53,126"	16°10'27,232"
89	51°43'48,011"	16°10'27,232"
90	51°43'42,892"	16°10'27,232"
91	51°43'37,776"	16°10'27,232"
92	51°43'32,574"	16°10'27,232"
93	51°43'27,372"	16°10'27,232"
94	51°43'22,256"	16°10'27,232"
95	51°43'17,141"	16°10'27,232"
96	51°44'03,444"	16°10'16,601"
97	51°43'58,328"	16°10'16,601"
98	51°43'53,213"	16°10'16,601"
99	51°43'48,094"	16°10'16,601"
100	51°43'42,978"	16°10'16,601"
101	51°43'37,693"	16°10'16,601"
102	51°43'32,574"	16°10'16,601"
103	51°43'27,458"	16°10'16,601"
104	51°43'22,170"	16°10'16,601"
105	51°44'03,444"	16°10'06,143"
106	51°43'58,415"	16°10'06,143"
107	51°43'53,213"	16°10'06,143"
108	51°43'48,094"	16°10'06,143"
109	51°43'42,892"	16°10'06,143"
110	51°43'37,776"	16°10'06,143"
111	51°43'32,574"	16°10'06,143"
112	51°43'27,458"	16°10'06,143"
113	51°44'03,444"	16°09'55,685"
114	51°43'58,328"	16°09'55,685"
115	51°43'53,126"	16°09'55,685"
116	51°43'48,011"	16°09'55,685"
117	51°43'42,892"	16°09'55,685"
118	51°43'37,693"	16°09'55,685"
119	51°44'08,560"	16°09'45,227"

120	51°44'03,444"	16°09'45,227"
121	51°43'58,328"	16°09'45,227"
122	51°43'53,213"	16°09'45,227"
123	51°43'48,011"	16°09'45,227"
124	51°43'42,892"	16°09'45,227"
125	51°43'37,693"	16°09'45,227"
126	51°44'08,56°"	16°09'34,596"
127	51°44'03,444"	16°09'34,596"
128	51°43'58,328"	16°09'34,596"
129	51°43'53,213"	16°09'34,596"
130	51°43'48,011"	16°09'34,596"
131	51°43'42,892"	16°09'34,596"
132	51°43'37,693"	16°09'34,596"
133	51°44'08,646"	16°09'24,138"
134	51°44'03,444"	16°09'24,138"
135	51°43'58,328"	16°09'24,138"
136	51°43'53,126"	16°09'24,138"
137	51°43'48,011"	16°09'24,138"
138	51°43'42,809"	16°09'24,138"
139	51°43'37,776"	16°09'24,138"
140	51°44'03,444"	16°09'13,504"
141	51°43'58,328"	16°09'13,504"
142	51°43'53,213"	16°09'13,504"
143	51°43'48,011"	16°09'13,504"
144	51°43'42,892"	16°09'13,504"
145	51°44'03,444"	16°09'03,046"
146	51°43'58,328"	16°09'03,046"
147	51°43'53,126"	16°09'03,046"
148	51°43'48,011"	16°09'03,046"
149	51°43'42,892"	16°09'03,046"
150	51°43'58,328"	16°08'52,588"
151	51°43'53,213"	16°08'52,588"
152	51°43'48,011"	16°08'52,588"
153	51°43'37,693"	16°12'33,426"
154	51°43'32,574"	16°12'33,426"
155	51°43'27,372"	16°12'33,426"
156	51°43'22,343"	16°12'33,426"
157	51°43'17,054"	16°12'33,426"
158	51°43'32,491"	16°12'44,057"
159	51°43'27,372"	16°12'44,057"
160	51°43'22,17"	16°12'44,057"

161	51°43'17,141"	16°12'44,057"
162	51°43'27,372"	16°12'54,515"
163	51°43'22,256"	16°12'54,515"
164	51°43'17,054"	16°12'54,515"
165	51°43'27,372"	16°13'04,973"
166	51°43'22,256"	16°13'04,973"
167	51°43'17,141"	16°13'04,973"
168	51°43'11,939"	16°13'04,973"
169	51°43'27,458"	16°13'15,604"
170	51°43'22,256"	16°13'15,604"
171	51°43'17,141"	16°13'15,604"
172	51°43'12,022"	16°13'15,604"
173	51°43'27,372"	16°13'26,062"
174	51°43'22,256"	16°13'26,062"
175	51°43'17,141"	16°13'26,062"
176	51°43'11,939"	16°13'26,062"
177	51°43'22,256"	16°13'36,696"
178	51°43'17,141"	16°13'36,696"
179	51°43'12,022"	16°13'36,696"
180	51°43'22,256"	16°13'47,154"
181	51°43'17,141"	16°13'47,154"
182	51°43'11,939"	16°13'47,154"
183	51°43'6,823"	16°13'47,154"
184	51°43'22,256"	16°13'57,612"
185	51°43'17,141"	16°13'57,612"
186	51°43'12,022"	16°13'57,612"
187	51°43'6,823"	16°13'57,612"
188	51°43'27,458"	16°14'08,070"
189	51°43'22,343”	16°14'08,070"
190	51°43'17,141”	16°14'08,070"
191	51°43'12,022"	16°14'08,070"
192	51°43'6,823"	16°14'08,070"
193	51°43'27,372"	16°14'18,701"
194	51°43'22,256"	16°14'18,701"
195	51°43'17,141"	16°14'18,701"
196	51°43'11,939"	16°14'18,701"
197	51°43'06,823"	16°14'18,701"
198	51°43'01,704"	16°14'18,701"
199	51°43'27,628"	16°14'29,159"
200	51°43'22,256"	16°14'29,159"
201	51°43'17,141"	16°14'29,159"

202	51°43'11,939"	16°14'29,159"
203	51°43'06,823"	16°14'29,159"
204	51°43'01,704"	16°14'29,159"
205	51°43'27,458"	16°14'39,617"
206	51°43'22,256"	16°14'39,617"
207	51°43'17,141"	16°14'39,617"
208	51°43'12,022"	16°14'39,617"
209	51°43'06,823"	16°14'39,617"
210	51°43'01,704"	16°14'39,617"
211	51°42'56,502"	16°14'39,617"
212	51°43'27,372"	16°14'50,248"
213	51°43'22,256"	16°14'50,248"
214	51°43'17,141"	16°14'50,248"
215	51°43'12,022"	16°14'50,248"
216	51°43'06,823"	16°14'50,248"
217	51°43'01,704"	16°14'50,248"
218	51°42'56,502"	16°14'50,248"
219	51°43'27,458"	16°15'00,706"
220	51°43'22,256"	16°15'00,706"
221	51°43'17,141"	16°15'00,706"
222	51°43'11,939"	16°15'00,706"
223	51°43'06,823"	16°15'00,706"
224	51°43'01,704"	16°15'00,706"
225	51°42'56,502"	16°15'00,706"
226	51°43'22,256"	16°15'11,340"
227	51°43'17,141"	16°15'11,340"
228	51°43'12,022"	16°15'11,340"
229	51°43'06,823"	16°15'11,340"
230	51°43'01,704"	16°15'11,340"
231	51°42'56,502"	16°15'11,340"
232	51°43'22,256"	16°15'21,798"
233	51°43'17,141"	16°15'21,798"
234	51°43'11,939"	16°15'21,798"
235	51°43'06,823"	16°15'21,798"
236	51°43'01,704"	16°15'21,798"
237	51°42'56,588"	16°15'21,798"

Lokalizacja punktów do badań zmian sezonowych zawartości dwutlenku węgla została zaplanowana w formie siatki o rozmiarach 500 x 500 m na obszarze składowiska przewidziano 37 punktów pomiarowych do badań sezonowych (**Fig. 1.1.18_211**, **Tab. 1.1.18_25**).

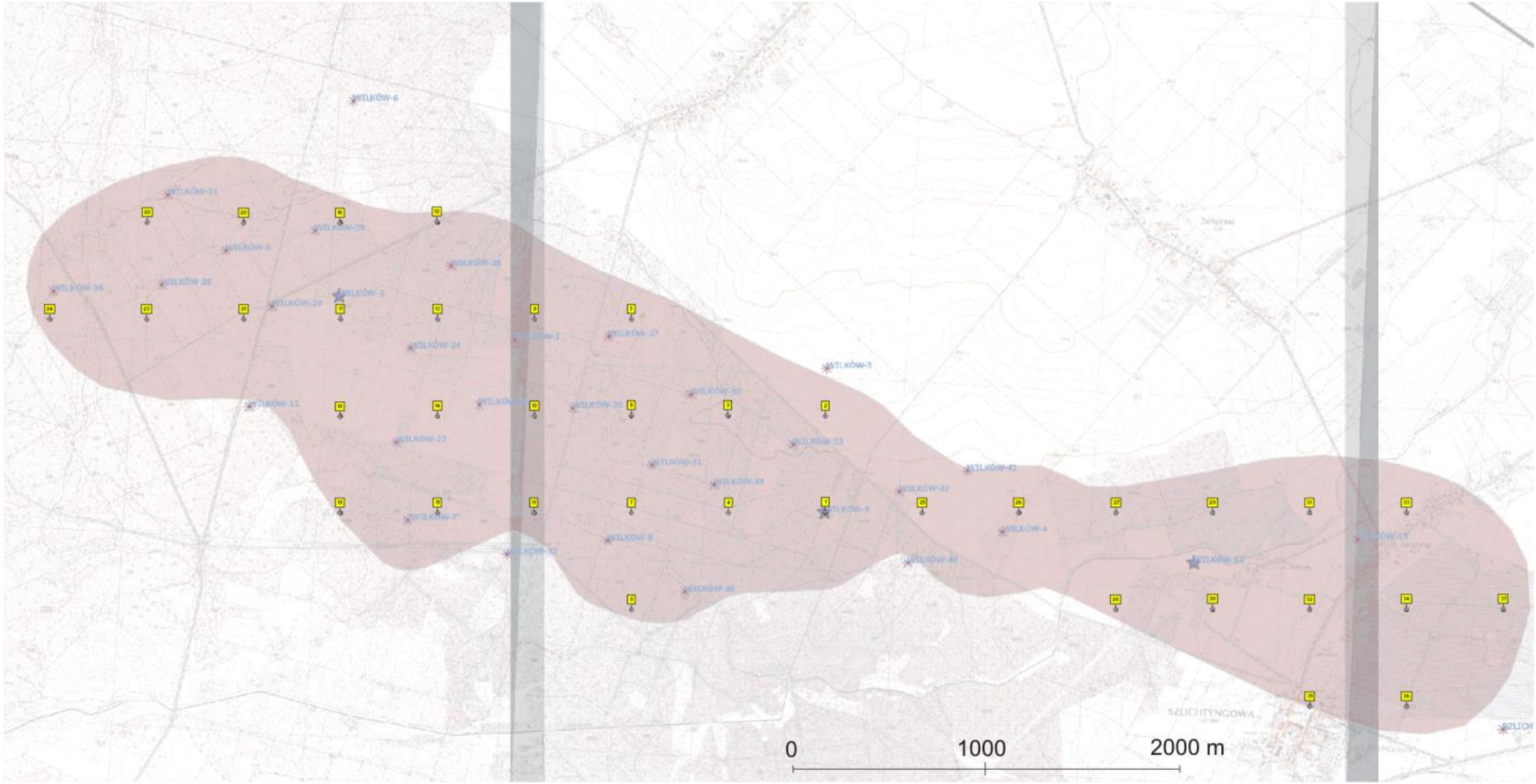


Fig. 1.1.18_211 Lokalizacja punktów pomiarów sezonowych zawartości dwutlenku węgla w powietrzu podglebowym na składowisku na obszarze złoża Wilków

Tab. 1.1.18_25 Lokalizacja punktów do badań zmian sezonowych zawartości dwutlenku węgla

Punkt	Współrzędne geograficzne	
pomiarowy	**Długość**	**Szerokość**
1	51°43'22,343"	16°12'23,036"
2	51°43'35,134"	16°12'23,036"
3	51°43'35,220"	16°11'56,558"
4	51°43'22,256"	16°11'56,558"
5	51°43'48,011"	16°11'30,426"
6	51°43'35,220"	16°11'30,426"
7	51°43'22,256"	16°11'30,426"
8	51°43'09,379"	16°11'30,426"
9	51°43'48,011"	16°11'04,121"
10	51°43'35,134"	16°11'04,121"
11	51°43'22,256"	16°11'04,121"
12	51°44'00,971"	16°10'37,639"
13	51°43'48,011"	16°10'37,639"
14	51°43'35,134"	16°10'37,639"
15	51°43'22,256"	16°10'37,639"
16	51°44'00,802"	16°10'11,334"
17	51°43'48,011"	16°10'11,334"
18	51°43'35,047"	16°10'11,334"
19	51°43'22,256"	16°10'11,334"
20	51°44'00,802"	16°09'45,202"
21	51°43'48,011"	16°09'45,202"
22	51°44'00,888"	16°09'19,069"
23	51°43'48,011"	16°09'19,069"
24	51°43'48,011"	16°08'52,588"
25	51°43'22,256"	16°12'49,345"
26	51°43'22,256"	16°13'15,474"
27	51°43'22,256"	16°13'41,956"
28	51°43'09,379"	16°13'41,956"
29	51°43'22,256"	16°14'08,088"
30	51°43'09,466"	16°14'08,088"
31	51°43'22,256"	16°14'34,393"
32	51°43'09,379"	16°14'34,393"
33	51°43'22,256"	16°15'00,698"
34	51°43'09,466"	16°15'00,698"
35	51°42'56,502"	16°14'34,393"
36	51°42'56,502"	16°15'00,698"
37	51°43'09,466"	16°15'27,007"

Rozkład zawartości CO_2 w powietrzu glebowym proponuje się badać dokładniej w pobliżu otworu zatłaczającego. Punkty będą lokalizowane w odległości 25 m; przewiduje się, że punktów tych będzie około 80.

Punkty, w których będzie prowadzony ciągły pomiar zawartości dwutlenku węgla w powietrzu glebowym (29) powinny być zlokalizowane w pobliżu otworu zatłaczającego i pozostałych otworów na złożu Wilków (**Fig. 1.1.18_212**, **Tab. 1.1.18_26**).

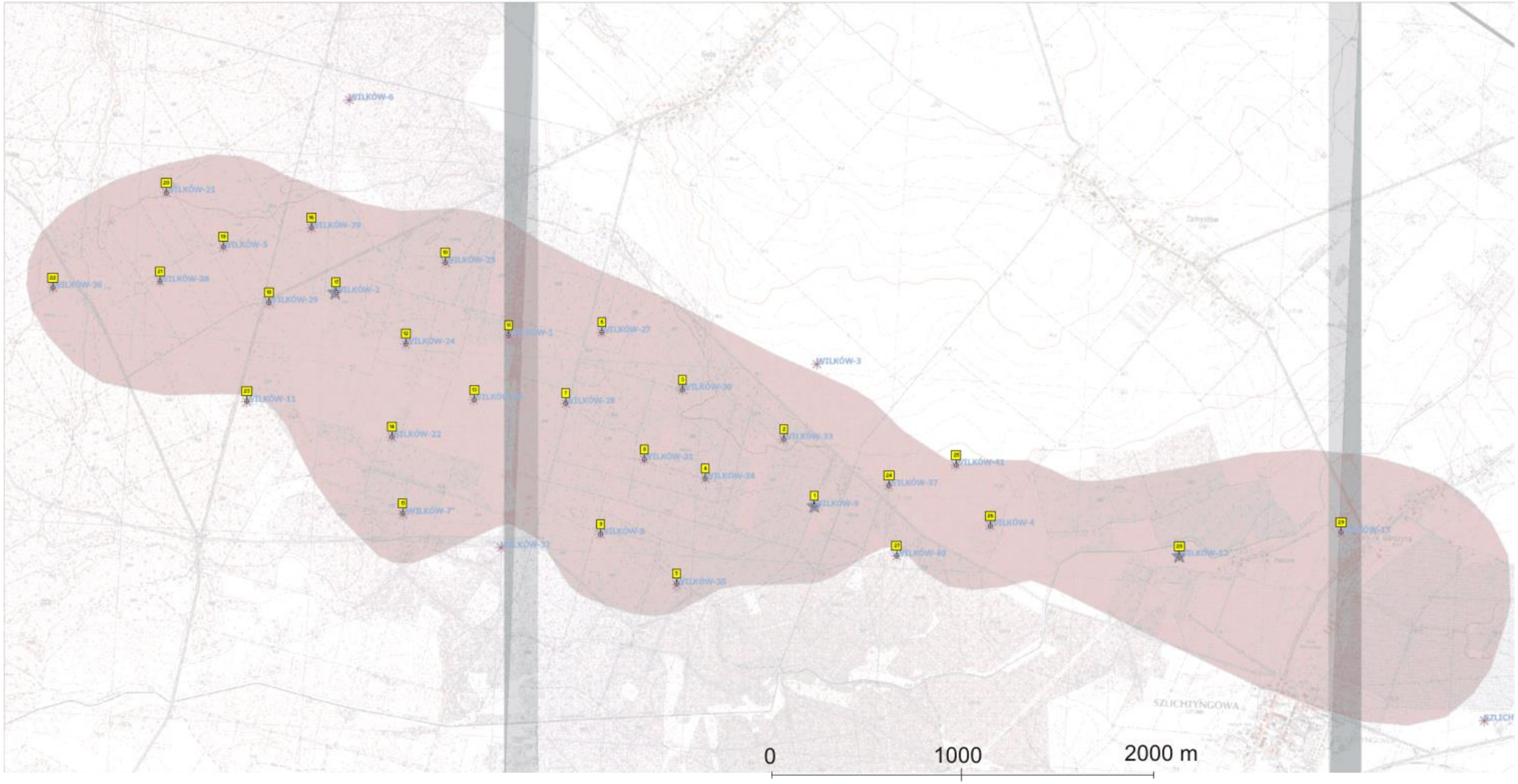


Fig. 1.1.18_212 Lokalizacja punktów ciągłego pomiaru zawartości CO2 w powietrzu podglebowym wokół otworów zlokalizowanych na złożu Wilków

Tab. 1.1.18_26 Lokalizacja punktów ciągłego pomiaru zawartości CO_2 w powietrzu podglebowym wokół otworów zlokalizowanych na złożu Wilków

Punkt pomiarowy	Współrzędne geograficzne	
	Długość	**Szerokość**
1	51°43'22,426"	16°12'22,691"
2	51°43'31,382"	16°12'14,328"
3	51°43'38,032"	16°11'46,453"
4	51°43'26,094"	16°11'52,724"
5	51°43'11,939"	16°11'44,884"
6	51°43'45,793"	16°11'24,328"
7	51°43'36,242"	16°11'14,399"
8	51°43'28,654"	16°11'35,999"
9	51°43'18,588"	16°11'23,978"
10	51°43'55,175"	16°10'41,297"
11	51°43'45,365"	16°10'58,717"
12	51°43'44,256"	16°10'30,497"
13	51°43'36,667"	16°10'49,310"
14	51°43'31,721"	16°10'26,663"
15	51°43'21,403"	16°10'29,626"
16	51°43'59,862"	16°10'04,537"
17	51°43'51,164"	16°10'11,334"
18	51°43'49,800"	16°09'52,866"
19	51°43'57,306"	16°09'40,324"
20	51°44'04,553"	16°09'24,646"
21	51°43'52,615"	16°09'22,903"
22	51°43'51,762"	16°08'53,459"
23	51°43'36,498"	16°09'46,768"
24	51°43'25,154"	16°12'43,247"
25	51°43'27,883"	16°13'01,711"
26	51°43'19,697"	16°13'11,122"
27	51°43'15,690"	16°12'45,338"
28	51°43'15,604"	16°14'03,037"
29	51°43'18,847"	16°14'47,461"

Powierzchniowe pomiary geochemiczne (zdjęcie zawartości CO_2 oraz zmiany sezonowe) będą prowadzone na głębokości do l m w punktach pomiarowych przewidzianych dla poszczególnych typów badań. Zawartość CO_2 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 (**Fig. 1.1.18_213**). Oznaczenie stężenia będzie wykonywane detektorem X-am 7000 firmy Drager. Miernik ten jest wyposażony w sensor CO_2 działający na zasadzie absorpcji promieniowania podczerwonego techniką NDIR *(Non-dispersive Infrared)* o zakresie pomiarowym 0-100% obj. gazu.

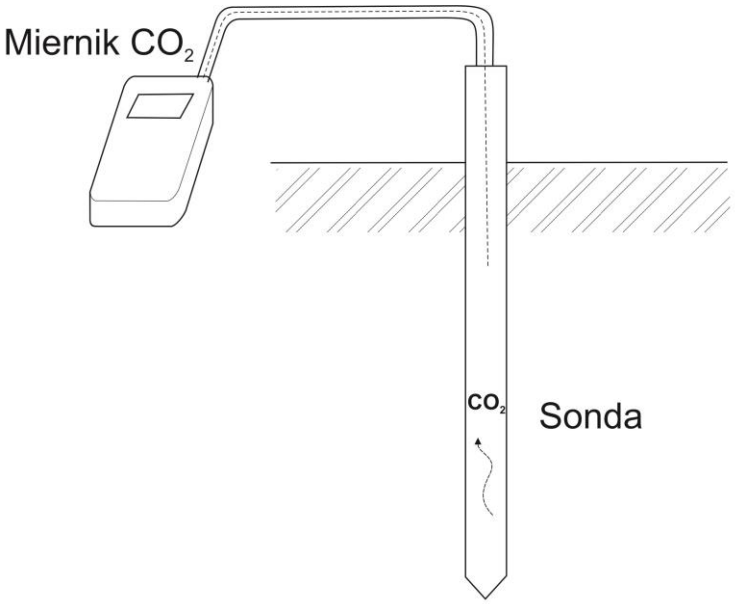


Fig. 1.1.18_213 Schemat pomiarów zawartości dwutlenku węgla w powietrzu podglebowym

Głębokościowy rozkład stężenia dwutlenku węgla będzie wykonany w 10 punktach w otworach odwierconych do głębokości 5 m. Pomiar stężenia będzie wykonywany na głębokości l, 2, 3, 4 m.

Instalacja ciągłego pomiaru zawartości i rejestracji dwutlenku węgla w powietrzu glebowym będzie składała się z przetworników (liczba zostanie ustalona na etapie projektowania prac), źródła zasilania, skanera pomiarowego oraz komputera. Przetworniki umieszczone będą w rurach PCV o średnicy 100 mm; na głębokości 110 cm, w dolnej części będą one sperforowane: zasilane napięciem 24 V DC, z zasilacza napięcia stałego. Skaner pomiarowy, zlokalizowany w oddzielnej skrzynce pomiarowej, połączony będzie kablami sygnałowymi z przetwornikami CO_2 ułożonymi 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.

Harmonogram pomiarów stężenia CO_2 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 (**Tab. 1.1.18_27**).

Tab. 1.1.18_27 Harmonogram pomiarów zawartości CO_2 w powietrzu podglebowym, strumienia i biomonitoringu na składowisku na obszarze złoża Wilków

Metoda badań		**Poziom odniesienia**	**Eksploatacja składowiska**	**Po zamknięciu składowiska**
Pomiar koncentracji CO_2	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_2	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

W ramach monitorowania poziomu odniesienia dla składowiska z obszaru proponuje się wykonanie następujących badań:

- szczegółowe zdjęcie 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 stężeń CO_2 do głębokości 5 m w wybranych punktach - 2 razy w roku (sezon ciepły i chłodny),
- ciągłe pomiary zawartości CO_2 w powietrzu glebowym w zastabilizowanych punktach pomiarowych.

W trakcie eksploatacji składowiska CO_2 proponuje się wykonanie następujących badań geochemicznych zawartości dwutlenku węgla:

- szczegółowe zdjęcie 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,
- ciągłe pomiary zawartości CO_2 w powietrzu podglebowym w zastabilizowanych punktach pomiarowych.
- Po zamknięciu składowiska z 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),
- ciągłe pomiary zawartości CO_2 w powietrzu podglebowym w zastabilizowanych punktach pomiarowych.

Metodyka pomiarów strumienia CO_2

Pomiary naturalnego strumienia dwutlenku węgla prowadzi się przy wykorzystaniu zamkniętej komory. Strumień dwutlenku węgla mierzy się przy wykorzystaniu systemu pomiarowego złożonego z jednostki pomiarowej i jednej lub kilku komór pomiarowych oraz komputera (palmtopa) rejestrującego wyniki. System ten oprócz pomiarów strumienia dwutlenku węgla powinien mierzyć temperaturę gleby. Gotowe systemy pomiarowe tego rodzaju są produkowane np. przez firmę LI-COR Inc. umożliwiają one pomiary strumienia dwutlenku węgla jednorazowe i długoterminowe.

System pomiarowy strumienia naturalnego dwutlenku węgla może być również wykonany w oparciu o miernik wielogazowy z czujnikami na podczerwień (**Fig. 1.1.18_214**).

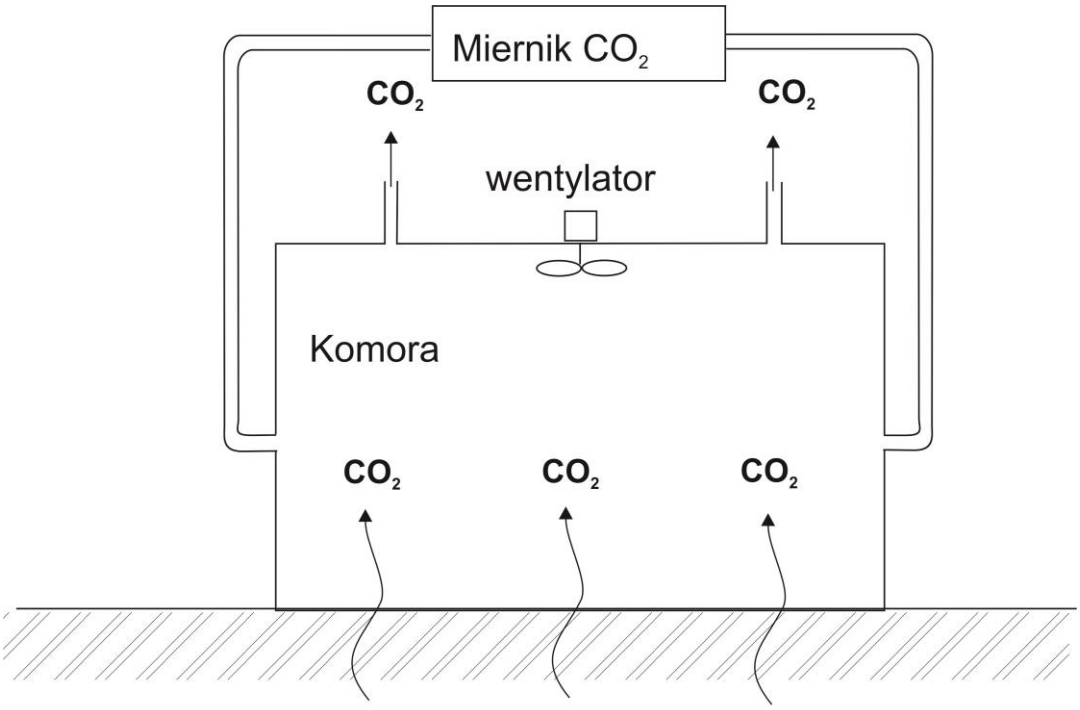


Fig. 1.1.18_214 Schemat komory do pomiaru strumienia dwutlenku węgla (Żak i in., 2002)

W planowaniu lokalizacji punktów pomiarowych strumienia dwutlenku węgla powinno się brać pod uwagę budowę geologiczną (litologię, tektonikę i warunki hydrogeologiczne), morfologię, hydrografię i zabudowę terenu.

Badania strumienia dwutlenku węgla powinny być wykonane na obszarze oddziaływania zatłaczanego gazu, na tym samym terenie gdzie będą wykonywane pomiary stężenia dwutlenku węgla. Planowane punkty pomiarowe strumienia CO_2 (58) będą rozmieszczone w siatce podstawowej o rozmiarach około 400 x 400 m (**Fig. 1.1.18_215**, **Tab. 1.1.18_28**).

Tab. 1.1.18_28 Lokalizacja punktów pomiarowych strumienia dwutlenku węgla oraz poboru próbek do badań biomonitoringu na składowisku na obszarze złoża Wilków

Punkt pomiarowy	Współrzędne geograficzne	
	Długość	**Szerokość**
1	51°43'22,267"	16°12'22,968"
2	51°43'32,610"	16°12'22,968"
3	51°43'11,921"	16°12'22,968"
4	51°43'42,956"	16°12'01,876"
5	51°43'32,610"	16°12'01,876"
6	51°43'22,267"	16°12'01,876"
7	51°43'11,921"	16°12'01,876"

8	51°43'42,956"	16°11'40,787"
9	51°43'32,610"	16°11'40,787"
10	51°43'22,267"	16°11'40,787"
11	51°43'12,007"	16°11'40,787"
12	51°43'53,299"	16°11'19,871"
13	51°43'42,956"	16°11'19,871"
14	51°43'32,610"	16°11'19,871"
15	51°43'22,267"	16°11'19,871"
16	51°43'12,007"	16°11'19,871"
17	51°43'53,216"	16°10'58,782"
18	51°43'42,956"	16°10'58,782"
19	51°43'32,610"	16°10'58,782"
20	51°43'22,267"	16°10'58,782"
21	51°43'53,299"	16°10'37,690"
22	51°43'42,956"	16°10'37,690"
23	51°43'32,610"	16°10'37,690"
24	51°43'22,267"	16°10'37,690"
25	51°44'03,559"	16°10'16,601"
26	51°43'53,216”	16°10'16,601"
27	51°43'42,956"	16°10'16,601"
28	51°43'32,610"	16°10'16,601"
29	51°43'22,350"	16°10'16,601"
30	51°44'03,559"	16°09'55,685"
31	51°43'53,216"	16°09'55,685"
32	51°43'42,956"	16°09'55,685"
33	51°44'03,559"	16°09'34,596"
34	51°43'53,216"	16°09'34,596"
35	51°43'42,870"	16°09'34,596"
36	51°44'03,559"	16°09'13,504"
37	51°43'53,216"	16°09'13,504"
38	51°43'42,956"	16°09'13,504"
39	51°43'53,299"	16°08'52,415"
40	51°43'32,610"	16°12'43,884"
41	51°43'22,350"	16°12'43,884"
42	51°43'22,267"	16°13'05,146"
43	51°43'12,007"	16°13'05,146"
44	51°43'22,267"	16°13'26,062"
45	51°43'11,921"	16°13'26,062"
46	51°43'22,267"	16°13'47,154"
47	51°43'11,921"	16°13'47,154"
48	51°43'22,267"	16°14'08,243"

49	51°43'11,921"	16°14'08,243"
50	51°43'22,267"	16°14'29,159"
51	51°43'11,921"	16°14'29,159"
52	51°43'01,661"	16°14'29,159"
53	51°43'22,267"	16°14'50,248"
54	51°43'11,921"	16°14'50,248"
55	51°43'01,661"	16°14'50,248"
56	51°43'22,267"	16°15'11,340"
57	51°43'11,921"	16°15'11,340"
58	51°43'01,661"	16°15'11,340"

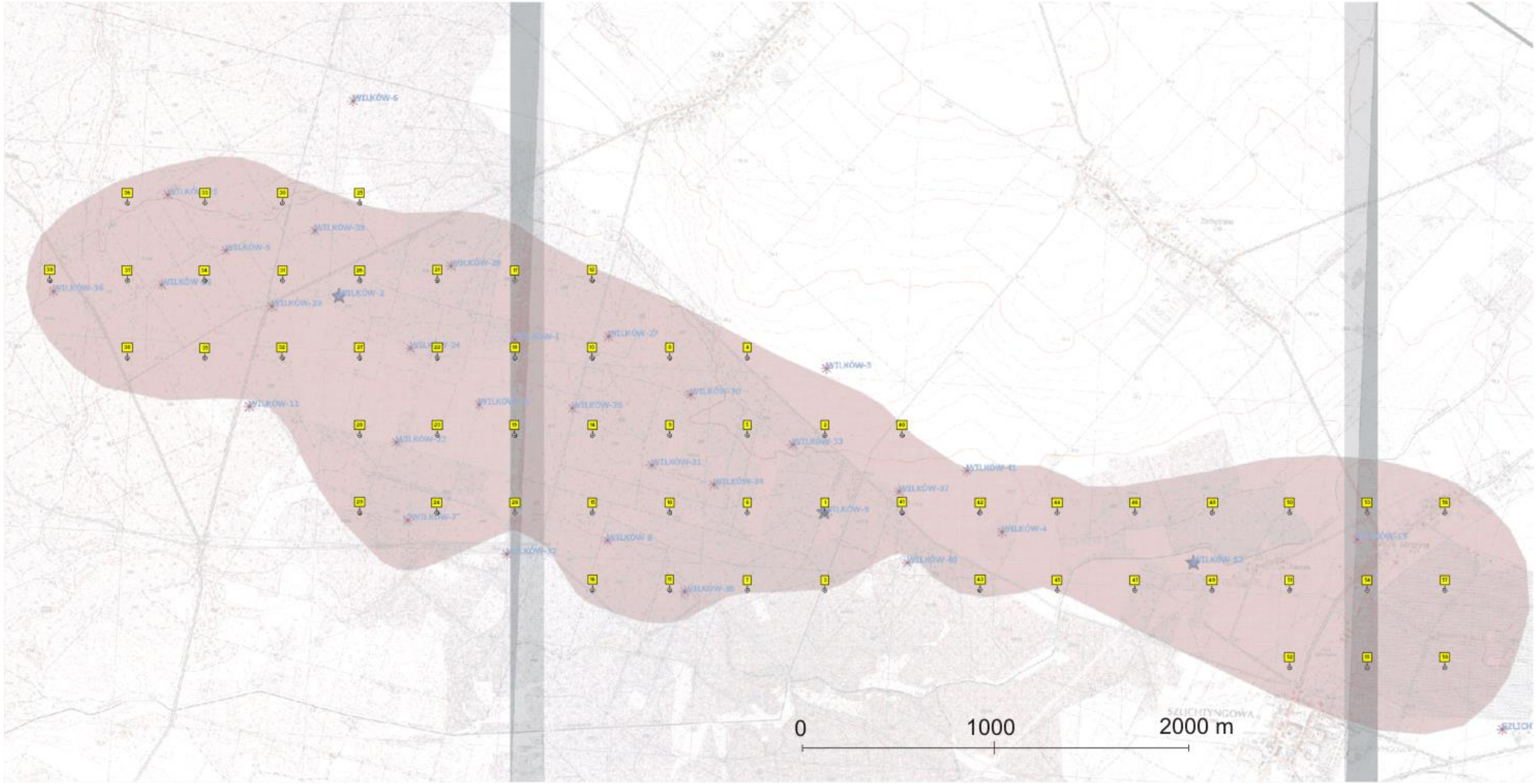


Fig. 1.1.18_215 Lokalizacja punktów pomiarowych strumienia powierzchniowego dwutlenku węgla w powietrzu podglebowym i poboru próbek do badań biomonitoringu na składowisku na obszarze złoża Wilków

Przy otworze zatłaczającym badania powinny być wykonywane w dodatkowych punktach pomiarowych. Na obszarze tym przewidziano 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.

W każdym punkcie pomiary strumienia CO_2 powinny być wykonywane przez około 10 minut przy wykorzystaniu systemu automatycznego pomiaru LI-8100.

Wokół otworów można również prowadzić ciągły pomiar strumienia dwutlenku węgla przy wykorzystaniu systemu ciągłego pomiaru firmy LI-COR Inc.

Lokalizację punktów pomiarowych powinno się ustalić w terenie za pomocą urządzeń nawigacji satelitarnej GPS. Część punktów pomiarowych ze względu na występowanie trwałej nawierzchni, przeszkód terenowych może być przesunięte o niewielką odległość w stosunku do planowanej.

Harmonogram pomiarów strumienia CO_2

Pomiar strumienia dwutlenku węgla należy przeprowadzić w trakcie wszystkich głównych etapów projektu: monitorowanie poziomu odniesienia, w czasie eksploatacji i po zamknięciu (por. **Tab. 1.1.18_28**).

W ramach monitorowania poziomu odniesienia dla składowiska na obszarze złoża Wilków proponuje się wykonanie następujących badań strumienia dwutlenku węgla:

- badania tła strumienia dwutlenku węgla w siatce podstawowej na terenie składowiska - 4 razy w roku,
- badania tła strumienia dwutlenku węgla w pobliżu otworu zatłaczającego - 4 razy w roku,
- ciągłe pomiary strumienia dwutlenku węgla w pobliżu otworów.
- W trakcie eksploatacji składowiska na obszarze złoża Wilków proponuje się wykonanie następujących badań strumienia dwutlenku węgla:
- badania strumienia dwutlenku węgla w siatce podstawowej na terenie składowiska - 2 raz w roku (sezon ciepły i zimny),
- badania strumienia dwutlenku węgla w pobliżu otworu zatłaczającego - 4 razy w roku,
- ciągłe pomiary strumienia dwutlenku węgla w pobliżu otworów.

Po zamknięciu składowiska na obszarze złoża Wilków proponowane są następujące badania strumienia dwutlenku węgla:

- badania tła strumienia dwutlenku węgla w pobliżu otworu zatłaczającego - 4 razy w roku,
- ciągłe pomiary strumienia dwutlenku węgla w pobliżu otworów.

Program biomonitoringu dla składowiska na obszarze złoża Wilków

Biomonitoring oparty będzie na badaniu zmian ilościowych wskaźnikowych mikroorganizmów i procesów życiowych będących wynikiem zmiany podaży dwutlenku węgla w środowisku glebowym wywołanej wyciekiem tego gazu z podziemnego składowiska.

Próby gruntowe pobierane z terenu składowiska CO_2 stanowią materiał do badań mikrobiologicznych wykonywanych w ramach prac monitoringowych. Przy poborze próbek należy uwzględnić odpowiednią lokalizację punktów i głębokość poboru oraz zachowania jałowości 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, dostępności poszczególnych punktów poboru próbek), lokalizacji otworu zatłaczającego, geologii struktury, w tym prawdopodobnego przebiegu uskoków. W celu uzyskania pełnej informacji o mikroflorze występującej na danym terenie, w środowisku gruntowym, próbki powinno się pobierać ze stałej głębokości (60-80 cm). Zróżnicowanie mikroflory w zależności od głębokości bytowania jest znaczne, gdyż 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.

Metodyka i harmonogram badań biomonitoringu

Proponuje się przeprowadzenie następujących prac w ramach biomonitoringu składowania dwutlenku węgla przed, w trakcie i po zatłaczaniu gazu:

- 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 prowadzić przez 2 lata lub do momentu rozpoczęcia eksploatacji składowiska dwutlenku węgla. Monitoring mikrobiologiczny w czasie eksploatacji składowiska dwutlenku węgla i po jej zakończeniu prowadzić się będzie poprzez badania zmian ilościowych bakterii i procesów wskaźnikowych na obszarze składowiska. Badania mikroorganizmów wskaźnikowych należy prowadzić czterokrotnie w ciągu roku przez cały czas trwania zatłaczania dwutlenku węgla.

Pobór próbek będzie wykonany na obszarze całego składowiska w siatce o rozmiarach około 400 x 400 m (**Fig. 1.1.18_215** i **Tab. 1.1.18_28**). Próbki pobierane będą z głębokości 80 cm p.p.t. za pomocą świdra ręcznego z zachowaniem czystości mikrobiologicznej. Przewiduje się również pobór próbek w pobliżu otworu zatłaczającego i obserwacyjnych.

Program monitoringu powierzchniowego CO2 dla składowiska Nosówka

Złoże ropy naftowej i gazu ziemnego Nosówka zostało odkryte w 1988 r. w odległości 12-15 km na południowy zachód od Rzeszowa (Karnkowski 1993). Stropowa powierzchnia utworów karbonu dolnego jest powierzchnią erozyjną, dlatego miąższość warstw karbońskich w obszarze pola roponośnego zmienia się od 40 do 188 m. Serię karbońską charakteryzuje trójdzielność litologiczna. Najniższy kompleks jest węglanowo-klastyczny, środkowy węglanowy jest skałą zbiornikowa dla ropy, a górny kompleks jest piaskowcowo-łupkowy. W pobliżu Nosówki środkowy kompleks węglanowy tworzy garb typu antyklinalnego o biegu dłuższej osi NW-SE. Naturalny zbiornik ropy naftowej w złożu Nosówka tworzy seria wapieni przewarstwionych cienkimi pakietami mułowcowo-łupkowymi (**Fig. 1.1.18_216**). Uszczelnienie złoża tworzą utwory miocenu wykształcone w facji łupkowo-mułowcowo-piaskowcowej. Pierwotne ciśnienie złożowe wynosiło 35,91 MPa (354,5 atm), temperatura złoża 102°C.

Założenia do monitoringu

Badania powierzchniowe obejmują pomiary zawartości dwutlenku węgla w powietrzu podglebowym (wzdłuż wyznaczonych profili, badania powierzchniowe, zmiany sezonowe oraz głębokościowe) oraz strumienia tego gazu. Monitoring będzie realizowany przez badanie zmian zawartości CO_2 w powietrzu podglebowym oraz strumienia na terenie składowiska. Wzrost stężenia dwutlenku węgla w powietrzu podglebowym i/lub wielkości strumienia tego gazu wskazuje 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, włączając w to 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.

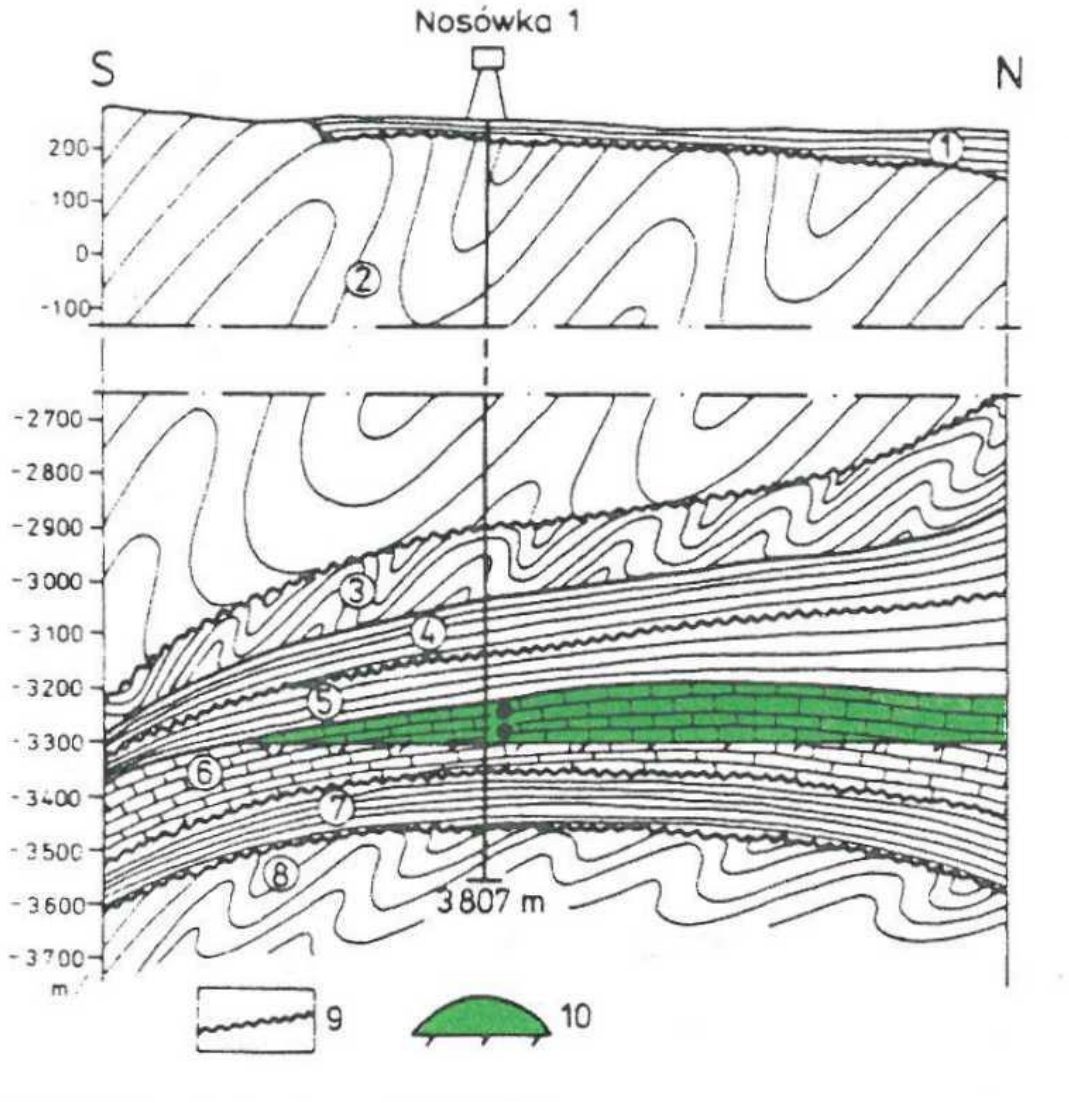


Fig. 1.1.18_216 Złoże ropy naftowej Nosówka; 1 – miocen; 2 – flisz karpacki; 3 – miocen, jednostka stebnicka; 4 – miocen autochtoniczny; 5 – karbon dolny, kulm; 6 – karbon dolny, wizen; 7 – ordowik i sylur; 8 – fyllity prekambryjskie; 9 – powierzchnia erozyjna; 10 – obszar złoża ropy naftowej (Karnkowski 1993, wg J. Czernickiego i W. Moryca 1990)

W ramach monitoringu składowania dwutlenku węgla na składowisku w obszarze Nosówka proponuje się wykonanie następujących badań geochemicznych:

- szczegółowe zdjęcie geochemiczne zawartości dwutlenku węgla na terenie składowiska na obszarze złoża Nosówka,
- powierzchniowe badania geochemiczne zawartości CO_2 w pobliżu otworu zatłaczającego,
- sezonowe powierzchniowe badania geochemiczne zawartości CO_2 na terenie składowiska na obszarze złoża Nosówka,
- badania geochemiczne rozkładu stężeń CO_2 do głębokości 5 m w wybranych punktach,

- ciągłe pomiary zawartości CO_2 w powietrzu podglebowym w zastabilizowanych punktach pomiarowych.

Na etapie monitorowania poziomu odniesienia badania te mają na celu ustalenie tła zawartości CO_2 w powietrzu podglebowym oraz jego zmian sezonowych i rozkładu głębokościowego dla składowiska na obszarze złoża Nosówka. Posłużą 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.

Metodyka pomiarów zawartości CO_2 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 ustalono wstępnie na mapach topograficznych w skali 1:10 000 (w razie potrzeby posłużono się powiększeniami). Lokalizacja stanowisk wymaga weryfikacji na podstawie rekonesansu w terenie, przy czym część punktów pomiarowych może być nieznacznie przesunięta ze względu na występowanie trwałej nawierzchni, przeszkód terenowych, instalacji podziemnych itp.

Położenie punktów pomiarowych w terenie należy udokumentować metodami geodezyjnymi z dokładnością $\pm$1 m.

Punkty pomiarowe powierzchniowego zdjęcia geochemicznego zawartości CO_2 planuje się rozmieścić w siatce podstawowej 200 x 200 m. Obszar składowiska, na którym wykonywane będą pomiary koncentracji CO_2 w powietrzu glebowym obejmuje powierzchnię ok. 1,45 km^2. Na tym obszarze tym przewidziano 53 podstawowe punkty pomiarowe (**Tab. 1.1.18_29**, **Fig. 1.1.18_218**).

Lokalizacja punktów do badań zmian sezonowych zawartości dwutlenku węgla została zaplanowana w formie siatki o rozmiarach 400x400 m. Na obszarze składowiska przewidziano 13 punktów pomiarowych do badań sezonowych (**Tab. 1.1.18_30**, **Fig. 1.1.18_219**).

Rozkład zawartości CO_2 w powietrzu glebowym proponuje się badać dokładniej w pobliżu otworu zatłaczającego. Punkty będą lokalizowane w odległości 25 m; przewiduje się, że takich punktów będzie 4÷5.

Punkty, w których będzie prowadzony ciągły pomiar zawartości dwutlenku węgla w powietrzu glebowym (9 szt.) powinny być zlokalizowane w pobliżu otworu zatłaczającego i pozostałych otworów na złożu Nosówka (**Tab. 1.1.18_31**, **Fig. 1.1.18_220**).

Powierzchniowe pomiary geochemiczne (zdjęcie zawartości CO_2 oraz zmiany sezonowe) będą prowadzone na głębokości do l m w punktach pomiarowych przewidzianych dla poszczególnych typów badań. Zawartość CO_2 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 (**Fig. 1.1.18_217**). Oznaczenie stężenia będzie wykonywane detektorem X-am 7000 firmy Drager. Miernik ten jest wyposażony w sensor CO_2 działający na zasadzie absorpcji promieniowania podczerwonego techniką NDIR *(Non-dispersive Infrared)* o zakresie pomiarowym 0-100% obj. gazu.

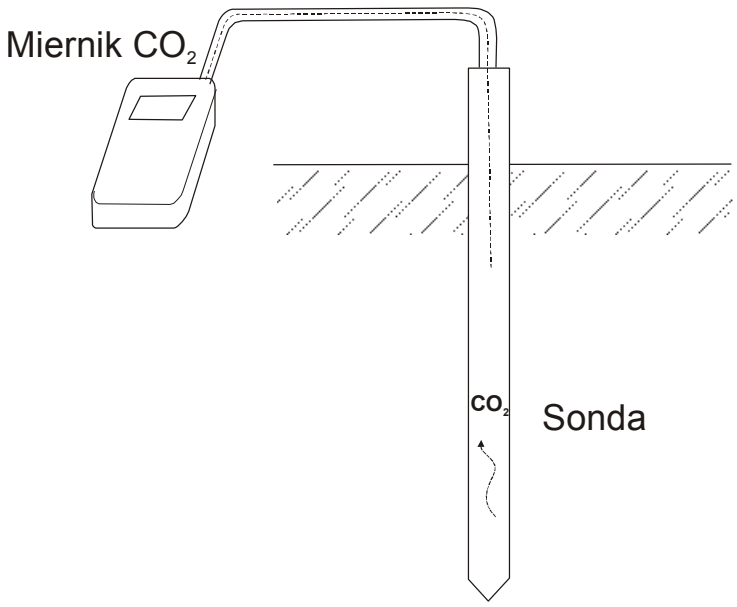


Fig. 1.1.18_217 Schemat pomiarów zawartości dwutlenku węgla w powietrzu podglebowym

Głębokościowy rozkład stężenia dwutlenku węgla będzie wykonany w 10 punktach w otworach odwierconych do głębokości 5 m. Pomiar stężenia będzie wykonywany na głębokości l, 2, 3, 4 m.

Instalacja ciągłego pomiaru zawartości i rejestracji dwutlenku węgla w powietrzu glebowym będzie składała się z przetworników (liczba zostanie ustalona na etapie projektowania prac), źródła zasilania, skanera pomiarowego oraz komputera. Przetworniki umieszczone będą w rurach PCV o średnicy 100 mm; na głębokości 110 cm, w dolnej części będą one sperforowane: zasilane napięciem 24 V DC, z zasilacza napięcia stałego. Skaner pomiarowy, zlokalizowany w oddzielnej skrzynce pomiarowej, połączony będzie kablami sygnałowymi z przetwornikami CO_2 ułożonymi 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.

Tab. 1.1.18_29 Lokalizacja punktów pomiarowych zawartości CO_2 w powietrzu podglebowym na składowisku na obszarze złoża Nosówka

Punkt pomiarowy	Obszar	Współrzędne topograficzne*		Współrzędne geograficzne	
		X_1992	Y_1992	X2	Y2
1	NOSÓWKA	705458.23	243399.89	21° 52' 9,278" E	50° 1' 20,574" N
2	NOSÓWKA	705660.50	243401.89	21° 52' 19,437" E	50° 1' 20,388" N
3	NOSÓWKA	705860.90	243403.86	21° 52' 29,502" E	50° 1' 20,202" N
4	NOSÓWKA	706063.19	243405.86	21° 52' 39,663" E	50° 1' 20,015" N
5	NOSÓWKA	706263.59	243407.84	21° 52' 49,728" E	50° 1' 19,829" N
6	NOSÓWKA	705259.97	243195.89	21° 51' 58,930" E	50° 1' 14,222" N
7	NOSÓWKA	705460.36	243197.87	21° 52' 8,995" E	50° 1' 14,037" N
8	NOSÓWKA	705662.64	243199.86	21° 52' 19,154" E	50° 1' 13,850" N
9	NOSÓWKA	705863.04	243201.84	21° 52' 29,219" E	50° 1' 13,665" N
10	NOSÓWKA	706065.33	243203.83	21° 52' 39,379" E	50° 1' 13,477" N
11	NOSÓWKA	706265.72	243205.81	21° 52' 49,444" E	50° 1' 13,291" N
12	NOSÓWKA	705059.49	242992.07	21° 51' 48,473" E	50° 1' 7,877" N
13	NOSÓWKA	705262.10	242994.07	21° 51' 58,649" E	50° 1' 7,691" N
14	NOSÓWKA	705462.50	242996.05	21° 52' 8,713" E	50° 1' 7,506" N
15	NOSÓWKA	705664.77	242998.05	21° 52' 18,872" E	50° 1' 7,319" N
16	NOSÓWKA	705865.18	243000.02	21° 52' 28,937" E	50° 1' 7,134" N
17	NOSÓWKA	706067.46	243002.01	21° 52' 39,096" E	50° 1' 6,946" N
18	NOSÓWKA	706267.86	243003.99	21° 52' 49,161" E	50° 1' 6,760" N
19	NOSÓWKA	706470.14	243005.99	21° 52' 59,319" E	50° 1' 6,573" N
20	NOSÓWKA	705061.62	242790.05	21° 51' 48,191" E	50° 1' 1,340" N
21	NOSÓWKA	705264.24	242792.05	21° 51' 58,367" E	50° 1' 1,153" N
22	NOSÓWKA	705464.64	242794.02	21° 52' 8,431" E	50° 1' 0,968" N
23	NOSÓWKA	705666.92	242796.02	21° 52' 18,590" E	50° 1' 0,781" N
24	NOSÓWKA	705867.31	242798.00	21° 52' 28,654" E	50° 1' 0,596" N
25	NOSÓWKA	706069.60	242800.00	21° 52' 38,813" E	50° 1' 0,409" N
26	NOSÓWKA	706269.99	242801.96	21° 52' 48,876" E	50° 1' 0,223" N
27	NOSÓWKA	706472.27	242803.96	21° 52' 59,035" E	50° 1' 0,035" N
28	NOSÓWKA	705266.37	242590.11	21° 51' 58,085" E	50° 0' 54,618" N
29	NOSÓWKA	705466.78	242592.08	21° 52' 8,149" E	50° 0' 54,433" N
30	NOSÓWKA	705669.05	242594.08	21° 52' 18,307" E	50° 0' 54,246" N
31	NOSÓWKA	705869.45	242596.06	21° 52' 28,371" E	50° 0' 54,061" N
32	NOSÓWKA	706071.73	242598.06	21° 52' 38,529" E	50° 0' 53,874" N
33	NOSÓWKA	706272.13	242600.03	21° 52' 48,593" E	50° 0' 53,688" N
34	NOSÓWKA	706474.41	242602.03	21° 52' 58,751" E	50° 0' 53,500" N
35	NOSÓWKA	706674.81	242604.00	21° 53' 8,815" E	50° 0' 53,314" N
36	NOSÓWKA	705468.91	242390.06	21° 52' 7,867" E	50° 0' 47,896" N
37	NOSÓWKA	705671.19	242392.05	21° 52' 18,025" E	50° 0' 47,709" N

38	NOSÓWKA	705871.58	242394.03	21° 52' 28,088" E	50° 0' 47,523" N
39	NOSÓWKA	706073.87	242396.03	21° 52' 38,246" E	50° 0' 47,336" N
40	NOSÓWKA	706274.27	242398.01	21° 52' 48,310" E	50° 0' 47,151" N
41	NOSÓWKA	706476.55	242400.00	21° 52' 58,467" E	50° 0' 46,963" N
42	NOSÓWKA	706676.95	242401.98	21° 53' 8,531" E	50° 0' 46,776" N
43	NOSÓWKA	706879.58	242403.98	21° 53' 18,706" E	50° 0' 46,588" N
44	NOSÓWKA	705873.72	242192.21	21° 52' 27,805" E	50° 0' 40,992" N
45	NOSÓWKA	706076.00	242194.21	21° 52' 37,963" E	50° 0' 40,805" N
46	NOSÓWKA	706276.41	242196.19	21° 52' 48,027" E	50° 0' 40,620" N
47	NOSÓWKA	706478.68	242198.18	21° 52' 58,183" E	50° 0' 40,432" N
48	NOSÓWKA	706679.08	242200.16	21° 53' 8,246" E	50° 0' 40,245" N
49	NOSÓWKA	706882.54	242202.17	21° 53' 18,463" E	50° 0' 40,056" N
50	NOSÓWKA	706078.15	241992.18	21° 52' 37,680" E	50° 0' 34,267" N
51	NOSÓWKA	706278.54	241994.16	21° 52' 47,743" E	50° 0' 34,082" N
52	NOSÓWKA	706480.82	241996.14	21° 52' 57,900" E	50° 0' 33,893" N
53	NOSÓWKA	706681.22	241998.13	21° 53' 7,962" E	50° 0' 33,708" N

* – państwowy układ współrzędnych płaskich prostokątnych "1992"

Tab. 1.1.18_30 Lokalizacja punktów do badań zmian sezonowych zawartości CO_2 na składowisku na obszarze złoża Nosówka

Punkt pomiarowy	Obszar	Współrzędne topograficzne*		Współrzędne geograficzne	
		X_1992	Y_1992	X2	Y2
1	NOSÓWKA	705660.5	243401.89	21° 52' 19,437" E	50° 1' 20,388" N
2	NOSÓWKA	706063.19	243405.86	21° 52' 39,663" E	50° 1' 20,015" N
3	NOSÓWKA	705262.1	242994.07	21° 51' 58,649" E	50° 1' 7,691" N
4	NOSÓWKA	705664.77	242998.05	21° 52' 18,872" E	50° 1' 7,319" N
5	NOSÓWKA	706067.46	243002.01	21° 52' 39,096" E	50° 1' 6,946" N
6	NOSÓWKA	706470.14	243005.99	21° 52' 59,319" E	50° 1' 6,573" N
7	NOSÓWKA	705266.37	242590.11	21° 51' 58,085" E	50° 0' 54,618" N
8	NOSÓWKA	705669.05	242594.08	21° 52' 18,307" E	50° 0' 54,246" N
9	NOSÓWKA	706071.73	242598.06	21° 52' 38,529" E	50° 0' 53,874" N
10	NOSÓWKA	706474.41	242602.03	21° 52' 58,751" E	50° 0' 53,500" N
11	NOSÓWKA	706076	242194.21	21° 52' 37,963" E	50° 0' 40,805" N
12	NOSÓWKA	706478.68	242198.18	21° 52' 58,183" E	50° 0' 40,432" N
13	NOSÓWKA	706882.54	242202.17	21° 53' 18,463" E	50° 0' 40,056" N

* – państwowy układ współrzędnych płaskich prostokątnych "1992"

Tab. 1.1.18_31 Lokalizacja punktów ciągłego pomiaru zawartości CO_2 w powietrzu podglebowym wokół otworów na złożu Nosówka

Punkt pomiarowy	Obszar	Współrzędne topograficzne*		Współrzędne geograficzne	
		X_1992	Y_1992	X2	Y2
1	NOSÓWKA	706040.86	243345.22	21°52'38,424''E	50°1'18,081''N
2	NOSÓWKA	706091.04	243258.42	21°52'40,775''E	50°1'15,211''N
3	NOSÓWKA	705990.68	243258.55	21°52'35,737''E	50°1'15,340''N
4	NOSÓWKA	706336.86	242497.63	21°52'51,644''E	50°0'50,294''N
5	NOSÓWKA	706387.03	242410.83	21°52'53,994''E	50°0'47,424''N
6	NOSÓWKA	706286.67	242410.96	21°52'48,957''E	50°0'47,554''N
7	NOSÓWKA	705367.87	242894.11	21°52'3,765''E	50°1'4,325''N
8	NOSÓWKA	705418.04	242807.31	21°52'6,117''E	50°1'1,455''N
9	NOSÓWKA	705317.68	242807.44	21°52'1,079''E	50°1'1,584''N

* – państwowy układ współrzędnych płaskich prostokątnych "1992"

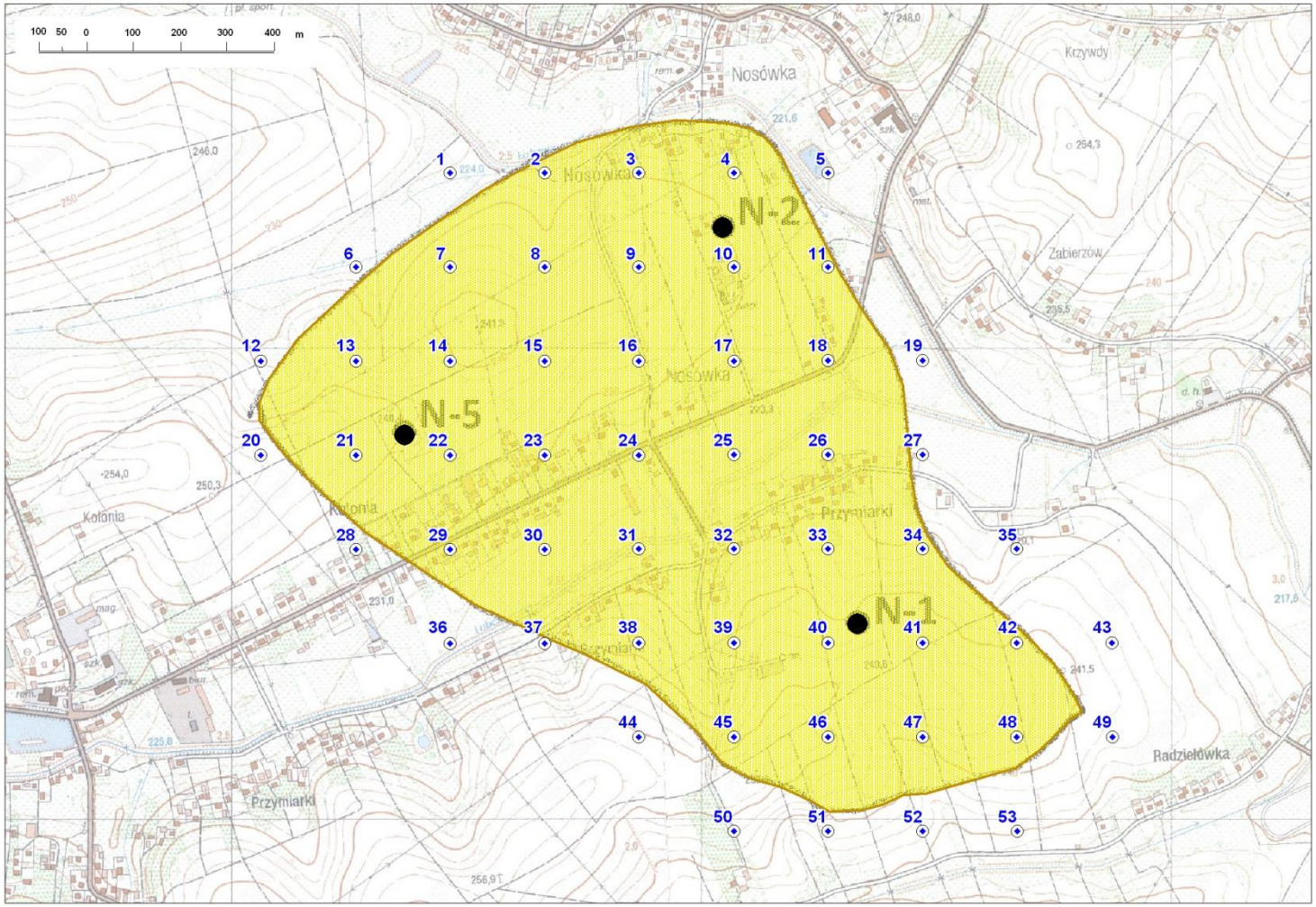


Fig. 1.1.18_218 Lokalizacja punktów pomiarowych zdjęcia geochemicznego zawartości CO_2 w powietrzu podglebowym na składowisku na obszarze złoża Nosówka

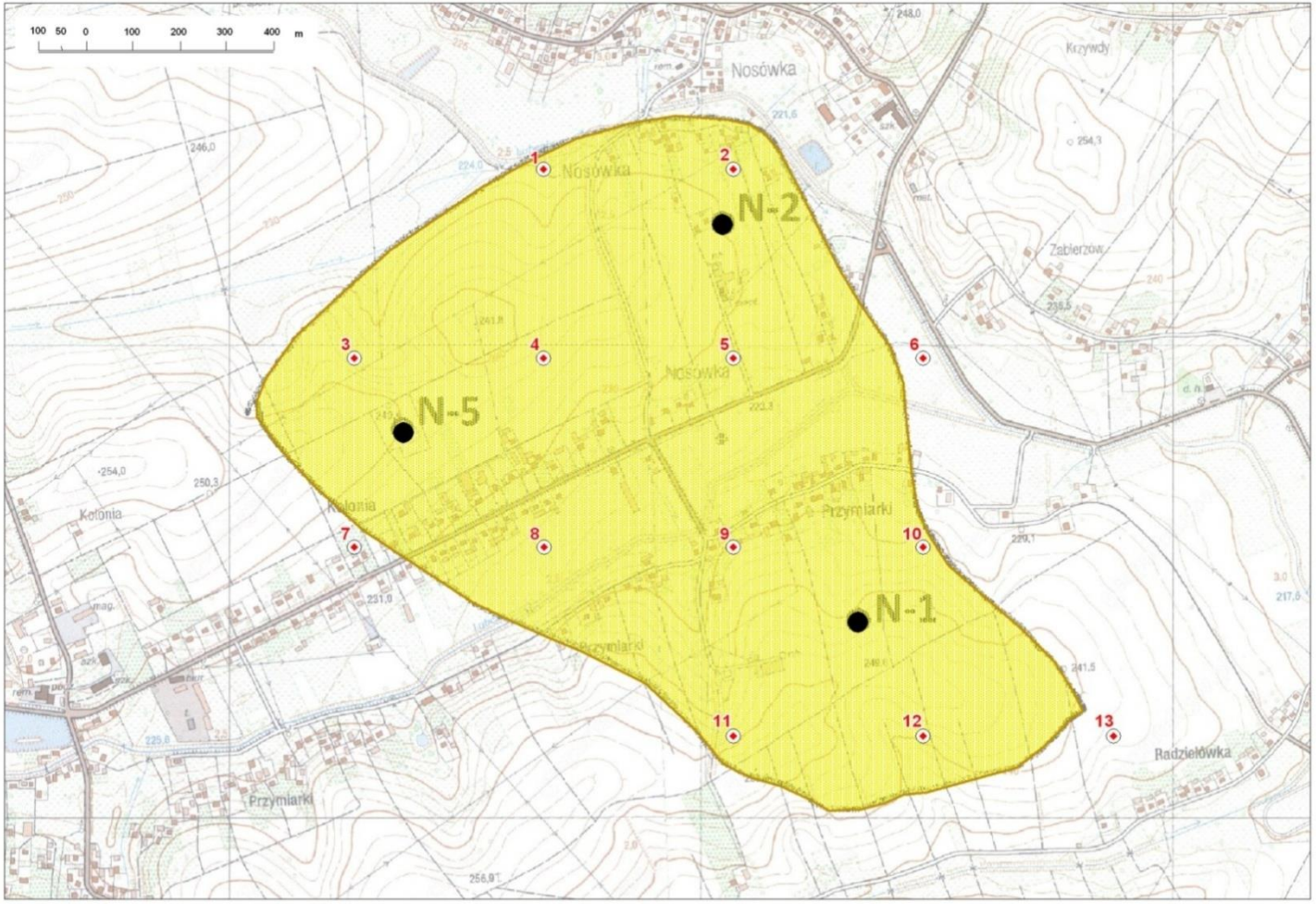


Fig. 1.1.18_219 Lokalizacja punktów do badań zmian sezonowych zawartości CO_2 na składowisku na obszarze złoża Nosówka

18-397

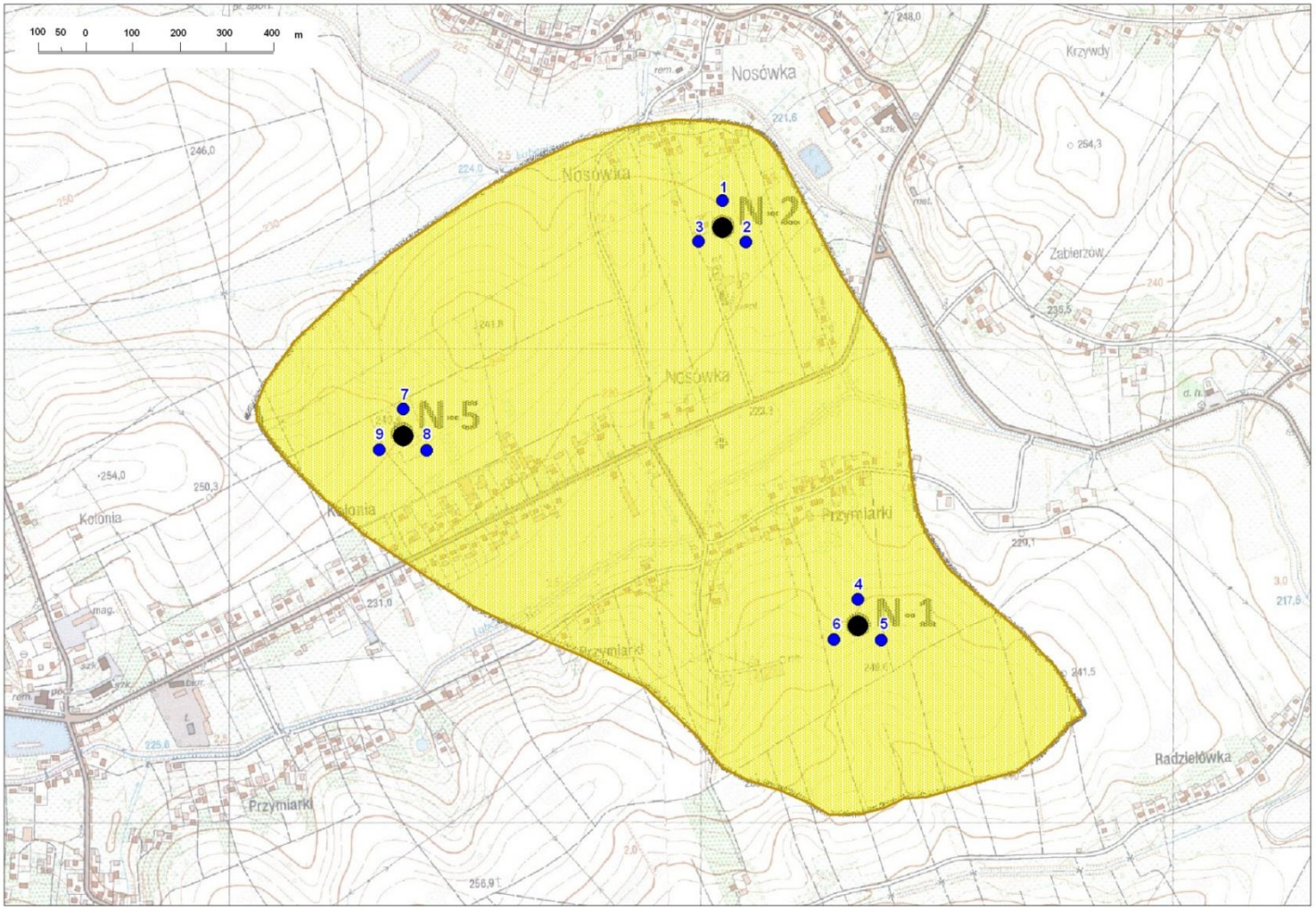


Fig. 1.1.18_220 Lokalizacja punktów ciągłego pomiaru zawartości CO_2 w powietrzu podglebowym wokół otworów na złożu Nosówka

Metodyka pomiarów strumienia CO_2

Pomiary naturalnego strumienia dwutlenku węgla prowadzi się przy wykorzystaniu zamkniętej komory. Strumień dwutlenku węgla mierzy się przy wykorzystaniu systemu pomiarowego złożonego z jednostki pomiarowej i jednej lub kilku komór pomiarowych oraz komputera (palmtopa) rejestrującego wyniki. System ten oprócz pomiarów strumienia dwutlenku węgla powinien mierzyć temperaturę gleby. Gotowe systemy pomiarowe tego rodzaju są produkowane np. przez firmę LI-COR Inc. umożliwiają one pomiary strumienia dwutlenku węgla jednorazowe i długoterminowe.

System pomiarowy strumienia naturalnego dwutlenku węgla może być również wykonany w oparciu o miernik wielogazowy z czujnikami na podczerwień (**Fig. 1.1.18_221**).

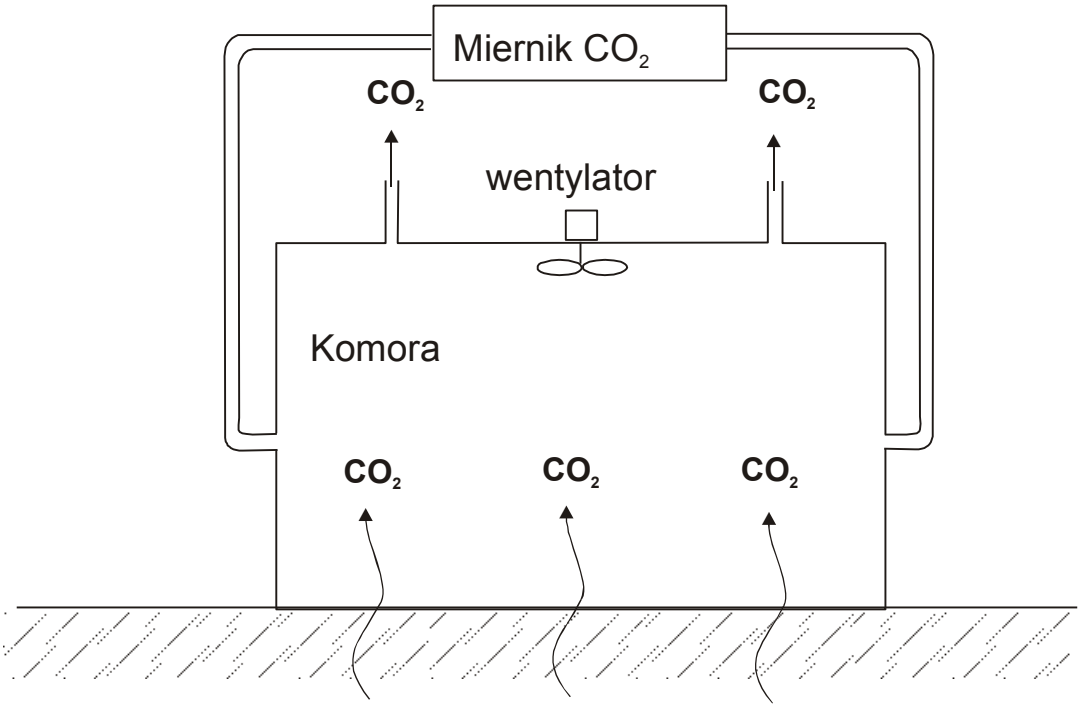


Fig. 1.1.18_221 Schemat komory do pomiaru strumienia dwutlenku węgla (Żak i in., 2008)

W planowaniu lokalizacji punktów pomiarowych strumienia dwutlenku węgla powinno się brać pod uwagę budowę geologiczną (litologię, tektonikę i warunki hydrogeologiczne), morfologię, hydrografię i zabudowę terenu.

Badania strumienia dwutlenku węgla powinny być wykonane na obszarze oddziaływania zatłaczanego gazu, na tym samym terenie gdzie będą wykonywane pomiary stężenia dwutlenku węgla. Planowane punkty pomiarowe strumienia CO_2 (13 szt.) będą rozmieszczone w siatce podstawowej o rozmiarach około 400 x 400 m (**Tab. 1.1.18_32**, **Fig. 1.1.18_222**).

Tab. 1.1.18_32 Lokalizacja punktów pomiarowych strumienia CO_2oraz poboru próbek do badań biomonitoringu na składowisku na obszarze złoża Nosówka

Punkt pomiarowy	Obszar	Współrzędne topograficzne*		Współrzędne geograficzne	
		X_1992	Y_1992	X2	Y2
1	NOSÓWKA	705660.5	243401.89	21° 52' 19,437" E	50° 1' 20,388" N
2	NOSÓWKA	706063.19	243405.86	21° 52' 39,663" E	50° 1' 20,015" N
3	NOSÓWKA	705262.1	242994.07	21° 51' 58,649" E	50° 1' 7,691" N
4	NOSÓWKA	705664.77	242998.05	21° 52' 18,872" E	50° 1' 7,319" N
5	NOSÓWKA	706067.46	243002.01	21° 52' 39,096" E	50° 1' 6,946" N
6	NOSÓWKA	706470.14	243005.99	21° 52' 59,319" E	50° 1' 6,573" N
7	NOSÓWKA	705266.37	242590.11	21° 51' 58,085" E	50° 0' 54,618" N
8	NOSÓWKA	705669.05	242594.08	21° 52' 18,307" E	50° 0' 54,246" N
9	NOSÓWKA	706071.73	242598.06	21° 52' 38,529" E	50° 0' 53,874" N
10	NOSÓWKA	706474.41	242602.03	21° 52' 58,751" E	50° 0' 53,500" N
11	NOSÓWKA	706076	242194.21	21° 52' 37,963" E	50° 0' 40,805" N
12	NOSÓWKA	706478.68	242198.18	21° 52' 58,183" E	50° 0' 40,432" N
13	NOSÓWKA	706882.54	242202.17	21° 53' 18,463" E	50° 0' 40,056" N

* – państwowy układ współrzędnych płaskich prostokątnych "1992"

Przy otworze zatłaczającym badania powinny być wykonywane w dodatkowych punktach pomiarowych. Na obszarze tym przewidziano punkty pomiarowe w siatce (25x25 m) wokół otworów. Ich lokalizację, po weryfikacji na podstawie prac terenowych, należy przedstawić na mapie topograficznej w skali 1:1000.

W każdym punkcie pomiary strumienia CO_2 powinny być wykonywane przez około 10 minut przy wykorzystaniu systemu automatycznego pomiaru LI-8100.

Wokół otworów można również prowadzić ciągły pomiar strumienia dwutlenku węgla przy wykorzystaniu systemu ciągłego pomiaru firmy LI-COR Inc.

Lokalizację punktów pomiarowych powinno się ustalić w terenie za pomocą urządzeń nawigacji satelitarnej GPS. Część punktów pomiarowych ze względu na występowanie trwałej nawierzchni, przeszkód terenowych może być przesunięte o niewielką odległość w stosunku do planowanej.

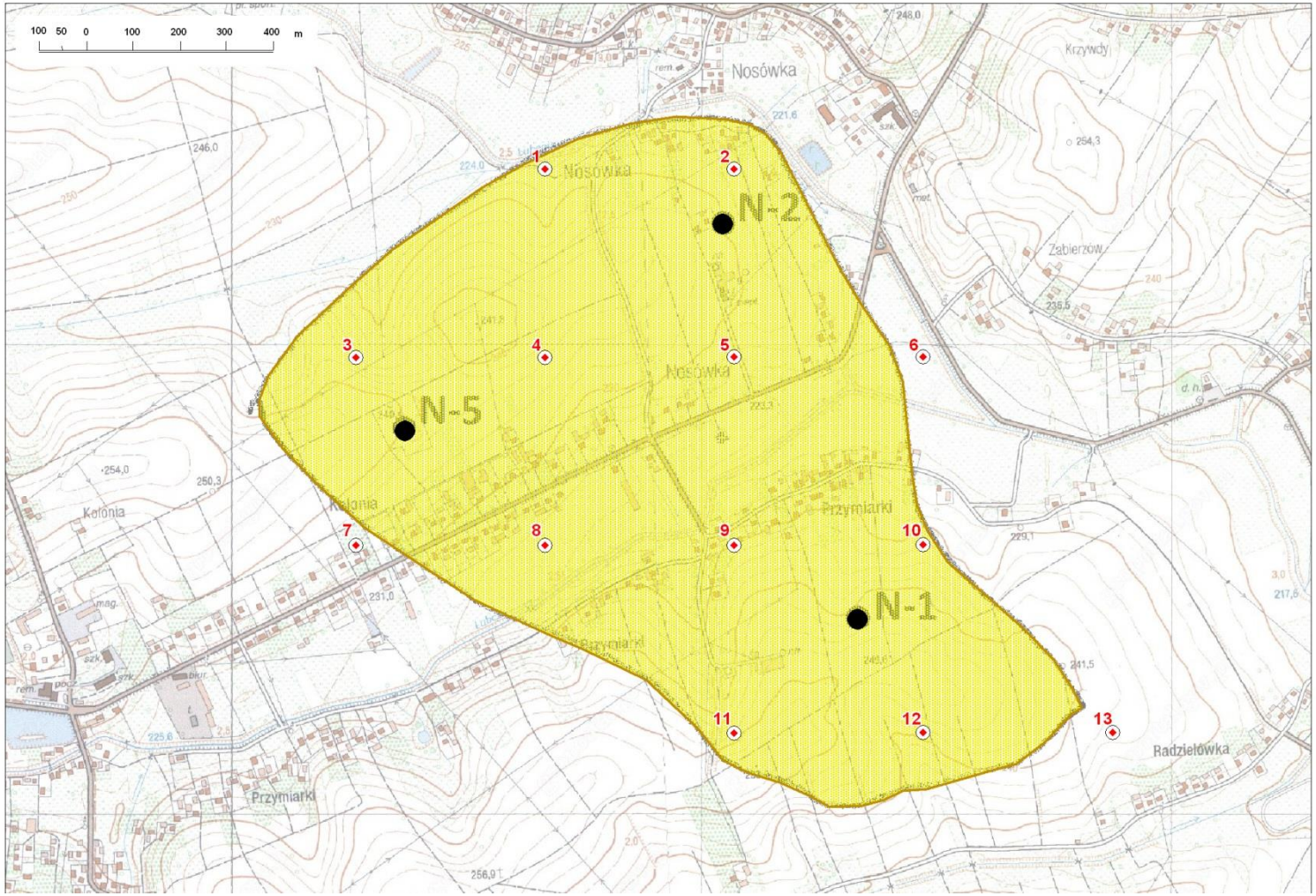


Fig. 1.1.18_222 Lokalizacja punktów pomiarowych strumienia powierzchniowego CO_2w powietrzu podglebowym i poboru próbek do badań biomonitoringu na składowisku na obszarze złoża Nosówka

Harmonogram pomiarów

Badania zawartości dwutlenku węgla w powietrzu podglebowym będą prowadzone w trakcie głównych etapów projektu: monitorowanie poziomu odniesienia, w czasie eksploatacji i po zamknięciu składowiska (**Tab. 1.1.18_33**).

Tab. 1.1.18_33 Harmonogram pomiarów zawartości CO_2 w powietrzu podglebowym, strumienia i biomonitoringu na składowisku na obszarze złoża Nosówka

Metoda badań		**Poziom odniesienia**	**Eksploatacja składowiska**	**Po zamknięciu składowiska**
Pomiar koncentracji CO_2	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_2	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

Harmonogram pomiarów stężenia CO_2 w powietrzu podglebowym

W ramach monitorowania poziomu odniesienia dla składowiska z obszaru proponuje się wykonanie następujących badań:

- szczegółowe zdjęcie 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 (dwukrotnie w sezonach wiosennym, letnim, jesiennym i zimowym),
- badania geochemiczne rozkładu stężeń CO_2 do głębokości 5 m w wybranych punktach – 2 razy w roku (sezon ciepły i chłodny),
- ciągłe pomiary zawartości CO_2 w powietrzu glebowym w zastabilizowanych punktach pomiarowych.

W trakcie eksploatacji składowiska CO_2 proponuje się wykonanie następujących badań geochemicznych zawartości dwutlenku węgla:

- szczegółowe zdjęcie 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,
- ciągłe pomiary zawartości CO_2 w powietrzu podglebowym w zastabilizowanych punktach pomiarowych.

Po zamknięciu składowiska z 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),
- ciągłe pomiary zawartości CO_2 w powietrzu podglebowym w zastabilizowanych punktach pomiarowych.

Harmonogram pomiarów strumienia CO_2

Pomiar strumienia dwutlenku węgla należy przeprowadzić w trakcie wszystkich głównych etapów projektu: monitorowanie poziomu odniesienia, w czasie eksploatacji i po zamknięciu.

W ramach monitorowania poziomu odniesienia dla składowiska na obszarze złoża Nosówka proponuje się wykonanie następujących badań strumienia dwutlenku węgla:

- badania tła strumienia dwutlenku węgla w siatce podstawowej na terenie składowiska – razy w roku,
- badania tła strumienia dwutlenku węgla w pobliżu otworu zatłaczającego – 4 razy w roku,
- ciągłe pomiary strumienia dwutlenku węgla w pobliżu otworów.

W trakcie eksploatacji składowiska na obszarze złoża Nosówka proponuje się wykonanie następujących badań strumienia dwutlenku węgla:

- badania strumienia dwutlenku węgla w siatce podstawowej na terenie składowiska – 2 raz w roku (sezon ciepły i zimny),
- badania strumienia dwutlenku węgla w pobliżu otworu zatłaczającego – 4 razy w roku,
- ciągłe pomiary strumienia dwutlenku węgla w pobliżu otworów.

Po zamknięciu składowiska na obszarze złoża Nosówka proponowane są następujące badania strumienia dwutlenku węgla:

- badania tła strumienia dwutlenku węgla w pobliżu otworu zatłaczającego – 4 razy w roku,
- ciągłe pomiary strumienia dwutlenku węgla w pobliżu otworów.

Program biomonitoringu dla składowiska Nosówka

Biomonitoring oparty będzie na badaniu zmian ilościowych wskaźnikowych mikroorganizmów i procesów życiowych będących wynikiem zmiany podaży dwutlenku węgla w środowisku glebowym wywołanej wyciekiem tego gazu z podziemnego składowiska.

Próby gruntowe pobierane z terenu składowiska CO_2 stanowią materiał do badań mikrobiologicznych wykonywanych w ramach prac monitoringowych. Przy poborze próbek należy uwzględnić odpowiednią lokalizację punktów i głębokość poboru oraz zachowanie jałowości 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, dostępności poszczególnych punktów poboru próbek), lokalizacji otworu zatłaczającego, geologii struktury, w tym prawdopodobnego przebiegu uskoków.

W celu uzyskania pełnej informacji o mikroflorze występującej na danym terenie, w środowisku gruntowym, próbki powinno się pobierać ze stałej głębokości (60-80 cm). Zróżnicowanie mikroflory w zależności od głębokości bytowania jest znaczne, gdyż 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.

Metodyka i harmonogram badań biomonitoringu

Proponuje się przeprowadzenie następujących prac w ramach biomonitoringu składowania dwutlenku węgla przed, w trakcie i po zatłaczaniu gazu:

- 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 prowadzić przez 2 lata lub do momentu rozpoczęcia eksploatacji składowiska dwutlenku węgla.

Monitoring mikrobiologiczny w czasie eksploatacji składowiska dwutlenku węgla i po jej zakończeniu prowadzić się będzie poprzez badania zmian ilościowych bakterii i procesów wskaźnikowych na obszarze składowiska. Badania mikroorganizmów wskaźnikowych należy prowadzić czterokrotnie w ciągu roku przez cały czas trwania zatłaczania dwutlenku węgla.

Pobór próbek będzie wykonany na obszarze całego składowiska w siatce o rozmiarach około 400 x 400 m (**Tab. 1.1.18_32, Fig. 1.1.18_222**). Próbki pobierane będą z głębokości 80 cm p.p.t. za pomocą świdra ręcznego z zachowaniem czystości mikrobiologicznej. Przewiduje się również pobór próbek w pobliżu otworu zatłaczającego i obserwacyjnych.

Program monitoringu (grawimetrycznego, elektromagnetycznego i elektrooporowego)stanu początkowego oraz w trakcie i po zakończeniu zatłaczania CO_2 dla obiektu Wilków (PBG)

(Marek Wojdyła, Zdzisław Żuk, Grzegorz Pacanowski, Cezary Ostrowski, Tomasz Bąk)

METODA GRAWIMETRYCZNA

Z przeprowadzonego oszacowania zdolności geologicznego składowania dwutlenku węgla (Wójcicki, 2005; Christensen, 2007) wynika, że największy potencjał umożliwiający sekwestrację dwutlenku węgla z dużych zakładów przemysłowych posiadają głębokie solankowe poziomy wodonośne. Dla stwierdzenie ich przydatności do długotrwałego uwięzienia dwutlenku węgla niezbędne jest dokładne rozpoznanie, a następnie, ze względu na w dużej mierze pionierski charakter geologicznej sekwestracji CO_2, rozważny wybór właściwego obiektu.

Obszar badań jest pokryty w całości półszczegółowym zdjęciem grawimetrycznym wykonanym w ramach szeregu opracowań w latach 60-tych XX w. przez Przedsiębiorstwo Poszukiwań Geofizycznych (obecnie PBG Sp. z o.o.) . Średnie zagęszczenie zdjęcia wynosi 2 pkt/km^2, a dokładność waha się w granicach ±0,044 - ±0,055mGal. (2,3).

Zgromadzone wówczas materiały znajdują się w *banku danych grawimetrycznych*. Wprawdzie służyły one do opracowywania map grawimetrycznych i modelowań gęstościowych 2D, ale należy pamiętać, że dokładność wyników interpretacji jest pochodną jakości materiałów źródłowych, które często nie odpowiadają stawianym obecnie wymogom. Dotyczy to stosowanego wcześniej podkładu topograficznego, braku poprawki topograficznej, używania przyrządów o małej dokładności, prostych metod interpretacji. Z konieczności istniejące dane służyły dotychczas do różnego rodzaju analiz zaburzeń pola siły ciężkości. Na podstawie tych materiałów opracowana została i do tej pory obowiązuje podstawowa mapa grawimetryczna anomalii siły ciężkości w redukcji Bouguera. Przy jej konstruowaniu przyjęto m.in. niestosowane od szeregu lat wartości siły ciężkości w systemie poczdamskim, wartości pola normalnego wg algorytmu Helmerta i współrzędne niestosowanego od lat układu Borowa Góra.

Bardzo złożona budowa geologiczna badanego terenu wskazuje na różnorodną genezę anomalii grawimetrycznych. Możliwymi źródłami zaburzeń pola grawitacyjnego są:

- ukształtowanie powierzchni stropowej utworów podtrzeciorzędowych
- zmiany miąższości w obrębia wapienia muszlowego i retu
- zmiany miąższości i wykształcenia facjalnego utworów cechsztynu
- zaburzenia tektoniczne w obrębie kompleksu permomezozoicznego
- ukształtowanie powierzchni stropowej paleozoiku i podłoża krystalicznego

CEL I ZAKRES BADAŃ

Zadaniem prac będzie uszczegółowienie obrazu grawimetrycznego wywołanego budową strukturalną rejonu w zasięgu struktury Wilków. Prace grawimetryczne są częścią szerokiego przedsięwzięcia, którego cel sprowadza się do dokładniejszego rozpoznania kompleksów geologicznych do głębokości około 2000 m, co w połączeniu z wynikami projektowanych prac geologicznych oraz badań innymi metodami geofizycznymi, przybliży rozwiązanie problemów związanych z przewidywaną geologiczną sekwestracją CO_2.

Zadania stawiane przed grawimetrią w zakresie prac terenowych obejmują:

- wykonanie zdjęcia o wysokiej dokładności pomiarów polowych na stanowiskach pomiarowych oddalonych od siebie o 150-250 m, przy użyciu przyrządów pomiarowych najnowszej generacji, lub
- stosowanie systemu punktów profilowych przy wzajemnych odległościach co 200 m wzdłuż linii planowanych pomiarów sejsmicznych, oraz systemu punktów rozproszonych pomiędzy profilami i w ich otoczeniu – punkty rozproszone przy odległościach względem siebie jak poprzednio 150-250 m.

W obu przypadkach zagęszczenie stanowisk pomiarowych wyniesie około 25 pkt/1 km^2.

W dalszych etapach prac prowadzonych w ramach monitoringu grawimetrycznego, należy zwiększyć ilość stanowisk pomiarowych do 200-400/1 km^2 w rejonach otworów służących do zatłaczania składowanego medium.

W ramach przetwarzania danych polowych i prac dokumentujących opracowane zostaną:

- katalog anomalii siły ciężkości w redukcji P. Bouguera,
- mapa anomalii Bouguera – podstawowa mapa grawimetryczna,
- ewentualnie inne mapy anomalii grawimetrycznych według zapotrzebowania.

Interpretacja materiałów grawimetrycznych dostarczy nowych informacji o budowie strukturalnej oraz tektonice w obrębie utworów permu i triasu jako perspektywicznych z punktu widzenia pozyskania bituminów, a także dla śledzenia morfologii stropu utworów podpermskich.

W ramach monitoringu grawimetrycznego planowane są cykliczne pomiary w odstępach kilkuletnich. Umożliwią one rozpoznanie dynamiki zmian zachodzących w rozkładzie masy utworów wokół składowisk dwutlenku węgla i w ich nadkładzie. Przedmiotem analizy będą różnicowe anomalie siły ciężkości w redukcji Bouguera (potocznie nazywane anomaliami pomierzonymi). Projekt powinien zakładać przeprowadzanie pomiarów monitorujących przez cały okres eksploatacji składowiska CO_2 oraz po zakończeniu, a wówczas proponowane są prace w takim samym zakresie, przy zachowaniu metodyki, lokalizacji i ilości pomiarów jak w ramach monitoring stanu początkowego. Pierwszy monitoring w trakcie eksploatacji powinien zostać przeprowadzony po 2 latach od rozpoczęcia zatłaczania, a potem co 3-4 lata. Po zakończeniu zatłaczania należy wykonywać ten sam zakres pomiarów co 5 lat.

Projektowane zdjęcie grawimetryczne obejmie obszar o powierzchni około 216 km^2 (18 km x 12 km). Przy średnim zagęszczeniu punktów pomiarowych wynoszącym 25 pkt/1 km^2, łącznie planowane jest założenie i wykonanie pomiarów na 5400 punktach grawimetrycznych.

Obszar prac rozciąga się od linii Krzepielów-Serby na wschodzie po Siedlnice i Klimontów na zachodzie.

Polowe prace geodezyjne

- założenie 5400 grawimetrycznych punktów pomiarowych: rozproszonych przy odległościach między punktami 150-250 m, oraz profilowych wzdłuż linii sejsmicznych przy kroku pomiarowym 200 m,
- określenie wysokości *h* dla 5400 punktów pomiarowych (niwelacja) z powtórzeniem pomiarów na ok. 5 % stanowisk. Średni błąd kwadratowy niwelacji nie powinien przekroczyć ±0,05 m. Niwelację należy dowiązać 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 5º (dla określenia poprawki topograficznej),
- lokalizacja punktów pomiarowych wg mapy topograficznej w skali 1:25 000 lub 1:10 000.

Pomiary grawimetryczne

- uzupełnienie istniejącej sieci grawimetrycznej o 3-4 punkty podstawowe przez wykonanie pomiarów 6-9 przęseł łączących te punkty z punktami osnowy grawimetrycznej. Możliwe też jest założenie mniejszej lub większej ilości punktów sieci grawimetrycznej. O uzupełnieniu (lub jedynie uaktualnieniu) sieci punktów podstawowych zadecyduje kierujący pracami polowymi po przeprowadzeniu wizji terenowej,
- wykonanie 5900 pomiarów siły ciężkości na 5400 stanowisk pomiarowych,
- wykonanie 500 nawiązawczych pomiarów siły ciężkości na stanowiskach bazowych (podstawowych), w tym także pomiary przęseł sieci podstawowej,
- 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 ±0,025 mGal.

Prace obliczeniowe i techniczne

- określenie dla każdego stanowiska pomiarowego współrzędnych *x* i *y* w układzie 1992 na podstawie pomiarów GPS,
- obliczenie dla wszystkich punktów pomiarowych wysokości *h* i wartości przyspieszenia siły ciężkości *g*,

- opracowanie modelu rzeźby terenu i obliczenie poprawki topograficznej w strefach do 20 km dla każdego punktu grawimetrycznego,
- obliczenie dla 5400 punktów pomiarowych wartości anomalii siły ciężkości w redukcji Bouguera dla stałej i zmiennej gęstości utworów warstwy redukowanej,
- zestawienie katalogu punktów pomiarowych zawierającego:
- współrzędne *x* i *y* w układzie 1992 [km],
- wartości przyspieszenia siły ciężkości *g* [mGal] w systemie IGSN 71,
- wysokości *h* punktów [m] dla poziomu odniesienia Kronsztadt,
- wartości anomalii w redukcji Bouguera [mGal] dla stałych i zmiennej gęstości utworów warstwy redukowanej oraz dla elipsoidy GRS 80,
- wartości sumaryczne poprawki topograficznej siły ciężkości [mGal],
- sporządzenie operatu pomiarowego.

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

Zestawienie materiałów z prac terenowych i obliczeniowych

Dane grawimetryczne z pomiarów terenowych i prac obliczeniowych dla każdego punktu pomiarowego zestawione będą, jak wspomniano wyżej w postaci katalogu, stanowiącego bardzo istotną część dokumentacji z wykonanych prac. Punkty pomiarowe, którym dwukrotnie wyznaczono współrzędne, wysokość lub przyspieszenie siły ciężkości, będą posiadały w katalogu uśrednione wartości tych parametrów.

Materiały dokumentujące wykonanie pomiarów grawimetrycznych i związanych z nimi robót geodezyjnych oraz prac obliczeniowych zestawione będą w postaci operatu pomiarowego i złożone w archiwum wykonawcy prac. W skład operatu wejdą między innymi:

- mapy dokumentacyjne (topograficzne) w skali 1:25 000 (lub 1:10 000),
- dzienniki niwelacyjne,
- dzienniki pomiarów grawimetrycznych.

PRACE GRAWIMETRYCZNE W ASPEKCIE ZAPEWNIENIA BEZPIECZEŃSTWA POWSZECHNEGO, BEZPIECZEŃSTWA PRACYI OCHRONY ŚRODOWISKA

Grawimetria należy do metod przyjaznych środowisku. Wykonanie pomiaru grawimetrycznego sprowadza się do dotarcia na zaplanowane miejsce i zarejestrowania przyspieszenia ziemskiego bez najmniejszej ingerencji w środowisko. W związku z tym wykluczone jest, aby projektowane badania w jakikolwiek sposób mogły wpłynąć niekorzystnie na grunty rolne, leśne lub szatę roślinną na terenie przewidywanych prac. Uwaga ta dotyczy również powietrza atmosferycznego jak i środowiska gruntowo-wodnego.

INTERPRETACJA DANYCH GRAWIMETRYCZNYCH

Do opracowania i wykreślenia map grawimetrycznych zastosowane będzie profesjonalne oprogramowanie: program SURFER firmy Golden Software Inc. oraz programy z pakietu OASIS montaj firmy Geosoft Inc. Wszystkie procedury w ramach sporządzania map wykonywane będą po zapisaniu danych początkowych w postaci siatek wyinterpolowanych wartości anomalii. W przypadku anomalii Bouguera zostaną utworzone, w zależności od potrzeb różne siatki interpolacyjne (siatki kwadratów). Mapy anomalii Bouguera będą opracowane na podstawie wartości anomalii wyliczonych dla gęstości stałej i/lub gęstości zmiennej (wg uzgodnień).

W ramach prac interpretacyjnych uzasadnione jest opracowanie następujących map grawimetrycznych:

- anomalii rezydualnych na podstawie filtracji częstotliwościowej lub według klasycznej metody Griffina dla zadanych głębokości planowanego rozpoznania,
- anomalii regionalnych przy zastosowaniu filtracji częstotliwościowej lub metody Griffina dla zobrazowania efektu grawitacyjnego pochodzącego od podłoża,
- gradientu poziomego i dekonwolucji Eulera dla rozpoznania elementów tektoniki i granic ciał wywołujących anomalie.

Wymienione wyżej mapy zostaną sporządzone po transformacjach rozkładu anomalii Bouguera. Metody przekształcania pomierzonego pola grawitacyjnego oraz parametry transformacji zostaną wybrane po analizie danych geologiczno-wiertniczych i ukierunkowane na rozpoznanie budowy struktury Wilków w założonym interwale głębokości.

Uzyskane dane grawimetryczne powinny być dostosowane do późniejszej kompleksowej interpretacji geofizycznej ukierunkowanej na dalsze rozpoznanie litologii oraz struktury i tektoniki rejonu badań.

Zmiany czasowe anomalii Bouguera

Okresowe pomiary grawimetryczne w cyklu kilkuletnim, wykonywane w ramach tzw. monitoringu grawimetrycznego doprowadzą do uzyskania anomalii Bouguera (w tych samych punktach) dla kolejnych serii pomiarowych. Różnice anomalii pomiędzy seriami (tzw. anomalie różnicowe) będą obrazowały zmiany gęstości objętościowej zachodzące w utworach skalnych zalegających pod analizowanym profilem czy rejonem badań. Analizie poddane będą różnice wartości pomiędzy daną serią i pierwszą, a także pomiędzy

kolejnymi seriami, co pozwoli ocenić dynamikę zmian rozkładu masy utworów skalnych w poszczególnych interwałach czasowych (Fajklewicz, 2007).

Forma udokumentowania wyników

Opracowanie końcowe będzie zwierało:

- część tekstową, w tym:
  - opis techniki i metodyki prac pomiarowych,
  - zakres wykonanych prac,
  - opis metodyki przetwarzania danych i interpretacji,
  - omówienie wyników i ich analizę,
- część graficzną w postaci opracowanych map grawimetrycznych - skala 1:50 000 (lub inna),
- część dokumentacyjną zapisaną na CD lub DVD, zawierającą:
- katalogi danych grawimetrycznych,
- podstawową mapę anomalii Bouguera.

Wszystkie zmiany zakresu prac interpretacyjnych i formy załączników będą uzgadniane na poszczególnych etapach prac z przedstawicielem Zamawiającego.

HARMONOGRAM ORAZ KOSZTORYS PRAC

Czas realizacji planowanych prac (w pierwszej serii i każdej następnej objętej monitoringiem) wyniesie 9-10 miesięcy. Poszczególne etapy wykonane będą w następujących terminach:

przeprowadzenie pomiarów terenowych – 6 miesięcy,

przetwarzanie danych – 1-2 miesiące,

opracowanie i analiza wyników, sporządzenie dokumentacji – 2-3 miesiące.

Koszt jednostkowy wykonania pomiarów i opracowania danych dla jednego punktu pomiarowego wyniesie 160 zł netto. Dla 5400 punktów łączny koszt to 862 500 zł.

UWAGI KOŃCOWE

Zleceniodawcy przysługuje prawo wprowadzania zmian do projektu, łącznie ze zmianą metodyki prac, w zależności od uzyskiwanych wyników, a także prawo przerwania prac terenowych, jeśli nie gwarantują uzyskania technicznie poprawnych rezultatów, pozwalających rozwiązać postawione zadanie.

Odpowiedzialność za właściwe i ekonomiczne wykorzystanie środków technicznych przeznaczonych na prace ponosi wykonawca.

W przypadku konieczności wprowadzenia zmian metodycznych w stosunku do określonych w projekcie lub też zmiany zakresu prac w wyniku nieprzewidzianych trudności terenowych, obowiązkiem wykonawcy jest wystąpić z odpowiednio umotywowanym wnioskiem do Zleceniodawcy o ich zmianę. Zmiany o których mowa, muszą być zaakceptowane przez Zleceniodawcę.

METODY ELEKTROOPOROWE

Przedmiotem projektu będą nowatorskie w Polsce badania niezbędne do opracowania i wdrożenia usługi, bezpiecznego i skutecznego rozpoznania skutków ewentualnej migracji dwutlenku węgla w utworach czwartorzędowych.

Prace zrealizowane zostaną za pomocą bezinwazyjnych metod geofizycznych, opartych o dwie metody geoelektryczne, tj metodę pionowych sondowań geoelektrycznych (SGE) i tomografii elektrooporowej (ERT).

Zakres rzeczowy prac badawczych wykonanych w ramach projektu obejmuje:

- inwentaryzację danych archiwalnych i opracowanie kryteriów wyboru polowych stanowisk badawczych na potrzeby zaprojektowania badań polowych;
- zaprojektowanie i wykonanie badań polowych w postaci pionowych sondowań elektrooporowych i tomografii elektrooporowej w promieniu 500 m od planowanego otworu;
- optymalizację processingu wyników badań geofizycznych;
- opracowanie szczegółowego przestrzennego modelu ośrodka geologicznego w otoczeniu otworu w granicy utworów czwartorzędowych
- określenie związków pomiędzy parametrami geofizycznymi a własnościami gruntu i wód gruntowych, oraz określenie ewentualnie dróg migracji dwutlenku węgla w utworach nieprzepuszczalnych;
- określenie miejsc do ewentualnego monitoringu.

CEL BADAŃ

Z uwagi na wymogi bezpieczeństwa, w rejonie podziemnego zbiornika dwutlenku węgla należy rozważyć występowanie przypowierzchniowych dróg migracji i wtórnych kolektorów gazu.

W przypadku planowanego zbiornika, strop jury i utworów trzeciorzędowych sięga stosunkowo płytko i przykryty jest serią osadów czwartorzędowych pochodzenia lodowcowego i rzecznego, o dużej zmienności facjalnej. Piaski rzeczne i fluwioglacjalne mogą być miejscem płytkiego nagromadzenia dwutlenku węgla w razie nieprzewidzianej, horyzontalnej migracji z głównego zbiornika, a także drogami migracji lateralnej.

Potencjalnymi płytkimi horyzontami izolującymi są poziomy iłów warwowych i glin zwałowych występujące na terenie planowanego zbiornika. Poziomy te jednak bywają porozcinane współczesnymi i kopalnymi dolinami rzecznymi, wypełnionymi osadami piaszczystymi i żwirami.

W przypadku zaistnienia płytkiej migracji dwutlenku węgla, stanowiłyby one drogi migracji pomiędzy wtórnymi kolektorami, a także umożliwiały migrację do powierzchni ziemi.

Dlatego zasadne jest rozpoznanie płytkiej budowy geologicznej, ze szczególnym uwzględnieniem występowania dolinnych rozcięć erozyjnych (współczesnych i kopalnych) oraz występowania warstw izolujących.

Badania płytkiej budowy geologicznej pozwoli na prawidłowe rozmieszczenie składowych systemu monitoringu.

Projekt zakłada przeprowadzanie pomiarów monitorujących przez cały okres eksploatacji składowiska Co2 oraz po zakończeniu w takim samym zakresie prac, przy zachowaniu metodyki, lokalizacji i ilości pomiarów jak monitoring stanu początkowego. Pierwszy monitoring w trakcie eksploatacji powinien zostać przeprowadzony po 2 latach od rozpoczęcia zatłaczania a potem co 3 lat. Po zakończeniu zatłaczania należy wykonywać ten sam zakres pomiarów co 5 lat.

OPIS METODY

Metody geofizyczne-geoelektryczne bazują na zjawisku rozchodzenia się prądu elektrycznego w środowisku gruntowo-wodnym.

Dla niniejszego przedsięwzięcia proponuje się wykonać badania w wariancie tomografii elektrooporowej (ERT), oraz pionowych sondowań geoelektrycznych (SGE).

Obydwie metody należą do grupy metod geoelektrycznych wykorzystujących zróżnicowanie przewodności/oporu elektrycznego ośrodka geologicznego. Są to metody powszechnie stosowane w rozpoznaniu utworów czwartorzędowych.

W zmianach wartości oporu elektrycznego odzwierciedlają się dwa najistotniejsze czynniki geologiczne: zróżnicowanie litologii i tektonika.

Utwory geologiczne o dużej zawartości materiału ilastego (np. gliny, iły, margle), charakteryzują się wyraźnie obniżonymi wartościami oporów elektrycznych, w stosunku do utworów piaszczystych.

Zastosowanie metod geofizycznych – elektrooporowych umożliwi rozpoznanie przestrzenne ośrodka geologicznego, w szczególności wydzielenie wysokooporowych utworów piaszczystych, piaszczysto żwirowych, należących do utworów przepuszczalnych i utworów niskooporowych (gliniastych, ilastych) zaliczanych do utworów nieprzepuszczalnych. Wiedza o przestrzennym położeniu tych utworów określi ew. drogi migracji dwutlenku węgla do powierzchni ziemi.

Badania elektrooporowe w wersji SGE są najczęściej stosowaną metodą geofizyczną w zagadnieniach związanych z problematyką rozpoznania osadów czwartorzędowych. Pozwalają na wydzielenie głębokości zalegania oraz określenie oporności właściwej kompleksów litologicznych. Korelacja wyinterpretowanych kompleksów elektrooporowych z opornościami typowymi dla poszczególnych typów litologicznych pozwala na interpretację geologiczną wyników badań.

Metoda sondowań geoelektrycznych-elektrooporowych (SGE) polega na wykorzystaniu zjawiska przepływu stałego prądu elektrycznego przez ośrodek geologiczny, które umożliwia określenie zróżnicowania oporu

elektrycznego różnych typów litologicznych skał, składających się na warstwy ośrodka geologicznego, z uwzględnieniem warunków ich występowania.

Sondowania SGE obejmują pomiary oporności elektrycznej ośrodka przy zastosowaniu zmiennych długości (rozstawów) układu pomiarowego. Bezpośrednimi wielkościami podlegającymi pomiarom są: natężenie prądu „I" w obwodzie zasilającym „AB", spadek napięcia „V" w obwodzie pomiarowym „MN".

Na podstawie analitycznych związków między zmierzonym oporem pozornym a wartościami oporu rzeczywistego i miąższościami poszczególnych warstw istnieje możliwość określenia budowy geologicznej.

Sondowania najczęściej wykonuje się w czteroelektrodowym symetrycznym układzie Schlumbergera.

Maksymalne rozstawy elektrod zasilających należy dobrać tak, aby uzyskać zasięg głębokościowy gwarantujący sięgnięcie do spągu utworów czwartorzędowych.

Przyjmuje się, iż głębokość (zasięg głębokościowy metody) w przybliżeniu można opisać zależnością H=AB/6. Przez AB rozumiemy maksymalny rozstaw elektrod zasilających.

Tomografia elektrooporowa, jest jedną z młodszych metod geoelektrycznych, powstałych niejako poprzez połączenie sondowań i profilowań geoelektrycznych.

W tomografii elektrooporowej pomiary mogą odbywać się na całej długości profilu w jednym procesie kontrolowanym przez aparaturę pomiarową. Wszystkie elektrody rozmieszczane są przed rozpoczęciem pomiarów wzdłuż całego badanego odcinka w stałych odległościach względem siebie. W trakcie pomiarów system mikroprocesorowy sukcesywnie uaktywnia odpowiednie grupy elektrod zgodnie z wybranym przez operatora układem pomiarowym. W efekcie wyniki profilowania rejestrowane są wzdłuż rozstawu pomiarowego ze szczegółowością odpowiadającą odległości rozmieszczonych elektrod.

Metoda ERT posiada wysoką szczegółowość pomiarów, pozwalającą na quasi ciągłe śledzenie zmian oporności lub przewodności elektrycznej badanego ośrodka, posiada też możliwość swobodnego wyboru i przełączania schematów układów pomiarowych bez konieczności zmiany położenia elektrod w istniejącej linii profilowania spośród układów najczęściej stosowanych w badaniach elektrooporowych. Pomiar oporności wzdłuż rozstawu pomiarowego odbywa się automatycznie pod kontrolą oprogramowania firmowego zapisanego w pamięci aparatury.

Zasięg głębokościowy metody tomografii elektrooporowej jest pochodną długości stosowanych rozstawów pomiarowych oraz w pewnym stopniu topografii terenu. Przyjmuje się iż zasięg głębokościowy metody jest wynosi ok. 1/5 długości rozstawu.

W badaniach elektrooporowych wykonanych na potrzeby niniejszego przedsięwzięcia rozstaw elektrod powinien wynosić od 5 do 10 m wzdłuż linii profilu.

ZAŁOŻENIA METODYCZNE PROJEKTOWANYCH BADAŃ.

Projektowane badania obejmują prace terenowe oraz analizę wyników i ich interpretację geologiczną:

W przypadku prac terenowych przewiduje się wykonanie dla każdego z wyznaczonych do zatłaczania otworów następujący zakres prac:

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

- W rejonie każdego otworu zatłaczającego przewiduje się wykonanie badań metodą tomografii elektrooporowej. Przewiduje się wykonanie 10 równoległych profili o długości 1000 m, odległych od siebie o 100 m. Badania takie powinny objąć 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.

Na podstawie wykonanych pomiarów powinien zostać stworzony model przestrzenny uwzględniający występowanie potencjalnych wtórnych kolektorów i dróg migracji w pobliżu otworów zatłaczających oraz w ich otoczeniu w miejscach występowania potencjalnych dróg płytkiej migracji.

Geofizyczne metody elektrooporowe, z uwagi na głębokość wymaganej prospekcji, oraz jednoznaczność rozróżniania skał porowatych od nieprzepuszczalnych doskonale nadają się do przeprowadzenia proponowanych badań.

Badania geofizyczne powinny zostać powiązane z wykorzystaniem niezbędnych otworów piezometrycznych, potrzebnych do kalibracji i weryfikacji geofizyki

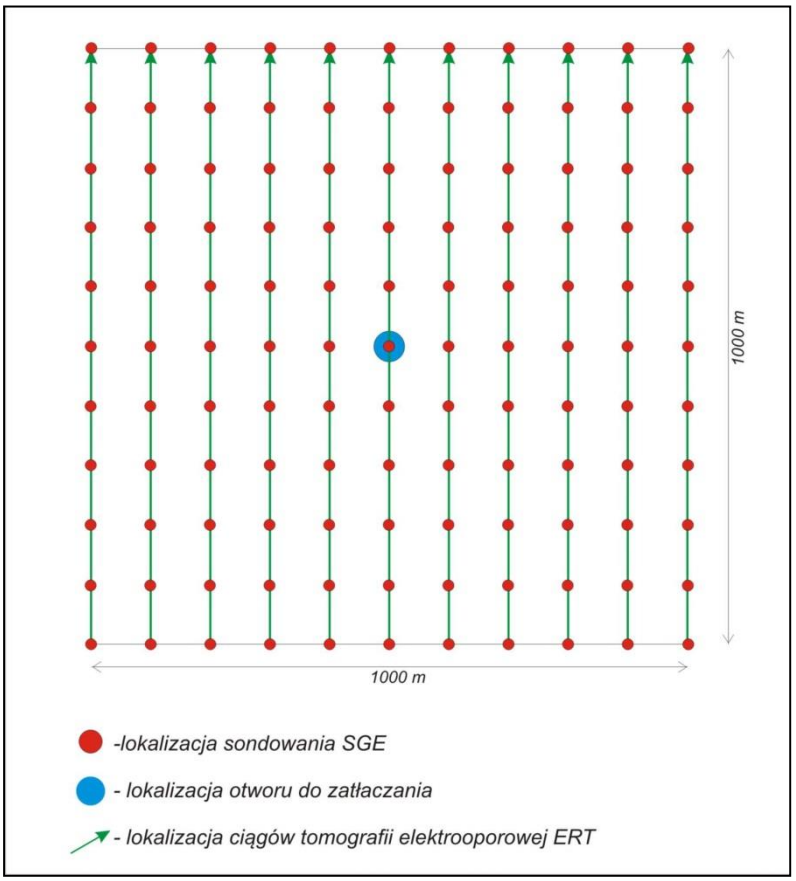


Fig. 1.1.18_223 Schemat badań geofizycznych przy otworach zatłaczających

PRACE DOKUMENTACYJNE

Proponowane prace dokumentacyjne będą składać się z trzech etapów: przygotowawczego, akwizycji danych oraz etapu interpretacji pomiarów i interpretacji geologicznej.

Etap przygotowawczy. Na podstawie map topograficznych zostanie wyznaczona siatka pomiarowa obejmująca, w zależności od przyjętego wariantu prac, rejon otworów zatłaczających lub cały obszar składowiska z zagęszczeniem siatki pomiarowej w rejonach otworów zatłaczających.

W sąsiedztwie otworów zatłaczających (kwadrat o boku 1 km ze środkiem w miejscu otworu zatłaczającego) siatka pomiarowa zostanie wyznaczona co 100 m i profilami pomiarowymi tomografii elektrooporowej również co 100 m. Założona siatka zostanie przeanalizowana i zmodyfikowana pod kątem możliwości wykonania pomiarów. Na podstawie materiałów topograficznych zostaną wyliczone współrzędne topograficzne punktów pomiarowych, które posłużą do lokalizacji w terenie z użyciem odbiorników GPS.

Akwizycja danych. Pomiary SGE zostaną wykonane w miejscach zaplanowanych przy pomocy standardowej procedury sondowań geoelektrycznych, symetrycznym układem Schlumbergera, o maksymalnym rozstawie linii zasilającej AB do 320 m, zapewniającym zasięg głębokościowy nie mniejszym niż 50 m., z użyciem stałoprądowej cyfrowej aparatury typu AGD-04 zasilanej akumulatorami z przetwornicą prądu stałego i typowym osprzętem pomiarowym, na który składają się elektrody uziemiające, oraz kable pomiarowe i podłączeniowe.

W metodzie tomografii elektrooporowej wykorzystana zostanie aparatura ARES produkcji czeskiej firmy GF Instruments. Pomiary wykonane zostaną w układzie elektrod wg. schematu Schlumbergera. Wytyczone profile pomierzone zostaną z odstępem elektrod wzdłuż linii profilu wynoszącym 5 m. W pomiarach zasięg głębokościowy rozpoznania oporności ośrodka wyniesie do 70-80 m głębokości względem powierzchni terenu. W metodzie tomografii elektrooporowej pomiar oporności wzdłuż rozstawu pomiarowego odbywa się automatycznie pod kontrolą oprogramowania firmowego zapisanego w pamięci aparatury.

Interpretacja. Interpretacja uzyskanych rezultatów, krzywych pomiarowych SGE wykonana zostanie metodą modelowania matematycznego z wykorzystaniem specjalistycznego oprogramowania komputerowego IPI2win. W rezultacie interpretacji określone zostaną granice warstw różniących się opornością elektryczną i wartości tej oporności w poszczególnych, wydzielonych warstwach.

Do przetwarzania danych tomografii elektrooporowej wykorzystany będzie program Res2Dinv firmy Geotomo Software. Wyniki pomiarów metodą tomografii elektrooporowej, standardowo przedstawiane są w postaci przekrojów izoliniowych, obrazujących zmiany oporności w badanym ośrodku w układzie 2D: odległość wzdłuż linii profilowania i głębokość względem powierzchni badań.

Na podstawie prac archiwalnych i otworów geologicznych, określone zostaną szacunkowe przedziały oporności odpowiadające kompleksom litologicznym. Przyporządkowanie to będzie podstawą do interpretacji geologicznej rezultatów badań SGE i ERT.

Na podstawie danych geofizycznych zaproponowany zostanie przestrzenny model płytkiej budowy geologicznej, zaprezentowany jako seria przekrojów geofizycznych z interpretacją geologiczną, oraz jako baza danych GIS.

HARMONOGRAM ORAZ KOSZTORYS PRAC

Rozpoznanie budowy geologicznej przy otworach zatłaczających:

SGE w siatce co 100 m (121 SGE), w sumie ilość otworów zatłaczających x 121 SGE, 500 zł za sondowanie – ilość otw. x 121 x 500

Ilość otworów zatłaczających, profile ERT co 100 m (11 km ERT), w sumie ilość otworów zatłaczających x 11 km ERT, 8000 zł za 1 kmb profilu.

Proponowane prace geoelektryczne w tym systemie badań przy czterech otworach zatłaczających wyniosły by ok. 594 000 zł.

Przewidywany okres prac terenowych ok. 2 miesiące, interpretacja danych pomiarowych 2 miesiące, opracowanie dokumentacji 1 miesiąc – łącznie 5 miesięcy.

Cena obejmuje stworzenie przestrzennego modelu płytkiej budowy geologicznej.

METODY ELEKTROMAGNETYCZNE

Prace geoelektryczne wykonane zostaną metodą magnetotelluryczną MT/AMT (w paśmie magnetotellurycznym – MT i audiomagnetotellurycznym – AMT). Wykorzystana zostanie aparatura geoelektryczna serii system2000.net produkcji kanadyjskiej firmy Phoenix Geophysics Ltd. Projekt prac obejmuje wykonanie prac pomiarowych wraz z przetwarzaniem i interpretacją danych wzdłuż 7 profili o łącznej długości około 28 km. Opcjonalnie przewiduje się wykonanie pomiarów metoda polaryzacji wzbudzonej z zastosowaniem metodyki pozwalającej na określenie konturu złoża (kontakt węglowodór – woda złożowa). Pomiary takie pozwolą na określenie aktualnego stanu zagospodarowania złoża oraz badanie [przepływu medium w czasie.

Badania MT/AMT polegają w ogólnym ujęciu na rejestracji składowych naturalnego lub sztucznego pola elektromagnetycznego na powierzchni Ziemi i obliczeniu na ich podstawie rozkładu oporności w ośrodku geologicznym a następnie interpretacji tego rozkładu tj. powiązaniu wydzielonych kompleksów geoelektrycznych z kompleksami geologicznymi. Wspólną cechą wyróżniającą grupę metod magnetotellurycznych jest charakterystyczna konfiguracja pola źródłowego. W założeniu jest to płaska fala elektromagnetyczna padająca z góry prostopadle do powierzchni Ziemi. Metody audiomagnetotelluryczna (AMT) i magnetotelluryczna (MT) wykorzystują źródła naturalne, czyli rezonansowe drgania jonosfery wzbudzone przez zmienne natężenie wiatru słonecznego oraz odległe wyładowania atmosferyczne w strefie.

Metoda polaryzacji wzbudzonej IP jest rozszerzeniem metody elektrooporowej o dodatkowy pomiar „zdolności" ośrodka geologicznego do gromadzenia ładunków elektrycznych. Efekt elektryczny spolaryzowanych pod wpływem impulsu prądu elektrycznego obiektów geologicznych, generujących zanikający w czasie prąd elektryczny, może być obserwowany, najlepiej po wyłączeniu prądu wzbudzającego, na powierzchni Ziemi. Efekt polaryzacji wzbudzonej uwidacznia się na zewnątrz jako zmiana oporności zespolonej w funkcji częstotliwości prądu polaryzującego (pomiary w domenie częstotliwości), bądź jako zmiana oporności w czasie. Zjawisko polaryzacji w ośrodku skalnym można traktować jako formę gromadzenia energii elektrycznej. Powszechnie uważa się, że głównym źródłem potencjałów polaryzacji wzbudzonej są procesy elektrochemiczne zachodzące na granicy ciało stałe – roztwór. Adsorpcja i dyfuzja jonów, transfer elektronów, pojemność warstwy podwójnej i cały szereg innych czynników decyduje o wartości oporności zespolonej skał, których pory wypełnione są przynajmniej częściowo roztworem wodnym.

Przedmiotem interpretacji geofizycznej jest analiza zmienności oporności elektrycznej oraz parametrów polaryzacji wzbudzonej w ośrodku geologicznym i następnie powiązanie ich ze zmianami litologicznymi tego ośrodka.

Zakres oraz cel prac

Celem projektowanych prac magnetotellurycznych jest monitoring składowiska przed rozpoczęciem składowania CO_2, w czasie eksploatacji składowiska i po jej zakończeniu. Prace magnetotelluryczne będą zatem koncentrowały się na rozpoznaniu budowy geologiczno-strukturalnej rejonu projektowanych prac, pod kątem zbadania własności geoelektrycznych potencjalnego składowania CO2 w wyeksploatowanych

złożach gazu ziemnego P1 ze zwróceniem szczególnej uwagi na piaskowcowe poziomy zbiornikowe i przewodnie horyzonty uszczelniające, jak również rozpoznania tektoniki, a tym samym wskazania kierunku rozwoju stref zaburzonych tektonicznie, spękanych i przepuszczalnych, które mogłyby być potencjalną drogą ucieczki CO_2.

Terenowe prace magnetotelluryczne obejmą wykonanie 120 sondowań metodą MT/AMT wzdłuż siedmiu profili o łącznej długości około 28 kilometrów z zadaniem kroku pomiarowego wynoszącym około 250 m, jak również wykonanie sondowań parametrycznych MT/AMT w pobliżu otworów wytypowanych do zatłaczania CO_2. Prace metodą polaryzacji wzbudzonej (IP) wykonane zostaną w celu określenia konturu złoża oraz zmian jego geometrii w trakcie eksploatacji składowiska CO_2. Prace terenowe polegać będą na wykonaniu conajmniej siedmiu profili IP wzdłuż profili magnetotellurycznych. Istotną różnicą w stosunku do prac MT/AMT będzie ciągły rozkład mierzonego parametru (w stosunku do dyskretnych pomiarów MT/AMT) polegający na usytuowaniu elektrod pomiarowych (MN) wzdłuż profilu „na styk" z korkiem, rozumianym tu jako długość dipola pomiarowego równym 50 metrów.

Zakres prac polowych przedstawiono na **Fig. 1.1.18_224**. Oprócz wspomnianych powyżej prac obejmujących 28 km profili MT/AMT/IP wkreślono także dodatkowe profile (2 km) do wykonania metodą polaryzacji wzbudzonej. Ich wykonanie przewiduje się w przypadku monitoringu składowiska CO_2 w celu dodatkowego uszczegółowienia stanu przepływu medium w złożu (składowisku)

Charakterystyka dotychczasowych prac elektromagnetycznych w rejonie badań

W obszarze projektowanych prac nie udokumentowano dotychczas głębokich badań magnetotellurycznych oraz polaryzacji wzbudzonej. W najbliższym sąsiedztwie, na północ od złoża Wilków zlokalizowane są sondowania MT wykonane w 2007 roku w ramach prac na profilu Zgorzelec – Wiżajny (finansowane przez Ministerstwo Środowiska). Prace te miały jednak charakter regionalny, zatem nie ma możliwości wykorzystania pozyskanych wyników w ramach niniejszego zadania.

Wpływ prac na środowisko naturalne i obiekty budowlane

Metodyka pomiarów magnetotellurycznych nie wymaga prac ziemnych (typu wykopy, wiercenia) czy prac strzałowych, dzięki czemu problem ochrony środowiska naturalnego przy ich realizacji w zasadzie nie występuje. Najistotniejsze elementy środowiska geologicznego: warunki hydrogeologiczne i struktura warstwy przypowierzchniowej w trakcie oraz po zakończeniu pomiarów pozostają nienaruszone. Oddziaływanie projektowanych prac magnetotellurycznych dotyczyć będzie tylko:

- zmian powierzchni terenu: niewielkie szkody mogą powstać jedynie w uprawach rolnych przy instalowaniu układów pomiarowych polegającym na rozwinięciu kabli o długości maksymalnie 75 m (długość pojedynczego dipola) i uziemieniu elektrod oraz zakopaniu sond magnetycznych w płytkich dołkach, które są lokalizowane na nieużytkach lub polach uprawnych aktualnie niewykorzystanych. Szkody tego typu są usuwane na bieżąco poprzez przywrócenie stanu pierwotnego miejsc uziemień. Dojazdy do projektowanych profili realizowane będą z wykorzystaniem istniejącej sieci dróg, co umożliwia ograniczenie szkód w uprawach rolniczych i leśnych.

- zanieczyszczenia powietrza spalinami: samochody będą powodowały krótkotrwałe zanieczyszczenie spalinami, ale nie większe niż przy normalnym ruchu kołowym na drogach dojazdowych. Wynika to ze specyfiki prac polowych, rozwinięcie i zwinięcie układu pomiarowego wymaga tylko dojazdu i dowiezienia sprzętu i ludzi.

- zagrożenia hałasem emitowanym w minimalnym stopniu przez pracujące silniki samochodowe.

Badania metodą IP na profilach pomiarowych nie odbiegają swoją metodyką a zatem i wpływem na środowisko naturalne od pomiarów MT/AMT. Natomiast istotne różnice istnieją w trakcie wykonywania badań w miejscu lokalizacji tzw. układu prądowego. Układ prądowy, będący źródłem fali elektromagnetycznej zbudowany jest z dipola o zmiennej długości zależnej od przyjętej metodyki prac (od kilkudziesięciu metrów do kilku kilometrów). Są to dwie grupy elektrod stalowych połączonych kablem do zlokalizowanego w środku tego układu transmitera prądu TXU-30. Transmiter zasilany jest generatorem prądotwórczym o mocy ok. 40 kW. Należy więc zasygnalizować, iż w trakcie cyklu pomiarowego trwającego ok. 1 godziny może występować zagrożenie hałasem spowodowane pracą generatora (ok. 70 dB). Planuje się wykonywanie 2-3 cykli pomiarowych dziennie. Metodyka pomiarów IP pozwala jednak na lokalizowanie układu prądowego (TXU-30 + generator) w miejscach gdzie ich praca nie będzie uciążliwa dla środowiska naturalnego, tj. ludzi i zwierząt.

Podsumowując należy stwierdzić, iż planowane prace elektromagnetyczne oddziaływać będą na wszystkie elementy środowiska w stopniu nikłym, w sposób krótkotrwały i przejściowy.

Technika oraz metodyka prac geoelektrycznych (MT/AMT)

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 – profilowe i parametryczne (MT/AMT)

Jedną z metod wykorzystaną w badaniach będzie metoda sondowań magnetotellurycznych w paśmie magnetotellurycznym – MT i audiomagnetotellurycznym – AMT (**Fig. 1.1.18_225**). Krok pomiarowy punktów podstawowych (5-cio składnikowych: Ex, Ey, Hx, Hy i Hz) wynosił będzie, w zależności od warunków topograficznych 500 metrów. Dodatkowo, do każdego punktu podstawowego wykonany zostanie punkt dodatkowy, 2-składnikowy (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 i MTC-50A,

Prace terenowe będą polegały 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 – 10000 Hz. Ze względu na spodziewany wysoki poziom zakłóceń elektromagnetycznych w rejonie złoża czas rejestracji dla omawianych badań, na jednym punkcie pomiarowym nie powinien być krótszy niż 42 godziny. Taki, wydłużony w stosunku do standardowych pomiarów MT czas rejestracji pozwoli na otrzymanie odpowiedniej statystyki potrzebnej do wiarygodnej estymacji impedancji.

Podstawowy układ pomiarowy sondowań MT/AMT składał 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 E_x, E_y, oraz trzech czujników magnetycznych typu AMTC-30 (pasmo AMT) i MTC-50(A) (pasmo MT) do pomiaru składowych odpowiednio H_x, H_y, H_z, lokalizowanych w pobliżu środka 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 uziemień 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 metodą polaryzacji wzbudzonej (IP)

Podstawowy układ pomiarowy zastosowany przy pomiarze metodą IP (**Fig. 1.1.18_226**) dla jednego odbiornika sygnału składać się będzie z 3 dipoli elektrycznych (MN) ułożonych w linii profilu. Długość dipoli wynosić będzie 50 m. Źródłem prądu będzie układ nadawczy zbudowany z dwóch grup elektrod stalowych (AB). Długość dipola prądowego zależna będzie od przyjętej metodyki prac i wynosić może do kilku kilometrów. Grupy elektrod podłączone będą do transmitera (nadajnika). Transmiter zasilany będzie prądnicą. Przebiegi czasowe zapisywane będą na karcie pamięci zainstalowanej w sterowniku nadajnika podłączonym do transmitera.

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

Przetwarzanie danych i prace interpretacyjne

Przetwarzanie danych pomiarowych odbywać się będzie w dwóch etapach. Etap pierwszy to tzw. pre-processing obejmujący także kontrolę jakości i wykonywany będzie bezpośrednio w trakcie prac polowych.

W etapie drugim, właściwym, 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 sondowań MT/AMT możliwe będzie także modelowanie 3D pozwalające na przestrzenną analizę zmienności oporności w ośrodku geologicznym.

Harmonogram oraz kosztorys prac elektromagnetycznych

W przypadku prac MT/AMT planuje się wykonanie siedmiu profili o łącznej długości około 28 km oraz dodatkowych sondowań parametrycznych w pobliżu otworów wiertniczych. Krok pomiarowy dla prac MT/AMT wynosić będzie 250 m. W sumie wykonane zostanie około 120 punktów pomiarowych MT/AMT wzdłuż profili oraz 10 sondowań parametrycznych. Czas wykonania prac polowych szacuje się na 1,5 miesiąca. Prace kameralne (przetwarzanie danych i interpretacja) nie powinien przekroczyć 2 miesięcy o zakończeniu prac terenowych. Łączny koszt prac (akwizycja danych wraz z przetwarzaniem i interpretacją) ocenia się na kwotę 950 000,oo PLN (*słownie dziewięćset pięćdziesiąt tysięcy)*.

W przypadku metody IP planuje się wykonanie 7 a docelowo 14 profili pomiarowych, z czego siedem profili będzie zlokalizowanych wzdłuż profili MT/AMT a pozostałych pięć wykonywanych będzie już w trakcie eksploatacji składowiska. Z tego tytułu wygodniejszym jest podanie ceny całości prac (akwizycja, processing i interpretacja) w rozbiciu na jeden kilometr bieżący profilu. Koszt prac metodą polaryzacji wzbudzonej szacuje się zatem na 4800 PLN/kmb co daje przykładowo dla pierwszego etapu prac kwotę 134 000 PLN (słownie sto trzydzieści cztery tysiące 00/100). Czas wykonania praz terenowych, przetwarzania i interpretacji metodą IP szacuje się na okres 1,5 miesiąca dla siedmiu profili pomiarowych.

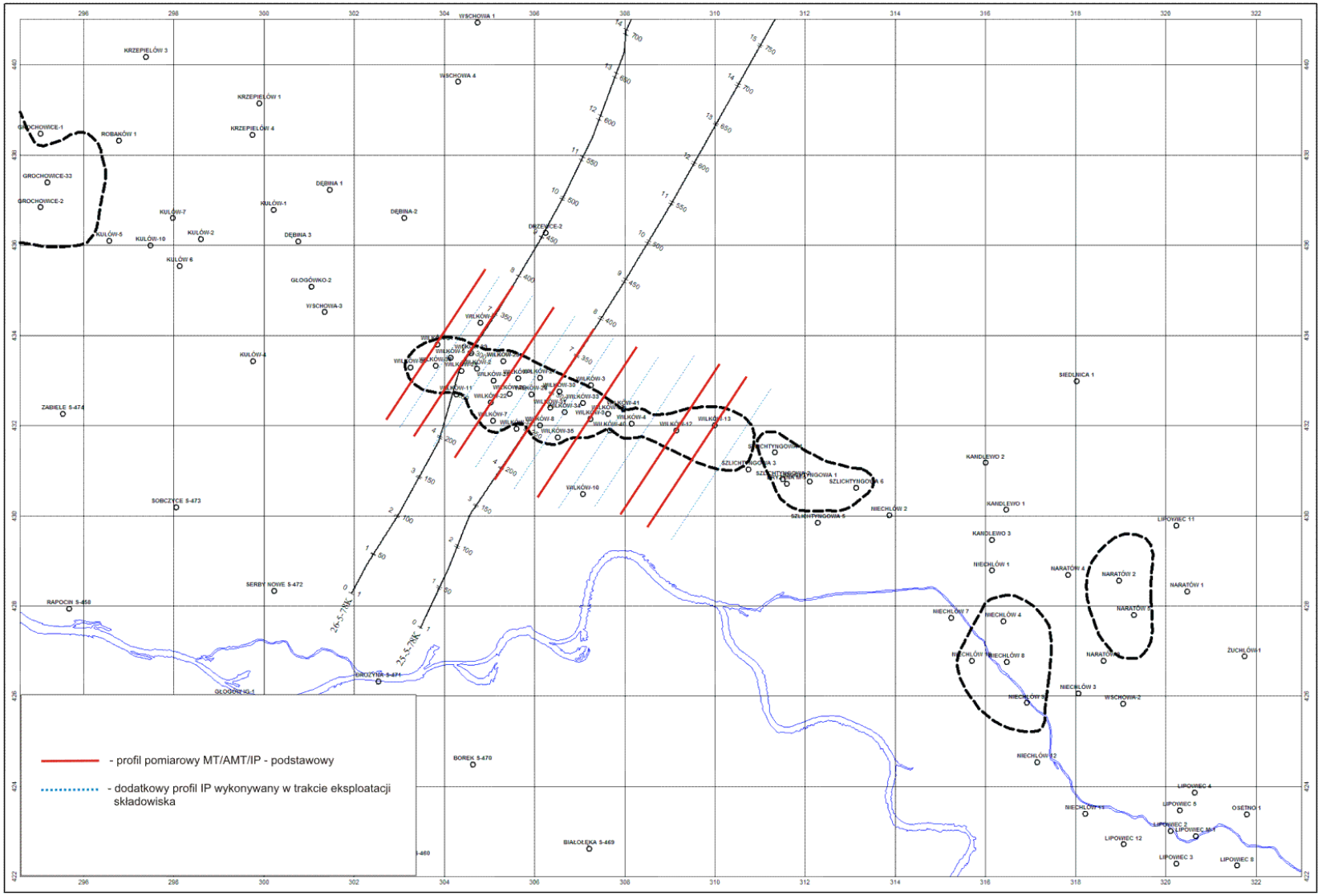
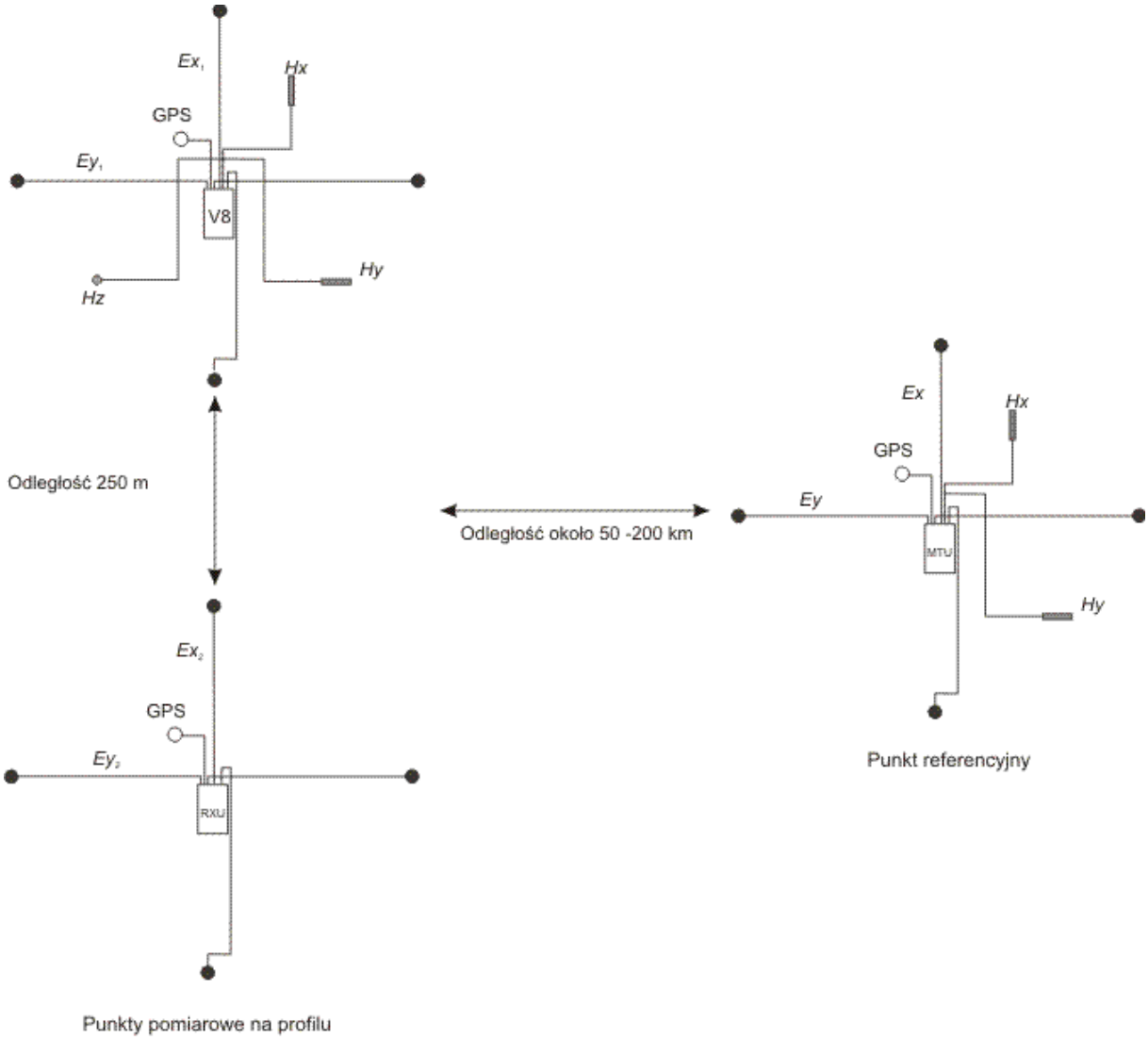


Fig. 1.1.18_224 Schemat projektowanych profili pomiarowych na złożu Wilków



Objaśnienia:

Hx, Hy - czujniki poziomych składowych pola magnetycznego

Ex, Ey - dipole prądowe

RXU - dwukanałowy odbiornik składowych pola elektrycznego

V8 - pięciokanałowy odbiornik składowych pola elektrycznego i magnetycznego

Hz - czujnik pionowej składowej pola mgnetycznego

- elektroda niepolaryzująca

- odbiornik GPS

Fig. 1.1.18_225 Schemat układu pomiarowego sondowań magnetotellurycznych

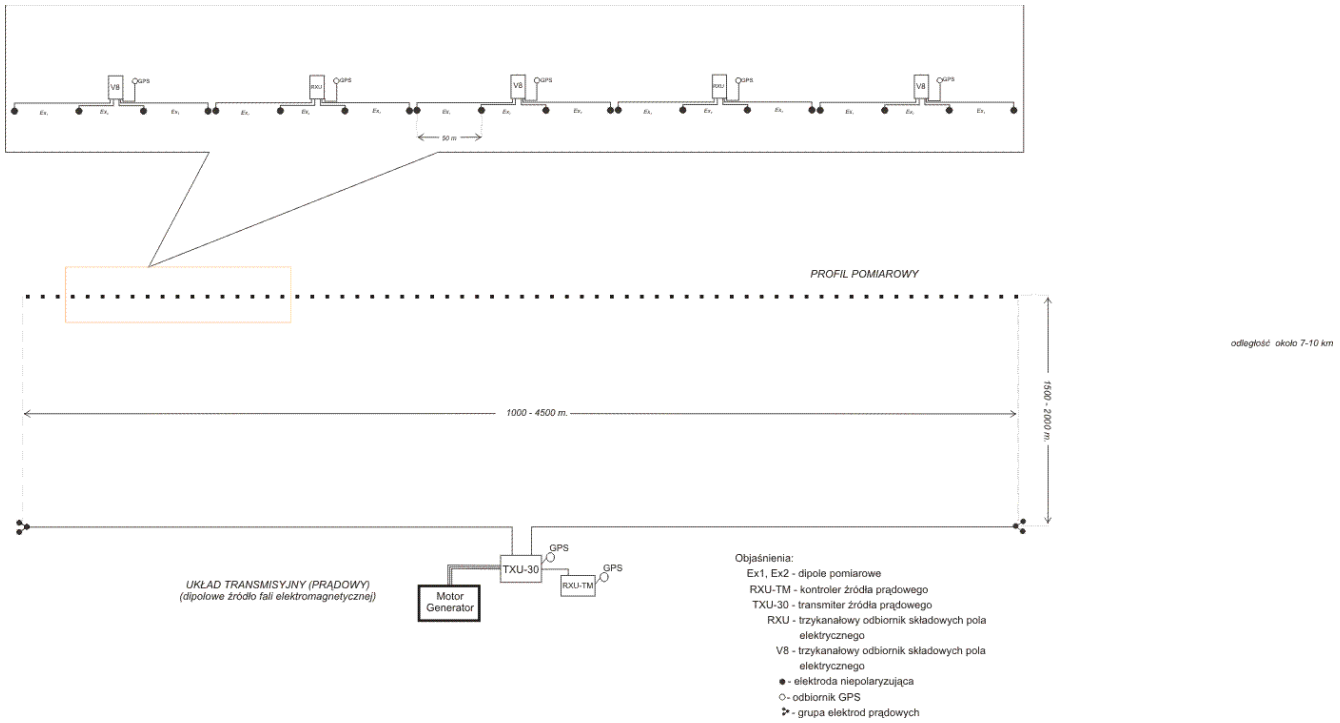


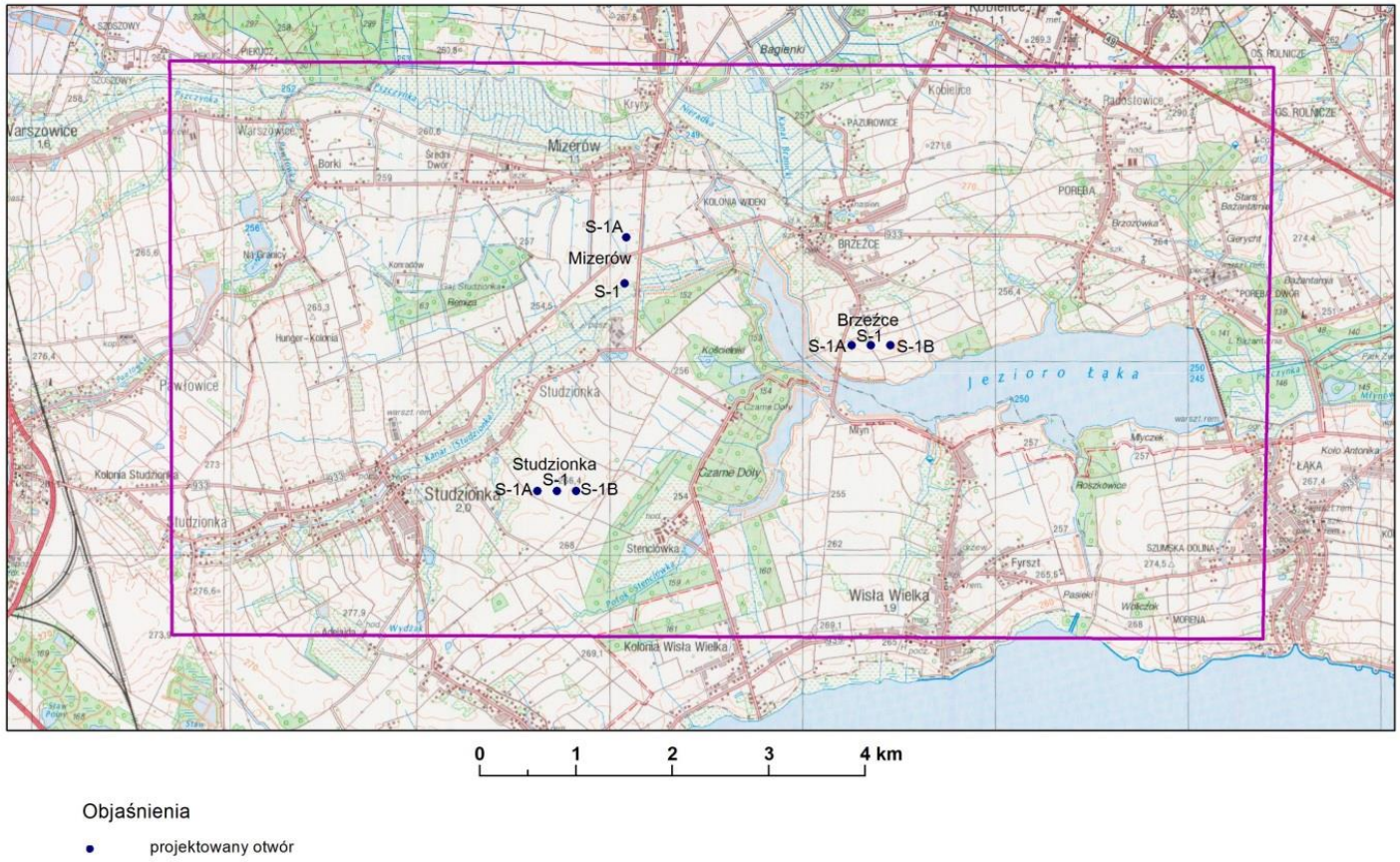
Fig. 1.1.18_226 Schemat układu pomiarowego polaryzacji wzbudzonej – układ ekwatorialny

Obiekt w pokładach węgla

Zgodnie z wnioskami z prac przeprowadzonych w ramach zadania **1.1.17** definitywne określenie możliwości bezpiecznego geologicznego składowania oraz późniejsze monitorowanie zachowania się zatłoczonego CO2 dla rozpatrywanych obiektów wymaga dokładnego rozpoznania kompleksu składowania. Do tego celu niezbędne jest zgodnie z zasadami sztuki wykonanie przed zatłaczaniem monitoringu zerowego (Chadwick et al., 2008). Z kolei prace wykonane w ramach monitoringu zerowego powtarza się z różną częstotliwością, w zależności od metody i etapu projektu demonstracyjnego, w trakcie zatłaczania 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*).

W przypadku obiektu w pokładach węgla w ramach niniejszego zadania opracowano:

- założenia do projektu wiercenia i wyposażenia otworów Mizerów S-1 i S1A do testowego zatłaczania CO2 pokładów węgla (AGH we współpracy z PIG-PIB);
- plan monitoringu geochemicznego i biogeochemicznego w rejonie otworów zatłaczających (IGSMiE PAN, założenia odnośnie badanej lokalizacji podane przez PIG-PIB - **Rys. 3**);
- plan monitoringu sejsmologicznego i tomografii pasywnej (GIG);
- plan monitoringu geofizycznego powierzchniowego metodami niesejsmicznymi (PBG; grawimetria).



Rys. 3 Lokalizacja otworów zatłaczających dla wytypowanego obiektu w pokładach węgla Pawłowice-Mizerów (J. Jureczka); lokalizacje Brzeźce i Studzionka - projekt pilotażowy; Mizerów - projekt przemysłowy CO2-ECBMR

Projekt wiercenia i wyposażenia otworów MIZERÓW S-1 i S1A -do pokładów 405 oraz wydobycia– cz. techniczna (AGH, PIG-PIB)

(Stanisław Nagy, Rafał Wiśniowski, Andrzej Gonet, Stanisław Stryczek, Janusz Jureczka)

Projekt symulacji wydobycia CBM odwiertem Mizerów S1, będący przedmiotem niniejszej pracy, jest pierwszym etapem projektu z zakresu CBM/CO_2-ECBM oraz geosekwestracji dwutlenku węgla. Jak wspomniano we wstępie pracy, projekt, realizowany w okolicach Pszczyny, będzie składał się z trzech zestawów odwiertów. Lokalizację poszczególnych pilotów przedstawiono na **Fig. 1.1.18_227-1.1.18_229.**

Fig. 1.1.18_227 Lokalizacja inwestycji. Mapa satelitarna (google.maps, 2012)

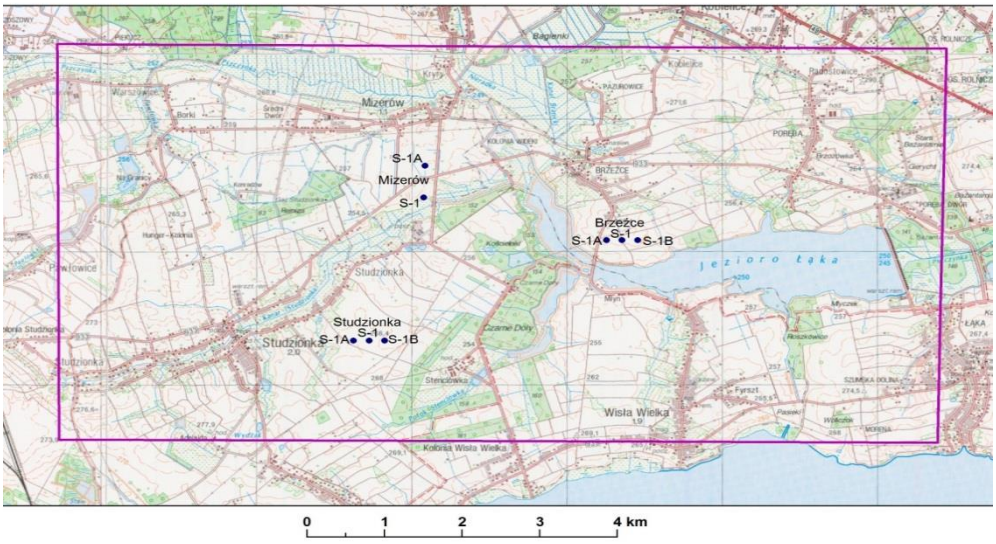


Fig. 1.1.18_228 Lokalizacja projektu. Mapa topograficzna (Jureczka J., 2011)

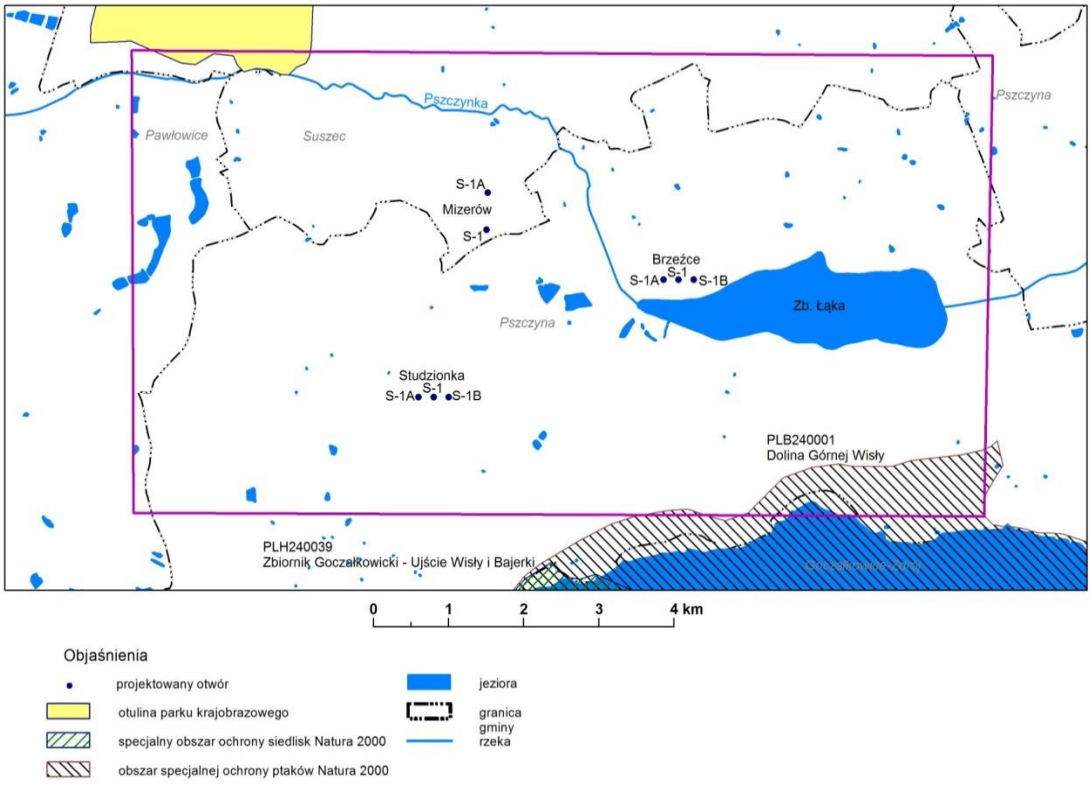


Fig. 1.1.18_229 Lokalizacja inwestycji. Obszary chronione (Jureczka J., 2011)

Lokalizacja odwiertów nie stwarza zagrożenia negatywnego wpływu na przyrodę w obszarze Natura 2000.

Cel wiercenia, lokalizacja i planowana głębokość otworów

Cel – otwór S-1 do zatłaczania dwutlenku węgla oraz otwór badawczy/produkcyjny S-1A.

Lokalizacja

- gmina: Suszec, miejscowość Mizerów

- współrzędne:

S-1 (+253,0 m n.p.m.)

1992: 234831,0; 486160,0 WGS84: N 49°58'50,2; E 18°48'24,9

S-1A (+257,0 m n.p.m.)

1992: 235307,0; 486174,0 WGS84: N 49°59'05,6; E 18°48'25,5

Projektowana głębokość – 1935 m ± 10% (przystropowa część serii paralicznej).

Otwór S-1A planowany jest w odległości 500 m od otworu S-1.

Na całej długości wierconych otworów dopuszcza się maksymalny kąt odchylenia od osi pionowej 1° przy czym maksymalny przyrost kąta odchylenia nie powinien przekraczać 1°/30 m. W czasie wiercenia należy wykonywać punktowo pomiary kąta odchylenia i azymutu inklinometrem wrzutowym co ok. 100 m oraz przed każdym wyciąganiem przewodu. Uwaga! W celu pomiaru azymutu należy w zestawie przewodu wiertniczego umieścić obciążnik niemagnetyczny. Profil otworów oraz zwiercalność skał zostały podane w **Tab. 1.1.18_34**.

Tab. 1.1.18_34 Przewidywany profil stratygraficzno-litologiczny otworu wraz z kategorią zwiercalności skał

Głębokość	Stratygrafia	Kategoria zwiercalności
0 – 24 m	czwartorzęd – glina pylasta oraz piaski z przewarstwieniami żwirów	kat. 1-2
- 246 m	miocen, formacja skawińska – iły i iłowce margliste, cienkie przewarstwienia piasków i piaskowców	kat. 3-4
- 1405 m	karbon górny (utwory węglonośne), seria mułowcowa (do pokładu 405) mułowce, piaskowce, iłowce, liczne pokłady węgla i łupku węglowego; w spągu pokład 405 o grubości 3,0 m	kat. 3-4
- 1835 m	karbon górny (utwory węglonośne), górnośląska seria piaskowcowa (z odc. profilu poniżej p. 405) piaskowce, zlepieńce, mułowce i iłowce, pojedyncze grube	kat. 3-4(5)

	pokłady węgla i łupku węglowego, w spągu pokład 510 o grubości ok. 8,0 m	
- 1935 m	karbon górny (utwory węglonośne) - seria paraliczna: mułowce, piaskowce, iłowce	kat. 3-4

Zarurowanie i cementowanie otworu

Podstawowe dane dotyczące zarurowania i zacementowania otworów podano w **Tab. 1.1.18_35**.

Tab. 1.1.18_35 Zarurowanie i cementowanie otworów

Średnica rur	**Średnica [mm]**	**Głębokość**	**Cementowanie**
13 3/8''	438	0-24 m	Cementowane do wierzchu
9 5/8''	311	0-246 m	Cementowane do wierzchu
7''	216	0-1350 m	Cementowane do wierzchu +paker zewnętrzny
liner 4 ½	149	1350-1935 m	

Wszystkie horyzonty wodonośne powyżej (trzeciorzęd) powinny być zamknięte przed zakończeniem wiercenia. Proces cementowania powinien być przeprowadzony w sposób uniemożliwiający przepływ metanu i CO2 poza rurami do izolowanych horyzontów, zarówno po rozpoczęciu wiercenia jak i w długim okresie po zakończeniu zatłaczania.

Przewidywane występowanie horyzontów

W utworach czwartorzędu przewiduje się występowanie wód gruntowych oraz horyzontów nasyconych wodami słodkimi.

W utworach miocenu (formacja skawińska) przewiduje się występowanie horyzontów nasyconych wodami słodkimi.

Przewidywane występowanie gazów toksycznych

W profilu projektowanego otworu nie przewiduje się występowania gazów toksycznych.

Przewidywane gradienty ciśnienia złożowego w profilu projektowanego otworu

W projektowanym profilu otworu przewiduje się występowania gradientów ciśnienia złożowego w zakresie: 0,09-0,10 MPa/10 m.

Przewidywane gradienty ciśnienia szczelinowania w profilu projektowanego otworu

W profilu otworu przewiduje się następujących występowanie gradientów ciśnienia szczelinowania:

w interwale 0-120 m - 0,170-0,200 MPa/10 m.

w interwale 120-1935 m - 0,180-0,240 MPa/10 m.

Przewidywane właściwości zbiornikowe oraz gradienty ciśnień złożowych i szczelinowania warstw chłonnych w profilu otworu przedstawiono w **Tab. 1.1.18_36**.

Tab. 1.1.18_36 Przewidywane właściwości zbiornikowe pokładów węgla oraz gradienty ciśnień złożowych i szczelinowania warstw chłonnych

Poziom zbiornikowy	Porowatość (%)[średnia]	Przepuszczalność (mD)[średnia]	Gradient ciśnienia	
			Złożowego (MPa/10m)	Szczelinowania (MPa/10m)
karbon węglonośny – seria mułowcowa	**?**	**0 – 5 [2]**	**0,09 – 0,10**	**0,18 – 0,22**
karbon węglonośny – górnośląska seria piaskowcowa	**?**	**0 – 4 [2]**	**0,09 – 0,10**	**0,18 – 0,22**

Przewidywane trudności w czasie wiercenia

W trakcie przewiercania klastycznych utworów czwartorzędu przewiduje się możliwość obsypywania, kawernowania i zaciskania ściany otworu. W trakcie przewiercania klastycznych utworów miocenu (formacja skawińska) przewiduje się możliwość zaników płuczki w poziomach piaskowcowych o dobrych parametrach zbiornikowych.

Projektowane pobieranie prób okruchowych

Projektuje się w obu otworach pobierać próbki okruchowe w interwałach nie rdzeniowanych co 10 m, a od głębokości 500 m co 5 m. W zakresie głębokości ok. 1350-1935 m, w przypadku niemożności pobrania rdzenia w jakimkolwiek odcinku, należy pobierać próby okruchowe z tych odcinków co 3 m. Z każdej głębokości należy pobrać: próbkę 500 g, nieprzemytą i wysuszoną. W całym profilu otworu należy pobierać co 30 m 2 próbki po 100 g, przemyte i wysuszone do badań geochemicznych. Próby okruchowe powinny być przechowywane w odpowiednio przygotowanych skrzynkach. Skrzynki powinny być opisane czytelnie i trwale na boku, wierzchu i szczycie. Każda skrzynka powinna zawierać nazwę otworu oraz interwał z którego pobrano próby okruchowe. Zarówno na wiertni jak i podczas transportu, skrzynki muszą być przykryte wieczkami.

Projektowane rdzeniowanie

W otworze **S-1** projektuje się rdzeniowanie w następujący sposób interwałów:

Rdzeniowanie ciągłe:

- poziom uszczelniający (formacja skawińska),

- seria mułowcowa

- górnośląska seria piaskowcowa,

- seria paraliczna.

Rdzenie powinny być układane do znormalizowanych (o długości 1 m) pojedynczych lub podwójnych skrzynek, przestrzegając ułożenia rdzenia „góra-dół". Skrzynki powinny być opisane czytelnie i trwale na boku, wierzchu i szczycie. Opis powinien zawierać numer i nazwę otworu, numer kolejny skrzynki, numer marszu, głębokość (od-do). Rdzeń kruchy, niewypełniający skrzynki, należy unieruchomić przegródkami o opisanych głębokościach. Zarówno na wiertni jak i podczas transportu, skrzynki muszą być przykryte wieczkami.

Uwaga: Przewiduje się możliwość zmiany zakresu rdzeniowania w zależności od faktycznie przewiercanego profilu geologicznego i facjalnego rozwoju warstw oraz bieżących ustaleń z osobami nadzoru prac geologicznych i autorami projektu. Prawdopodobnie w otworze iniekcyjnym odcinki rdzeniowania będą znacznie ograniczone.

W otworze **S-1A** nie przewiduje się rdzeniowania.

Przekazanie i przechowywanie rdzeni wiertniczych oraz prób okruchowych

Rdzenie wiertnicze oraz próby okruchowe powinny zostać zabezpieczone i przekazane odpowiedniemu organowi administracji geologicznej zgodnie z: USTAWĄ z dnia 9 czerwca 2011 r. Prawo geologiczne i górnicze oraz ROZPORZĄDZENIEM MINISTRA ŚRODOWISKA 1) w sprawie gromadzenia i udostępniania informacji geologicznej z dnia 15 grudnia 2011 r.

Po zakończeniu wiercenia skrzynki z pozyskanym rdzeniem wiertniczym oraz próbami okruchowymi zostaną przewiezione do magazynu rdzeni Państwowego Instytutu Geologicznego lub innego wskazanego przez Ministra Środowiska.

Zakres badań laboratoryjnych:

- Powierzchniowe zdjęcia gazowe oraz monitoring środowiska naturalnego w strefie odwiertu przed rozpoczęciem i po ukończeniu wiercenia,
- Badania własności fizycznych i chemicznych próbek rdzeni,
- Analizy mikrofaunistyczne, w utworach karbonu również makroflorystyczne, miosporowe oraz makrofunistyczne,
- Analizy petrograficzne i petrofizyczne,
- Analizy wód złożowych,
- Analizy płuczki i płynów porównawczych,
- Badanie parametrów zaczynu i kamienia cementowego.

Analizy petrograficzne, petrofizyczne, analizy geochemiczne, analizy mikrofaustyczne, inne badania rdzeni i kamienia cementowego poddanego oddziaływaniu CO2 powinny zostać wykonane po pobraniu rdzeni; analizy wód złożowych powinny zostać wykonane bezzwłocznnie po oczyszczeniu odwiertu zgodnie z wytycznymi zawartymi w pracy „Zasady i metodyka dokumentowania zasobów wód termalnych i energii, 1997”.

Zakres badań geofizycznych

ODC. I - w interwale 0-246 m przed zapuszczeniem kolumny rur 9 5/8”

profilowanie średnicy – XYC

profilowanie krzywizny - DEV

profilowanie oporności

profilowanie akustyczne - BSC

profilowanie gęstości - CDL

profilowanie gamma - GR

profilowanie porowatości neutronowej - CNT

profilowania - DIL + LL3 + PS

obliczenie objętości otworu pod rury 13 3/8”

ODC. II - w interwale 324-1350 m przed zapuszczeniem kolumny rur 7”

profilowanie średnicy - XYC

profilowanie krzywizny - DEV

profilowanie oporności - DLL + PS, MSFL

profilowanie gęstości - CDL

profilowanie gamma - GR

profilowanie porowatości neutronowej - CNT

cementomierz akustyczny w rurach 9 5/8” - RBT

obliczenie objętości otworu pod rury 7”

ODC. III - w interwale 1340 -1935 m przy głębokości końcowej otworu

profilowanie gamma spektrometryczne - SCR

profilowanie średnicy profilowanie krzywizny - DEV

profilowanie akustyczne - BCS

profilowanie gęstości profilowanie gamma - GR

profilowanie - DLL + PS, HRAI + PS

profilowanie porowatości neutronowej - CNT

profilowanie temperatury - BHTP

cementomierz akustyczny w rurach 7''

profilowanie gamma - GR

opcjonalnie: profilowanie neutron -gamma spektrometryczne SGR

opcjonalnie: rezonans magnetyczny MRL

opcjonalnie: dipolowa sonda akustyczna z orientacją przestrzenną

opcjonalnie: skaner opornościowy ultradźwiękowy XRMI

opcjonalnie: skaner akustyczny Borehole Telev.

próbniki (typu RTF lub MFT) (dla określenia zmienności poziomej i pionowej przepuszczalności, ciśnienia złożowego oraz poboru próbek wody złożowej m.in. do badań RSA)

Po osiągnięciu głębokości końcowej i wykonaniu końcowych pomiarów geofizycznych przewiduje się opcjonalnie wykonanie pomiarów sejsmometrycznych „time lapse" VSP.

Końcowe średnice otworów

Końcowe średnice wierconych otworów wynosić będą 149 mm.

Przewidywane opróbowania w czasie i po ukończeniu wiercenia

Opcjonalnie przewiduje się badnia mikroszczelinowania (minifrac) dla warstwy zatłaczającej CO2 i uszczelnienia

Przewiduje się badania próbnikiem typu RST – celem poboru wody do analizy RSA oraz innych analiz, określenie ciśnienia porowego i zgrubną estymację przepuszczalności pionowej i poziomej

W przypadku stwierdzenia dobrej przepuszczalności warstwy chłonnej i jej stabilnej budowy otwór nie musi być poszerzany ani filtrowany.

Udostępnione poziomy przewiduje się opróbować próbnikami złoża.

Zakres głębokościowy pracy laboratorium kontrolno - pomiarowego

Projektuje się pracę laboratorium kontrolno-pomiarowego w interwale od ok. 246 m (rozpoczęcie wiercenia) pod butem rur 9 5/8" do końcowej głębokości otworu.

Szczegółowy projekt konstrukcji otworów

Przyjmuje się, że kolektorami, do których może być zatłaczane CO2 są pokłady węgla w obrębie serii mułowcowej i górnośląskiej serii piaskowcowej (górny karbon).

Mając na względzie bezpieczeństwo planowanych prac i rejonu zaprojektowano otwory, których konstrukcja powinna być szczelna i wytrzymała przez bardzo długi okres czasu przy równoczesnym zapewnieniu skutecznego wtłaczania CO_2 w pokłady charakteryzujące się przepuszczalnością od 0 do 4 mD.

Po przygotowaniu terenu wiertni i kolaudacji należy wykonać otwór świdrem o średnicy 17 ¼" (438 mm) i zapuścić do otworu kolumnę wstępną o średnicy 13 3/8" najlepiej do warstwy ilastej położonej na głębokości do 24 m (czwartorzęd i strop jego podłoża). Wskazane jest ją zacementować do wierzchu i po stójce na związanie zaczynu dalsze wiercenie otworu wskazane jest realizować stosując świder o średnicy 12 ¼ " (311 mm). Po dowierceniu do głębokości 246 m, tj. po przewierceniu miocenu zakłada się zapuszczenie do otworu kolumny rur okładzinowych o średnicy 9 5/8" i zacementowanie jej do wierzchu.

Kolejna średnica świdra powinna wynosić 8 ½" (216 mm) i otwór należy wiercić do osiągnięcia głębokości 1350 m (10-20 m poniżej spągu serii uszczelniającej). W ten odcinek otworu zaleca się zapuścić kolumnę rur okładzinowych 7" z pakerem zewnętrznym i uszczelnić ją na całej długości zaczynem cementowym odpornym na CO2. Do zasadniczych warstw, w które może być wtłaczany CO_2 w otworach S-1a i S-1B oraz poniżej, do głębokości 1935 m ppt (seria paraliczna) trzeba dowiercić otwór świdrem o średnicy 5 7/8"(149 mm) i/lub aparatem rdzeniowym. Planuje się zapuścić do otworu kolumnę rur traconych szlicowanych na odcinku, którego długość zostanie ustalona po odwierceniu otworu do końcowej głębokości. Zakłada się średnicę rur 4 1/2" z minimalną zakładką 100m w rurach okładzinowych 7". Ze względu na możliwy kontakt tej kolumny rur z CO_2 zaleca się, aby była ona odporna na CO_2. To samo dotyczy zaczynu uszczelniającego. Ponadto dla poprawienia szczelności układu otwór zatłaczający – górotwór kolumna rur musi być wyposażona w paker zewnętrzny odporny na CO_2.

Ponadto w zależności od rozpoznania górotworu otworem badawczym zasadnicze warstwy izolacyjne i chłonne mogą być rdzeniowane.

Schemat konstrukcji otworów przedstawiono na **Fig. 1.1.18_230**.

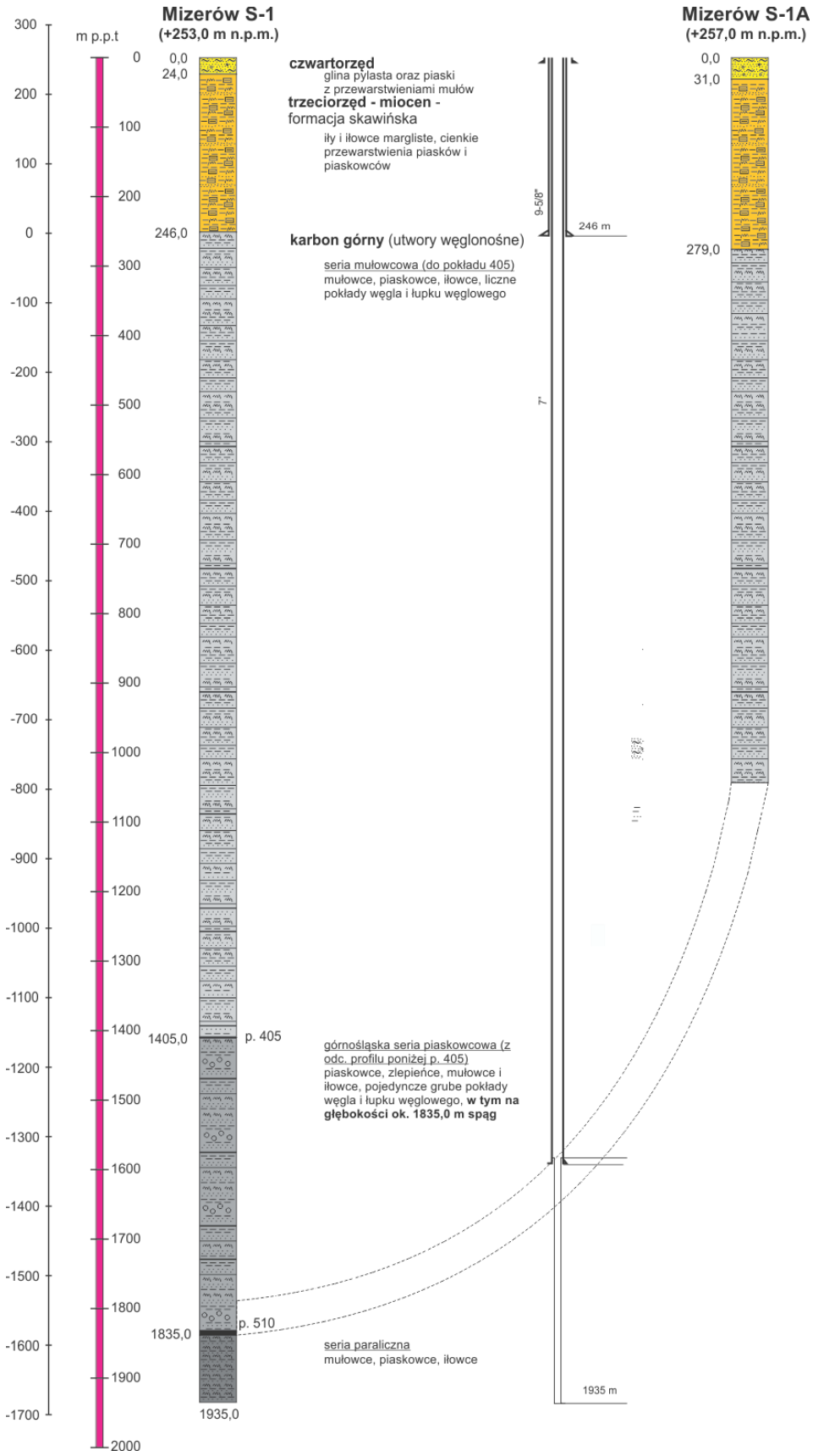


Fig. 1.1.18_230 Schemat zarurowania otworu Mizerów S1

Do właściwego zrealizowania otworu konieczne jest odpowiednie dobranie płuczki. Stąd na podstawie rozeznania rejonu wierceń proponuje się zastosowanie płuczek o poniższych parametrach w wyróżnionych interwałach.

Podstawowe parametry płuczki:

Interwał 0 – 246 m / płuczka bentonitowa /

gęstość 1,05 – 1,15 g/cm^3

filtracja poniżej 20 ml/0,7 MPa/30 min.

lepkość plastyczna możliwie niska

granica płynięcia 12 -15 Pa

pH 9,0 -11,0

Interwał 246 – 1350 m płuczka polimerowo - potasowa

gęstość 1,10 - 1,20 g/cm^3

filtracja poniżej 6 ml/0,7 MPa/30 min

lepkość plastyczna: możliwie niska

granica płynięcia 7-14 Pa (w temperaturze 50 ^{0}C)

K^+ około 60 g/l KCL (25-30 g/l K^+)

pH 7,5-9,0

Interwał 1350 – 1935 m płuczka polimerowo-potasowa z blokatorami

gęstość: 1,05 - 1,10g/cm^3

filtracja API: do uzyskania filtracji HTHP

filtracja HTHP: pon.10 ml/30 min. (90 ^{0}C,ciśn. różnicowe 35 at)

lepkość plastyczna: możliwie niska

K^+ około 60 g/l KCL (25-30 g/l K^+)

granica płynięcia: 9 – 11 Pa

blokator węglanowy 60-100 kg/m^3

pH: 8,5 – 10,0

Interwał 0 - 246 m płuczka bentonitowa

Receptura płuczki:

Bentopol - 50 kg/m^3

NaOH - 2 kg/m^3

CMC LV - 8 kg/m^3

Detergent W - 2 kg/m^3

$NaHCO_3$ - wg.potrzeb

Gips - wg.potrzeb

Interwał 246 – 1350 m płuczka polimerowo-potasowa

Receptura płuczki:

KCL - 60 kg/m^3

PHPA - 4 kg/m^3

NaOH - 2 kg/m^3

CMC LV - 10 kg/m^3

Skrobia - 10 kg/m^3

PAA - 3 kg/m^3

PAC - w miarę potrzeb

Detergent W - w miarę potrzeb

Biostat - w miarę potrzeb

Blokator węgl. - przy wystąpieniu zaników płuczki

CMC HV - w miarę potrzeb

$NaHCO_3$ - „

Na_2CO_3 - „

XCD - „

Defpol - w miarę potrzeb

Interwał 1350 – 1935 m płuczka polimerowa-potasowa z blokatorami

<u>Receptura płuczki:</u>

KCl - 60 kg/m^3

NaOH - 2 kg/m^3

Filter-chek - 20 kg/m^3

XCD - 2 kg/m^3

PAC - 3 kg/m^3

Blokator - do uzyskania ciężaru

Blokator organiczny – wg. potrzeb

Odpieniacz - w miarę potrzeb

Biocyd - wg potrzeb

Polimer HPHT - 3 kg/m^3

Również ważnym czynnikiem prac wiertniczych jest dobór odpowiednich zaczynów uszczelniających. Na obecnym poziomie rozpoznania problemu proponuje się receptury zaczynów podane poniżej.

Rury 9 5/8" (0 – 246 m cdw.) Cementowanie przez przewód wiertniczy.

Przed zaczynem wtłoczyć przemywkę w ilości około 5 m^3

SKŁAD ZACZYNU CEMENTOWEGO:

Cement wiertniczy G - 100%

CaCl2 - 3%

PSP 061 - 0,3%

Gęstość zaczynu – 1,8 g/cm3 w/c – 0,5

Wytrzymałość kamienia cem. około – 10 MPa

Rury 7" (0 – 1350 m cdw.) Cementowanie jednostopniowe z użyciem dwóch klocków cementacyjnych.

Przed zaczynem wtłoczyć przemywkę w ilości około 6 m^3

SKŁAD ZACZYNU CEMENTOWEGO ODPORNEGO NA KOROZJĘ CO2:

CO2 R MIX* - 100%

KCl - 3%

PSP 031 - 0,17%

PSP 042 - 0,17%

PSP 061 - 0,4%

Gęstość zaczynu – 1,86 g/cm3 w/c – 0,5

Wytrzymałość kamienia cementowego około – 15 MPa

*) CO2 R MIX – mieszanina uszczelniająca odporna na korozję CO2

Newralgicznym elementem wykonania otworu zatłaczającego CO_2 jest dobranie rur okładzinowych 7", ich uzbrojenia i technologii uszczelnienia. Stąd niezbędnym warunkiem prowadzenia prac jest wyposażenie rur w hydrauliczną tuleję cementową, paker zewnętrzny, łącznik pod klocek i but z zaworem grzybkowym oraz podwieszenie kolumny rur na więźbie też odpornej na CO_2. Schemat powyższego uzbrojenia kolumny rur okładzinowych przedstawiono na **Fig. 1.1.18_231** (**Tab. 1.1.18_37**).

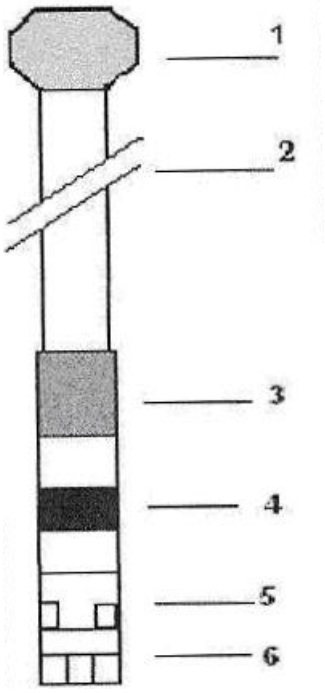


Fig. 1.1.18_231 Schemat uzbrojenia rur 7 " w otworze do zatłaczania CO_2

Tab. 1.1.18_37 Schemat uzbrojenia rur 7" w otworze do zatłaczania CO_2

L.p.	Nazwa elementu	Śr. zew. mm	Śr. wew. mm	Długość m	Głębokość wierzch m	Głębokość spód m

1	Łącznik posadowy			0,40	0,00	0,40
2	Rury 7” CO2 service	177,80	157,00	1040	0,00	1040
3	Hydrauliczna tuleja cem. 7” TAM CO2 service	210,00		0,69		
4	Paker zewnętrzny 7” ECP TAM CO2 service	209,00	159,40	3,09		
5	Łącznik 7” z alum. siedzeniem pod klocek TAM	194,30		0,37		
6	But 7” z zaworem grzybkowym TAM	194,30		0,48		

Po wywierceniu otworów do zaplanowanych głębokości należy je przygotować do monitoringu i do zatłaczania CO2. Szczegółowe schematy uzbrojenia otworów powinny zostać ustalone po ich odwierceniu. Na obecnym etapie prac zwraca się uwagę na konieczność zamontowania filtra z sitem, pakera, tulei cyrkulacyjnej i zaworu bezpieczeństwa. Wskazane jest prowadzenie obserwacji i zatłaczania CO2 przez rury wydobywcze 3 ½” TDS CO2 o grubości ścianki 7,34mm połączone z głowicą eksploatacyjną także odporną na CO2.

Model przepływu metanu wokół otworu Mizerów S1 i S1A

Eksploatacja CBM z nieeksploatowanych pokładów węgla

Eksploatację CBM, z dziewiczych pokładów, odwiertami prowadzonymi z powierzchni, stosuje się gdy węgiel kamienny nie może być wydobywany na powierzchnię. Nie nadające się do eksploatacji pokłady węgla to najczęściej złoża o zbyt małej miąższości by wydobycie było ekonomiczne lub leżące zbyt głęboko (zbyt duża temperatura by podjąć eksploatację węgla). W celu pozyskania CBM wykonuje się odwierty pionowe, kierunkowe oraz horyzontalne z powierzchni terenu (Gonet et al., 2009; Gonet et al., 2010). Wierceniami do dziewiczych, nieeksploatowanych pokładów węgla uzyskuje się gaz o koncentracji 20 – 70% metanu. Z racji małej przepuszczalności węgla, rozwiercany pokład powinien zostać poddany zabiegowi hydraulicznego szczelinowania (Gonet et al., 2010). Wydobycie metanu można zwiększyć stosując zabiegi intensyfikacji, poprzez zatłaczanie dwutlenku węgla i/lub azotu.

Eksploatacja CBM z dziewiczych złóż nie jest w Polsce zbyt szeroko stosowana. Pod koniec lat 90. wiele amerykańskich firm między innymi McCormic Energy Inc., Amoco (obecnie Chevron), Conoco, Electrogaz Ventures, Metanel (Siemek et al., 1994), Texaco (Gonet et al., 2009) było zainteresowanych produkcją metanu z pokładów węgla.

Pilotowy projekt eksploatacji metanu z pokładów węgla realizowany w Mizerowie jest oddalony o ok. 7 km od przedsięwzięcia CBM realizowanego przez Texaco na terenie Pawłowic – Warszowic. Z powodu niewielkiej odległości, dane konieczne do symulacji zostały zaczerpnięte główne w związku z projektem Texaco.

Planuje się przewiercić pokłady 405 oraz 510. Pokład 405 o miąższości ok. 3,0 m, zalega na głębokości 1405 m.p.p.t. Pokład nachylony jest w kierunku południowym pod kątem ok. 10º. Pokład węglowy 510, ma miąższość 8,0 m. Jego strop znajduje się na głębokości 1835 m p.p.t. Pokład również ma upad w kierunku południowym o wartości 20º.

Po wykonaniu badań na próbkach z otworu S1 oraz po otrzymaniu danych eksploatacyjnych, model zostanie skalibrowany (co najmniej dwa lata eksploatacji) . Dalszy harmonogram prac zakłada wykonanie horyzontalnego otworu S1A zatłaczającego dwutlenek węgla. Dane eksploatacyjne z odwiertu S1 po sorpcji dwutlenku węgla zatłaczanego odwiertem posłużą do modyfikacji modelu z produkcji CBM na ECBM-CO2 oraz optymalizacji wzajemnego rozmieszczenie i długość odwiertów produkcyjnych/zatłaczającego dla pozostałych lokalizacji

Maksymalna pojemność sorpcyjna węgla (w danym ciśnieniu złożowym) w pokładzie 405 szacuje się na 9,25 m^3metanu na 1 tonę c.s.w. lecz węgiel występuje w stanie niedosyconym, a zawartość gazu została określona przez Texaco na 6,63 m^3/t c.s.w (McCants et al., 2001). Podobne wartości metanośności (Studzionka) podaje Twardowski (1997). Przyjęto niską przepuszczalność pokładów (1-2md dla pokładu 405 i 0,5 – 1 md dla pokładu 510). Odległości między szczelinami przyjęto równe we wszystkich kierunkach i wynoszące 0,025- 0,1 m. Współczynnik dyfuzji przyjęto z pracy Wageningen'a i Maas'a (2007) na poziomie 10^{-9} m^2/s. Pojemność Langmuira zaczerpnięto z pracy McCants'a i in. (2001) równą 12 m^3 metanu na 1 tonę c.s.w, a ciśnienie Langmuira 5,52 MPa.

Pozostałe parametry użyte w symulacjach, dobrano na podstawie literatury (McCants et al., 2001; Twardowski, 1996; Pagnier et al., 2005). Gęstość szczelin obliczono zgodnie z formułą Gilman'a i Kazimi'ego. Skin factor, z powodu szczelinowania oraz ośrodka szczelinowatego przyjęto 0.

Model symulacyjny

W celu stworzenia symulacji produkcji CBM, posłużono się symulatorem złożowym GEM firmy CMG (Computer Modeling Group Ltd.). Program posiada pakiet służący przeznaczony do symulacji przedsięwzięć związanych z CBM/ECBM.

Modele pokładów 405 i 510 zbudowano zgodnie z danymi w **Tab. 1.1.18_38**, natomiast wizualizację pokładów 405 i 510 wykorzystanych do przeprowadzenia symulacji oraz ich pionowe przekroje przedstawia **Fig. 1.1.18_232**. Skala pokazuje głębokość zalegania stropu danej warstwy.

Tab. 1.1.18_38 Parametry symulacji dla modelu zbudowanego w projekcie

c				
Parametr	Jednostka	Wartość min	Wartość średnia	Wartość max
Miąższość pokładu	[m]	3		
Pojemność sorpcyjna (Langmuir volume Constant VL)	[m^3/t d.a.f]	12		
Początkowa zawartość metanu	[m^3/t d.a.f]	4.65	6.50	8.35
Ciśnienie Langmuira (Langmuir Pressure Constant)	[kPa]	5 530		
Czas produkcji	[rok]	10		
Ciśnienie złożowe	[kPa]	13 783		
Głebokość zalegania pokładu	[m]	1405		
Porowatość matrycy	[%]	0.5		
Porowatość szczelin	[%]	0.50	0.75	1
Przepuszczalność matrycy w kierunku i	[mD]	0.0001		
Przepuszczalność matrycy w kierunku j	[mD]	0.0001		
Przepuszczalność matrycy w kierunku k	[mD]	0.0001		
Szerokość szczelin w kierunku i	[m]	0.025		
Szerokość szczelin w kierunku j	[m]	0.025		

Szerokość szczelin w kierunku k	[m]	0.025		
Nasycenie wodą matrycy	[%]	0.5		
Nasycenie wodą szczelin	[%]	100		
Przepuszczalność szczelin w kierunku i	[mD]	1	1.5	2
Przepuszczalność szczelin w kierunku j	[mD]	1	1.5	2
Przepuszczalność szczelin w kierunku k	[mD]	1	1.5	2
Temperatura	[˚C]	60		
Gęstość węgla	[kg/m^3]	1,435		
Czas desorpcji	[dni]			
Współczynnik dyfuzji	[m^2/s]	10^{-9}		

Fig. 1.1.18_232 Widok modelu – strop – rzut 3D

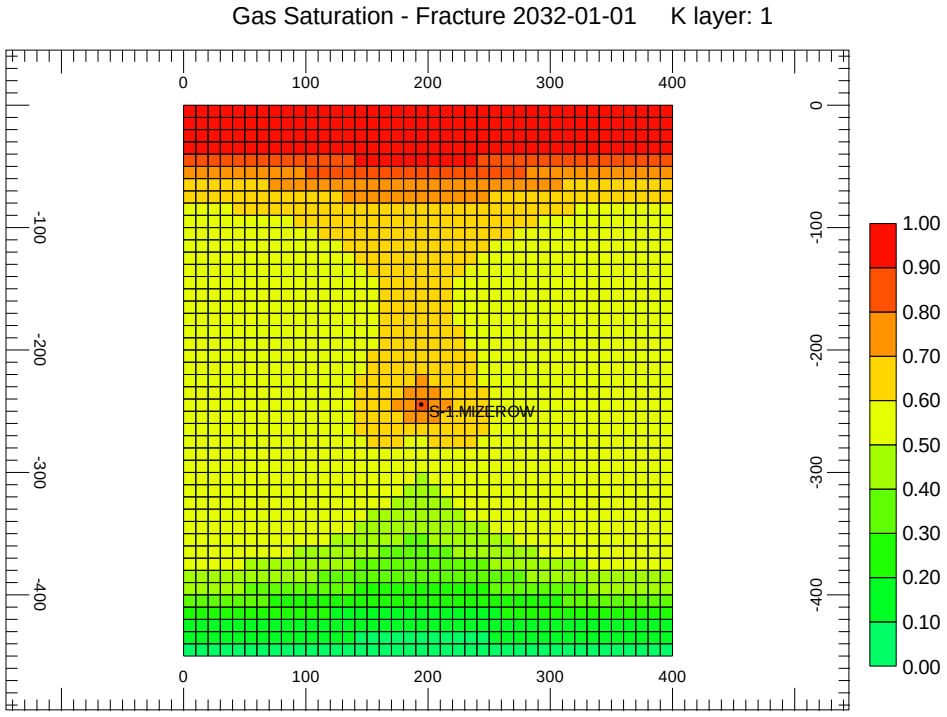


Fig. 1.1.18_233 Rozkład nasycenia metanem szczelin modelu po 20 latach eksploatacji

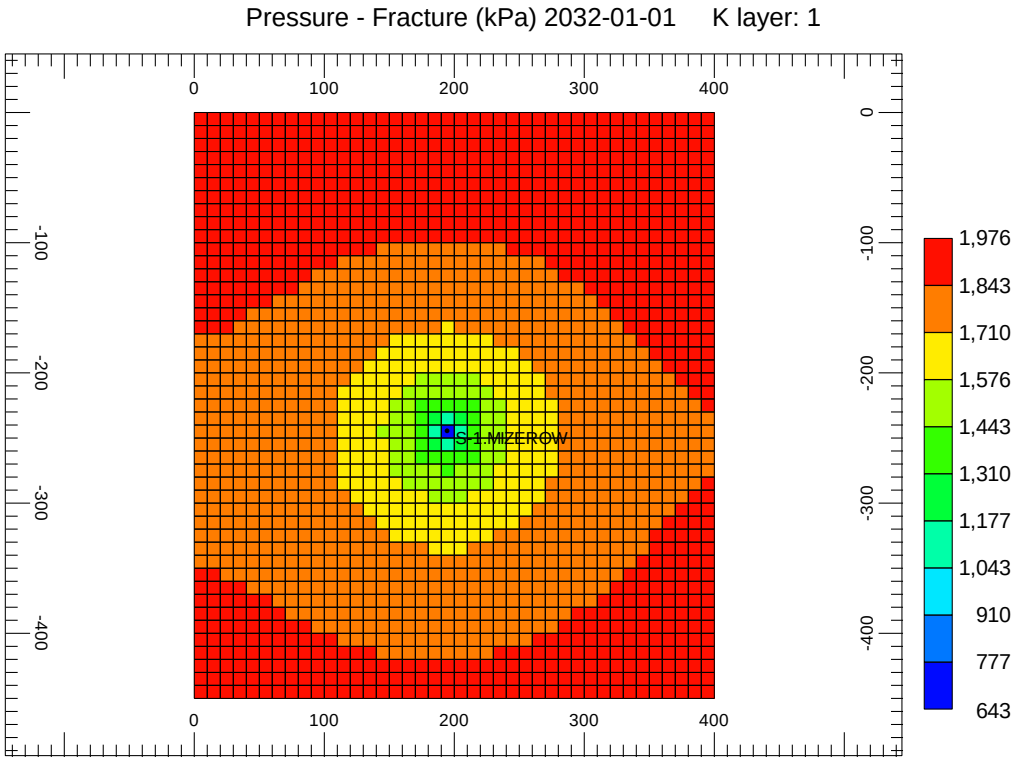


Fig. 1.1.18_234 Rozkład ciśnień w szczelinach węglowych po 20 latach eksploatacji

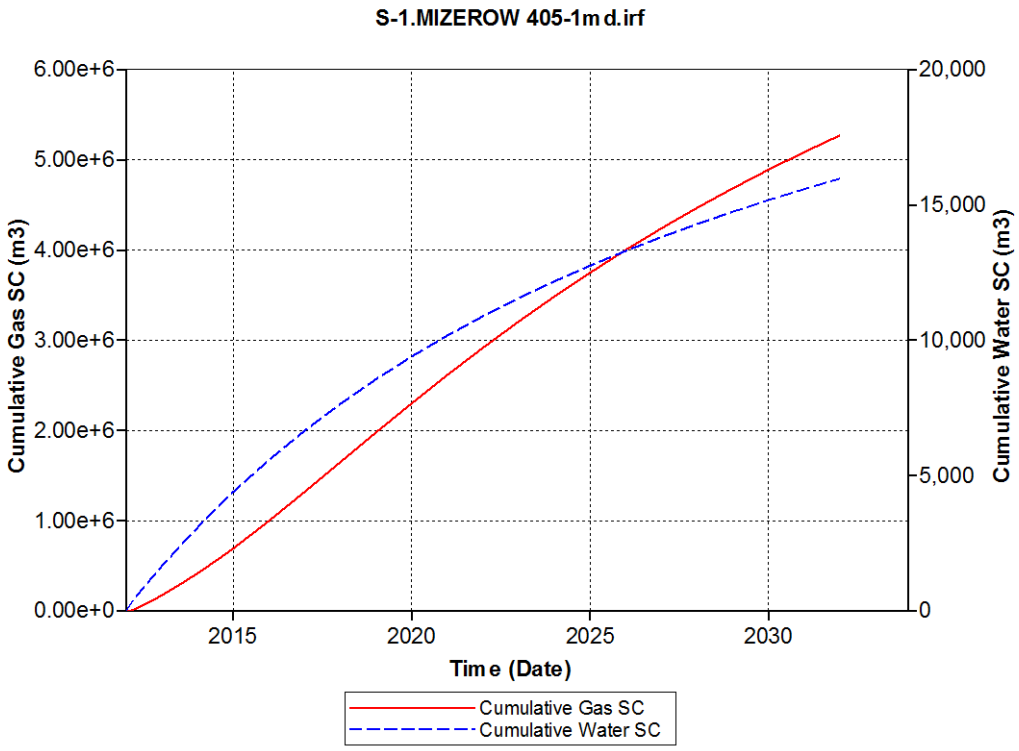


Fig. 1.1.18_235 Sumaryczne wydobycie gazu i wody z odwiertu po 20tu latach eksploatacji

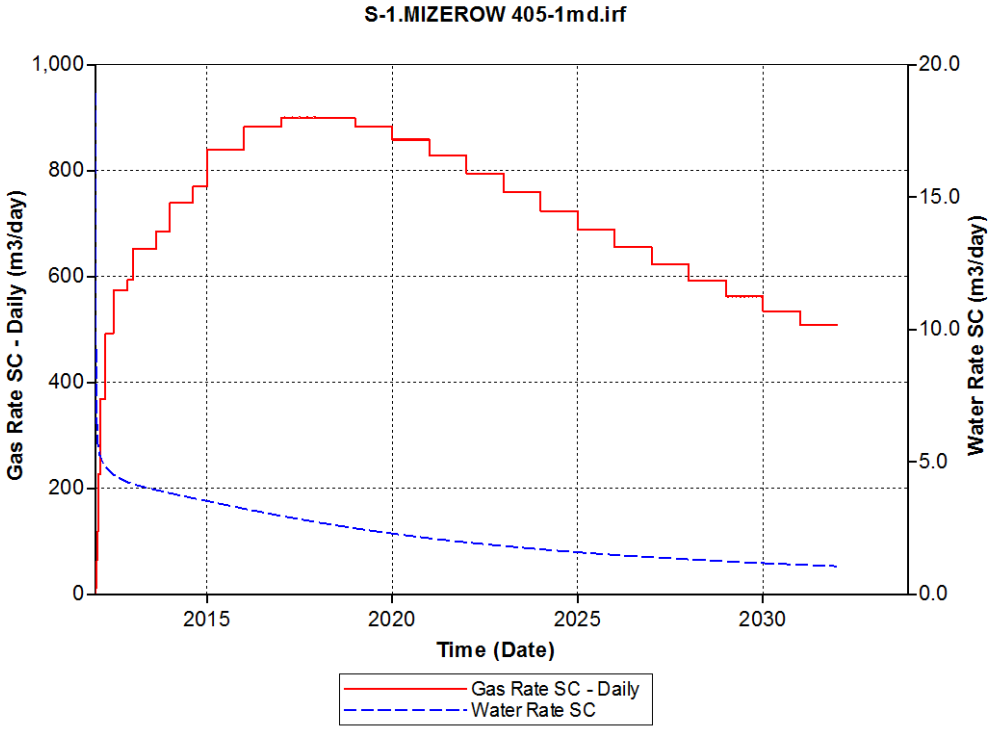


Fig. 1.1.18_236 Zmiana wydajności eksploatacji wody i gazu w czasie 20 lat pracy otworu

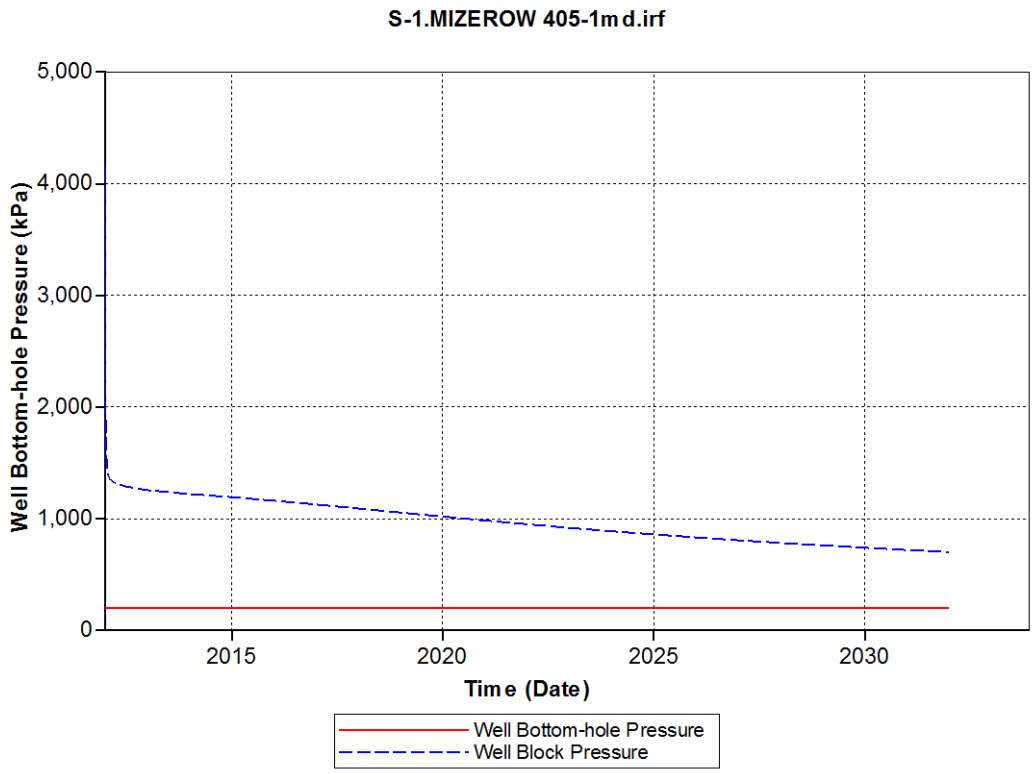


Fig. 1.1.18_237 Zmiana ciśnienia złożowego na dnie otworu eksploatacyjnego Mizerów S11

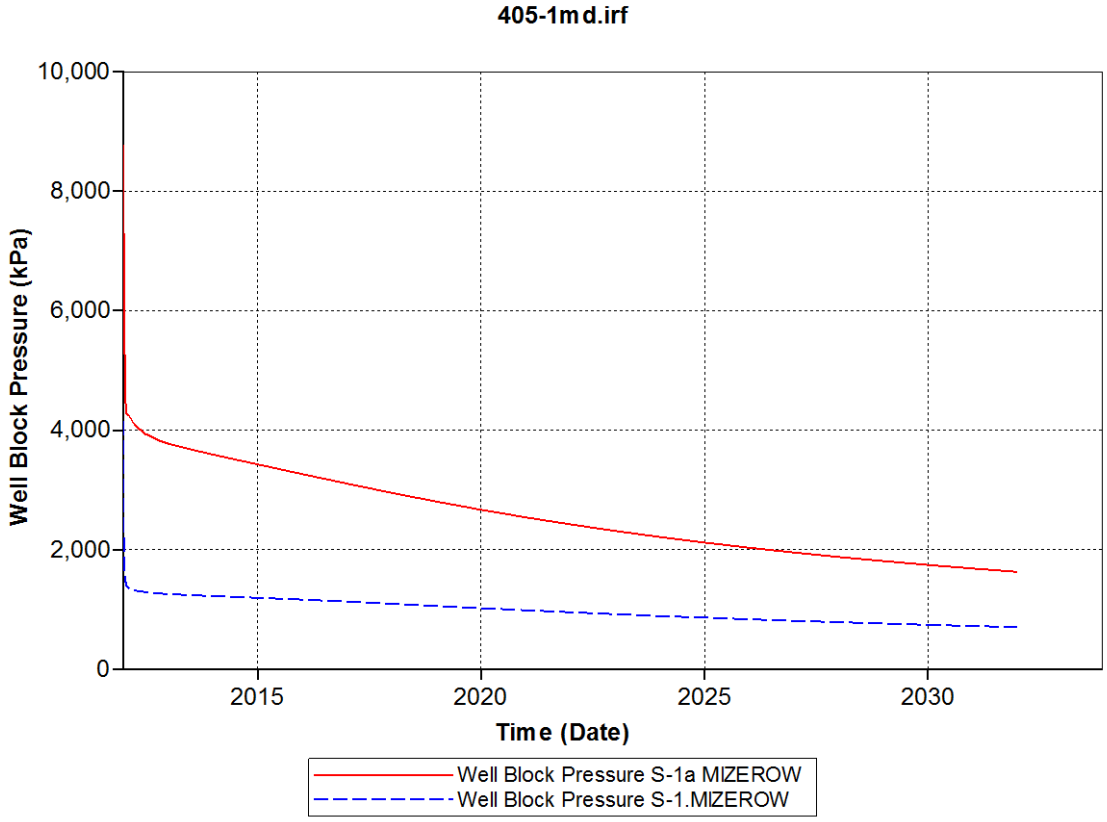


Fig. 1.1.18_238 Zmiana ciśnienia na dnie otworu wydobywczego i otworu minitorującego Mizerów S1a – oddalonego ok. 200 m

Program monitoringu zawartości dwutlenku węgla w powietrzu podglebowym oraz biomonitoringu dla składowiska Pawłowice-Studzionka (IGSMiE)

(Radosław Tarkowski, Wiesław Sroczyński, Lidia Dziewińska, Magdalena Wdowin, Katarzyna Luboń)

Potencjalny rejon perspektywiczny do składowania CO_2 w pokładach węgla został wskazany dla wytypowanych pokładów węgla kamiennego w rejonie Pawłowice-Mizerów (pokłady 405 i 510). Obszar został wybrany ze względu na jego budowę geologiczną, odległość od czynnych kopalń węgla kamiennego oraz brak zwartej zabudowy. Najbliżej położone obszary górnicze to KWK „Pniówek" na zachodzie, KWK „Krupiński" na północy oraz KWK „Silesia" na południowym wschodzie.

Dla rejonu Pawłowice-Mizerów został opracowany przez GIG model strukturalny, w oparciu o mapy spągów pokładów 405 i 510 wykonane przez PIG-PIB OG oraz przy wykorzystaniu własnych map innych powierzchni strukturalnych. Powierzchnia modelowanego obszaru wynosi 68,7 km^2. Jest to prostokątny obszar o wymiarach 11,56 x 6,1 km obejmujący swym zasięgiem przedział głębokościowy 1,36 km (Zadanie **1.1.15**; Urych, zespół, 2011).

Pokład 405 należy do warstw załęskich serii mułowcowej, natomiast pokład 510 zaliczamy do warstw siodłowych górnośląskiej serii piaskowcowej. Pokłady 405 i 510 usytuowane są w modelowanym obszarze na głębokości poniżej 967 m. Największa głębokość, jaką osiąga spąg pokładu 510 w tym rejonie to ok. 2276 m. Miąższość pokładu 405 zawiera się w przedziale od 1,3 m do 5,6 m. Natomiast miąższość pokładu 510 charakteryzuje się w tym rejonie zmiennością w przedziale od 2,5 m do 10,5 m.

Utwory węglonośne karbonu produktywnego wykazują dość znaczne zaangażowanie tektoniczne. Omawiany obszar charakteryzuje się występowaniem dyslokacji nieciągłych o charakterze uskoków tektonicznych. W modelu występuje 18 uskoków zrzutowych normalnych o zróżnicowanych wielkościach zrzutu do około 300 m. Ogólne kierunki przebiegu tych uskoków także wykazują dużą zmienność, ale dominuje kierunek NE-SW. Płaszczyzny uskoków są przeważnie pionowe lub zapadają w kierunku N-W. Zdecydowaną większość uskoków (ok. 96%). stanowią uskoki listryczne, czyli uskoki o zmiennym kącie upadu. Nieciągłości te dzielą model na 17 bloków. Uskoki w tym rejonie obejmują jedynie utwory węglonośne (bez kompleksu osadów trzeciorzędu i czwartorzędu).

W ramach monitoringu składowania dwutlenku węgla na składowisku w obszarze Pawłowice-Studzionka proponuje się wykonanie następujących badań geochemicznych:

- szczegółowe zdjęcie geochemiczne zawartości dwutlenku węgla na terenie składowiska na składowisku Pawłowice-Studzionka,
- powierzchniowe badania geochemiczne zawartości CO_2 w pobliżu otworu zatłaczającego,
- sezonowe powierzchniowe badania geochemiczne zawartości CO_2 na terenie składowiska na składowisku Pawłowice-Studzionka,
- badania geochemiczne rozkładu stężeń CO_2 do głębokości 5 m w wybranych punktach,
- ciągłe pomiary zawartości CO_2 w powietrzu podglebowym w zastabilizowanych punktach pomiarowych.

Na etapie monitorowania poziomu odniesienia badania te mają na celu ustalenie tła zawartości CO_2 w powietrzu podglebowym oraz jego zmian sezonowych i rozkładu głębokościowego dla składowiska na składowisku Pawłowice-Studzionka. Posłużą 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.

Metodyka pomiarów zawartości CO_2 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 ustalono wstępnie na mapach topograficznych w skali 1:10 000 (w razie potrzeby posłużono się powiększeniami). Lokalizacja stanowisk wymaga weryfikacji na podstawie rekonesansu w terenie, przy czym część punktów pomiarowych może być nieznacznie przesunięta ze względu na występowanie trwałej nawierzchni, przeszkód terenowych, instalacji podziemnych itp.

Położenie punktów pomiarowych w terenie należy udokumentować metodami geodezyjnymi z dokładnością $\pm$1 m.

Punkty pomiarowe powierzchniowego zdjęcia geochemicznego zawartości CO_2 planuje się rozmieścić w siatce podstawowej 200 x 200 m. Obszar składowiska, na którym wykonywane będą pomiary koncentracji CO_2 w powietrzu glebowym obejmuje powierzchnię ok. 0,51 km^2. Na tym obszarze tym przewidziano 25 podstawowe punkty pomiarowe (**Tab. 1.1.18_39**, **Fig. 1.1.18_239**).

Lokalizacja punktów do badań zmian sezonowych zawartości dwutlenku węgla została zaplanowana w formie siatki o rozmiarach 400x400 m. Na obszarze składowiska przewidziano 4 punktów pomiarowych do badań sezonowych (**Tab. 1.1.18_40**, **Fig. 1.1.18_240**).

Rozkład zawartości CO_2 w powietrzu glebowym proponuje się badać dokładniej w pobliżu otworu zatłaczającego. Punkty będą lokalizowane w odległości 25 m; przewiduje się, że takich punktów będzie 4÷5.

Punkty, w których będzie prowadzony ciągły pomiar zawartości dwutlenku węgla w powietrzu glebowym (4 szt.) powinny być zlokalizowane w pobliżu otworu zatłaczającego i pozostałych otworów na złożu Nosówka (**Tab. 1.1.18_41**,**Fig. 1.1.18_241**).

Powierzchniowe pomiary geochemiczne (zdjęcie zawartości CO_2 oraz zmiany sezonowe) będą prowadzone na głębokości do l m w punktach pomiarowych przewidzianych dla poszczególnych typów badań. Zawartość CO_2 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. Oznaczenie stężenia będzie wykonywane detektorem X-am 7000 firmy Drager. Miernik ten jest wyposażony w sensor CO_2 działający na zasadzie absorpcji promieniowania podczerwonego techniką NDIR *(Non-dispersive Infrared)* o zakresie pomiarowym 0-100% obj. gazu.

Głębokościowy rozkład stężenia CO_2będzie wykonany w 10 punktach w otworach odwierconych do głębokości 5 m. Pomiar stężenia będzie wykonywany na głębokości 1, 2, 3, 4 m.

Instalacja ciągłego pomiaru zawartości i rejestracji dwutlenku węgla w powietrzu glebowym będzie składała się z przetworników (liczba zostanie ustalona na etapie projektowania prac), źródła zasilania, skanera pomiarowego oraz komputera. Przetworniki umieszczone będą w rurach PCV o średnicy 100 mm; na głębokości 110 cm, w dolnej części będą one sperforowane: zasilane napięciem 24 V DC, z zasilacza napięcia stałego. Skaner pomiarowy, zlokalizowany w oddzielnej skrzynce pomiarowej, połączony będzie kablami sygnałowymi z przetwornikami CO_2 ułożonymi 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.

Tab. 1.1.18_39 Lokalizacja punktów pomiarowych zawartości CO_2 w powietrzu podglebowym na składowisku na składowisku Pawłowice-Studzionka

Punkt pomiarowy	Obszar	Współrzędne topograficzne*		Współrzędne geograficzne	
		X_1992	Y_1992	X2	Y2
1	STUDZIONKA	485031.44	233073.08	18° 47' 28,418" E	49° 57' 53,159" N
2	STUDZIONKA	485233.72	233075.08	18° 47' 38,575" E	49° 57' 53,242" N
3	STUDZIONKA	485434.12	233077.05	18° 47' 48,637" E	49° 57' 53,323" N
4	STUDZIONKA	485636.41	233079.04	18° 47' 58,793" E	49° 57' 53,406" N
5	STUDZIONKA	485836.80	233081.02	18° 48' 8,855" E	49° 57' 53,487" N
6	STUDZIONKA	485033.59	232871.05	18° 47' 28,555" E	49° 57' 46,616" N
7	STUDZIONKA	485235.86	232873.05	18° 47' 38,710" E	49° 57' 46,699" N
8	STUDZIONKA	485436.26	232875.03	18° 47' 48,771" E	49° 57' 46,780" N
9	STUDZIONKA	485638.54	232877.02	18° 47' 58,927" E	49° 57' 46,863" N
10	STUDZIONKA	485838.94	232878.99	18° 48' 8,989" E	49° 57' 46,944" N
11	STUDZIONKA	485035.72	232669.11	18° 47' 28,690" E	49° 57' 40,075" N
12	STUDZIONKA	485238,00	232671.11	18° 47' 38,845" E	49° 57' 40,158" N
13	STUDZIONKA	485438.39	232673.09	18° 47' 48,906" E	49° 57' 40,240" N
14	STUDZIONKA	485640.68	232675.09	18° 47' 59,062" E	49° 57' 40,323" N
15	STUDZIONKA	485841.07	232677.06	18° 48' 9,123" E	49° 57' 40,404" N
16	STUDZIONKA	485037.86	232467.09	18° 47' 28,826" E	49° 57' 33,533" N
17	STUDZIONKA	485240.13	232469.08	18° 47' 38,980" E	49° 57' 33,615" N
18	STUDZIONKA	485440.53	232471.06	18° 47' 49,041" E	49° 57' 33,697" N
19	STUDZIONKA	485642.81	232473.06	18° 47' 59,196" E	49° 57' 33,779" N
20	STUDZIONKA	485843.22	232475.04	18° 48' 9,257" E	49° 57' 33,861" N
21	STUDZIONKA	485039.99	232265.27	18° 47' 28,961" E	49° 57' 26,996" N
22	STUDZIONKA	485242.27	232267.26	18° 47' 39,115" E	49° 57' 27,079" N
23	STUDZIONKA	485442.66	232269.24	18° 47' 49,175" E	49° 57' 27,161" N
24	STUDZIONKA	485644.95	232271.24	18° 47' 59,331" E	49° 57' 27,243" N
25	STUDZIONKA	485845.35	232273.22	18° 48' 9,391" E	49° 57' 27,324" N

* – państwowy układ współrzędnych płaskich prostokątnych "1992"

Tab. 1.1.18_40 Lokalizacja punktów do badań zmian sezonowych zawartości CO_2 na składowisku Pawłowice-Studzionka

Punkt pomiarowy	Obszar	Współrzędne topograficzne*		Współrzędne geograficzne	
		X_1992	Y_1992	X2	Y2
1	STUDZIONKA	485235.86	232873.05	18° 47' 38,710" E	49° 57' 46,699" N
2	STUDZIONKA	485638.54	232877.02	18° 47' 58,927" E	49° 57' 46,863" N
3	STUDZIONKA	485240.13	232469.08	18° 47' 38,980" E	49° 57' 33,615" N
4	STUDZIONKA	485642.81	232473.06	18° 47' 59,196" E	49° 57' 33,779" N

* – państwowy układ współrzędnych płaskich prostokątnych "1992"

Tab. 1.1.18_41 Lokalizacja punktów ciągłego pomiaru zawartości CO_2 w powietrzu podglebowym wokół otworów na składowisku Pawłowice-Studzionka

Punkt pomiarowy	Obszar	Współrzędne topograficzne*		Współrzędne geograficzne	
		X_1992	Y_1992	X2	Y2
1	STUDZIONKA	485191.60	232676.13	18°47'36,515''E	49°57'40,316''N
2	STUDZIONKA	485443.13	232724.15	18°47'49,137''E	49°57'41,894''N
3	STUDZIONKA	485443.78	232623.21	18°47'49,183''E	49°57'38,625''N
4	STUDZIONKA	485694.79	232675.14	18°48'1,778''E	49°57'40,328''N

* – państwowy układ współrzędnych płaskich prostokątnych "1992"

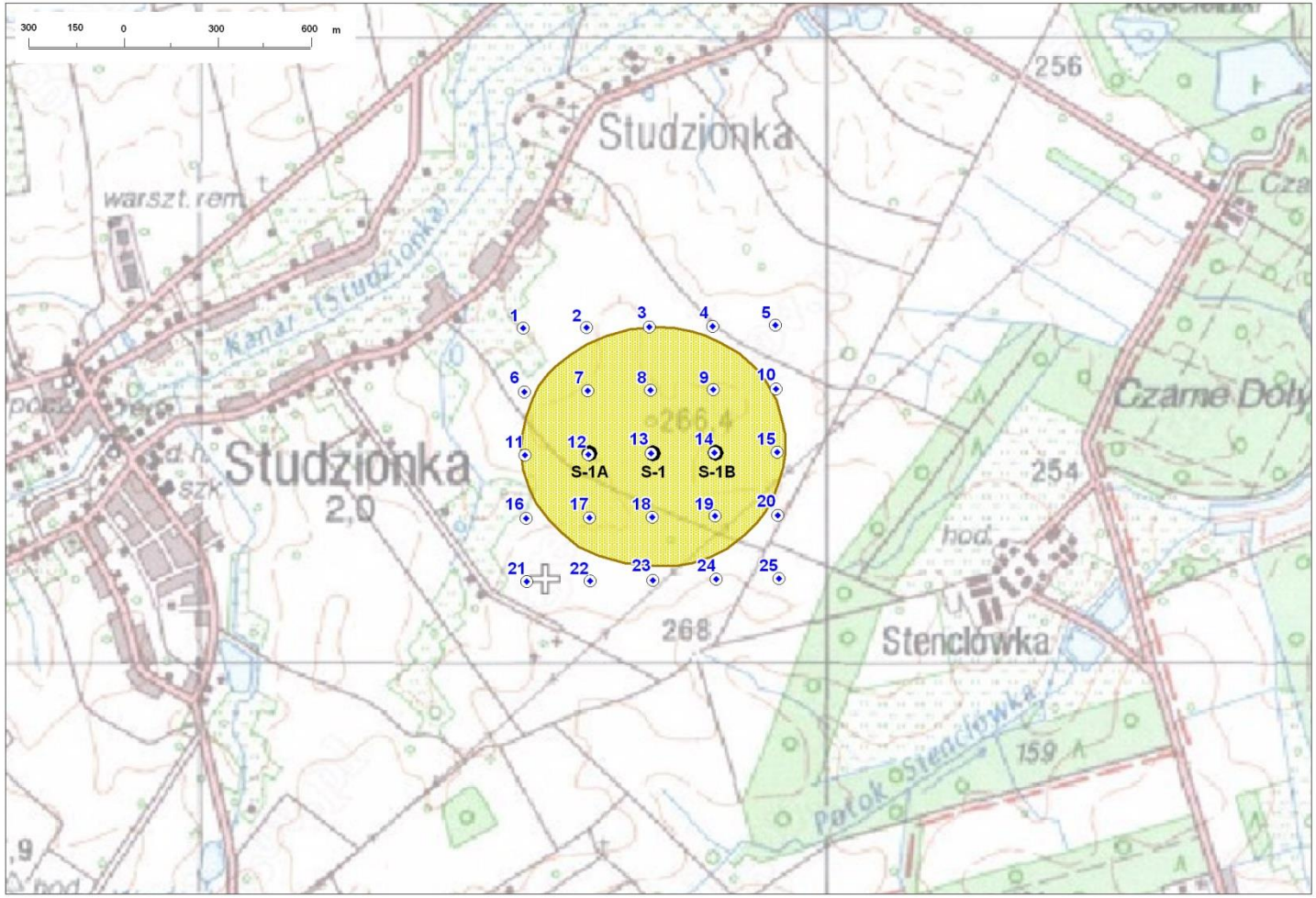


Fig. 1.1.18_239 Lokalizacja punktów pomiarowych zawartości CO_2 w powietrzu podglebowym na składowisku Pawłowice-Studzionka

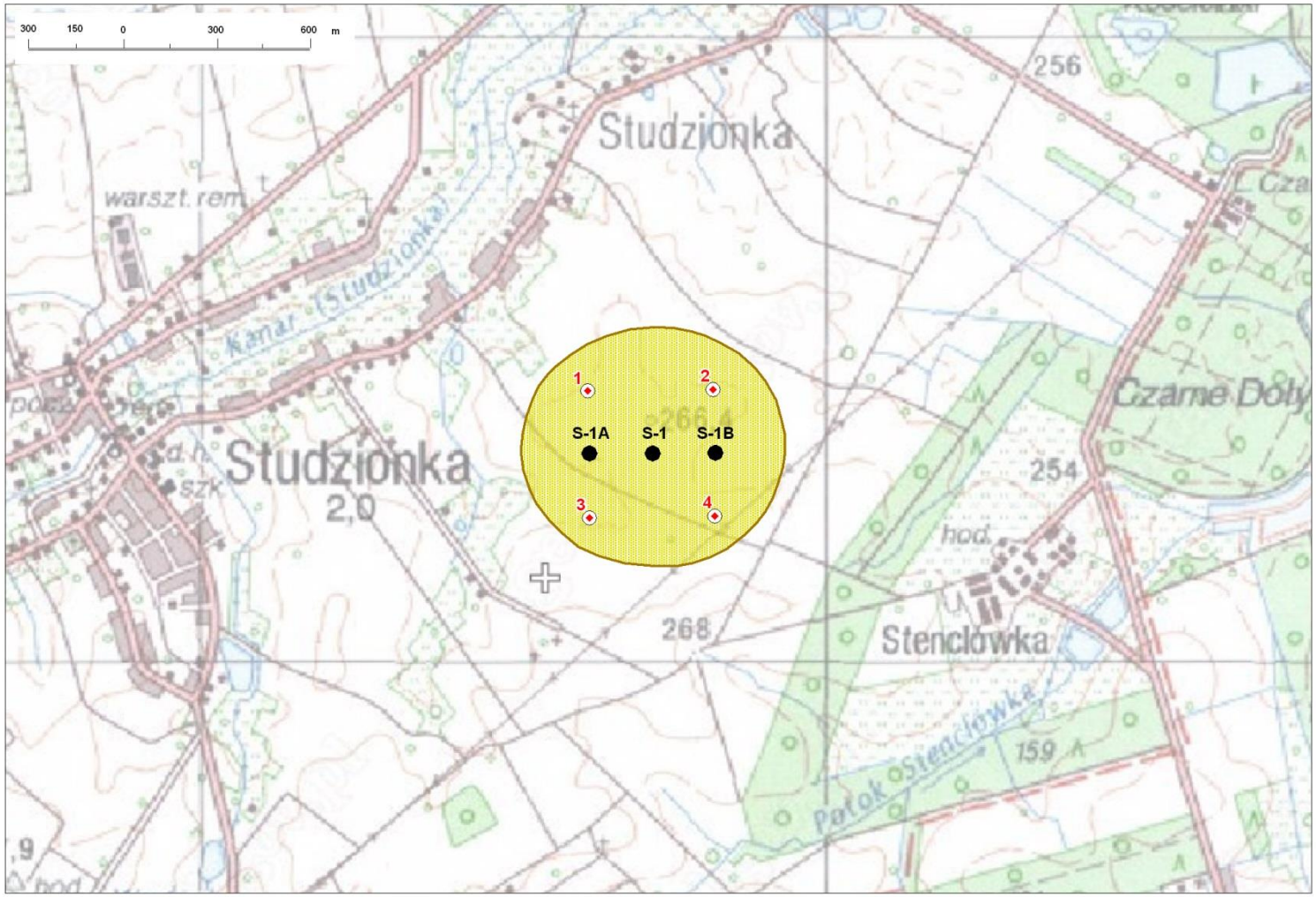


Fig. 1.1.18_240 Lokalizacja punktów Pomiarów sezonowych zawartości CO_2 w powietrzu podglebowym na składowisku Pawłowice-Studzionka

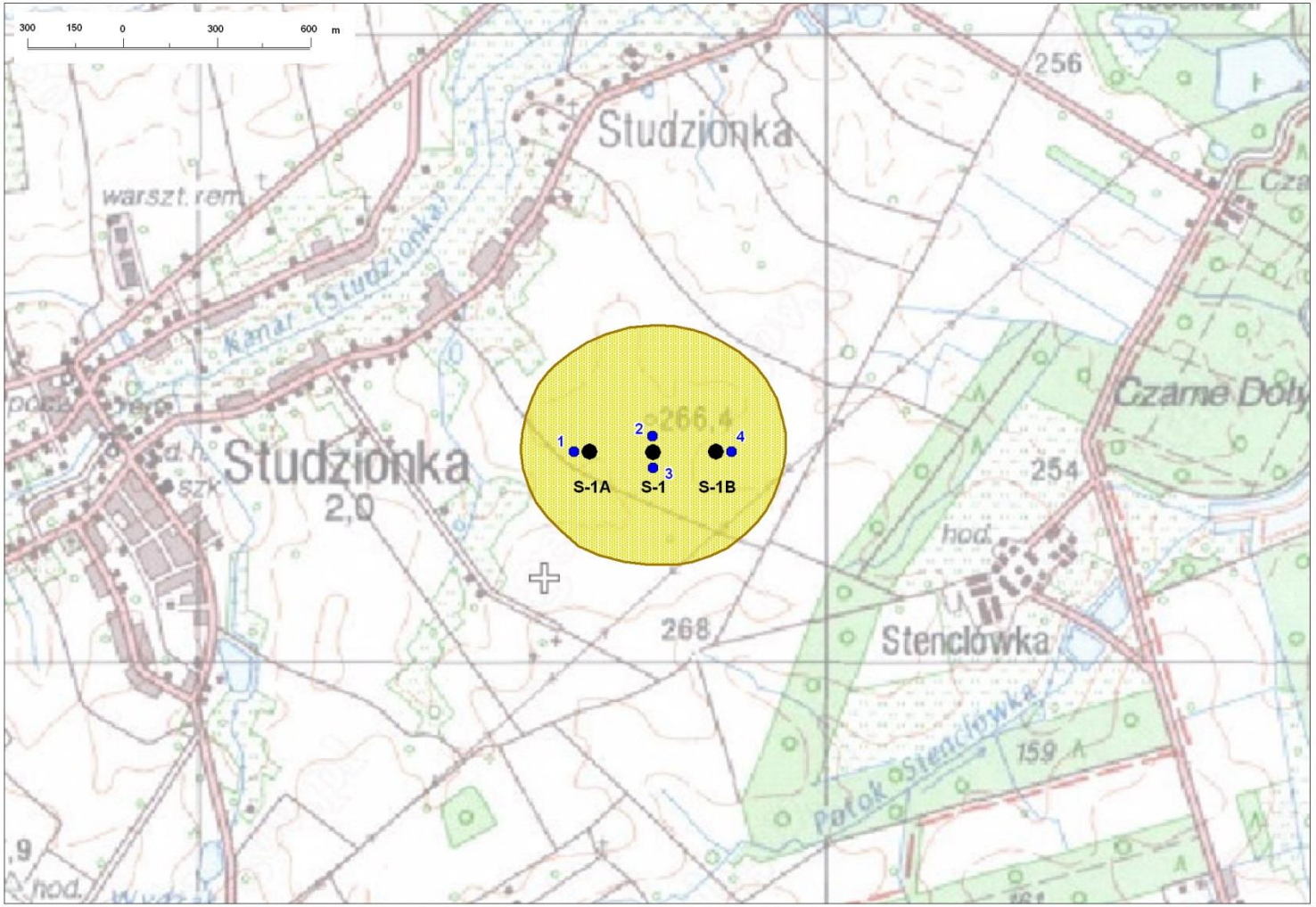


Fig. 1.1.18_241 Lokalizacja punktów ciągłego pomiaru zawartości CO_2 w powietrzu podglebowym wokół otworów na składowisku Pawłowice-Studzionka

Metodyka pomiarów strumienia CO_2

Pomiary naturalnego strumienia dwutlenku węgla prowadzi się przy wykorzystaniu zamkniętej komory. Strumień dwutlenku węgla mierzy się przy wykorzystaniu systemu pomiarowego złożonego z jednostki pomiarowej i jednej lub kilku komór pomiarowych oraz komputera (palmtopa) rejestrującego wyniki. System ten oprócz pomiarów strumienia dwutlenku węgla powinien mierzyć temperaturę gleby. Gotowe systemy pomiarowe tego rodzaju są produkowane np. przez firmę LI-COR Inc. umożliwiają one pomiary strumienia dwutlenku węgla jednorazowe i długoterminowe.

System pomiarowy strumienia naturalnego dwutlenku węgla może być również wykonany w oparciu o miernik wielogazowy z czujnikami na podczerwień.

W planowaniu lokalizacji punktów pomiarowych strumienia dwutlenku węgla powinno się brać pod uwagę budowę geologiczną (litologię, tektonikę i warunki hydrogeologiczne), morfologię, hydrografię i zabudowę terenu.

Badania strumienia dwutlenku węgla powinny być wykonane na obszarze oddziaływania zatłaczanego gazu, na tym samym terenie gdzie będą wykonywane pomiary stężenia dwutlenku węgla. Planowane punkty pomiarowe strumienia CO_2 (4 szt.) będą rozmieszczone w siatce podstawowej o rozmiarach około 400 x 400 m (**Tab. 1.1.18_42**, **Fig. 1.1.18_242).**

Tab. 1.1.18_42 Lokalizacja punktów pomiarowych strumienia CO_2oraz poboru próbek do badań biomonitoringu na składowisku Pawłowice-Studzionka

Punkt pomiarowy	Obszar	Współrzędne topograficzne*		Współrzędne geograficzne	
		X_1992	Y_1992	X2	Y2
1	STUDZIONKA	485235.86	232873.05	18° 47' 38,710" E	49° 57' 46,699" N
2	STUDZIONKA	485638.54	232877.02	18° 47' 58,927" E	49° 57' 46,863" N
3	STUDZIONKA	485240.13	232469.08	18° 47' 38,980" E	49° 57' 33,615" N
4	STUDZIONKA	485642.81	232473.06	18° 47' 59,196" E	49° 57' 33,779" N

* – państwowy układ współrzędnych płaskich prostokątnych "1992"

Przy otworze zatłaczającym badania powinny być wykonywane w dodatkowych punktach pomiarowych. Na obszarze tym przewidziano punktów pomiarowych w siatce (25x25 m) wokół otworów. Ich lokalizację, po weryfikacji na podstawie prac terenowych, należy przedstawić na mapie topograficznej w skali 1:1000.

W każdym punkcie pomiary strumienia CO_2 powinny być wykonywane przez około 10 minut przy wykorzystaniu systemu automatycznego pomiaru LI-8100.

Wokół otworów można również prowadzić ciągły pomiar strumienia dwutlenku węgla przy wykorzystaniu systemu ciągłego pomiaru firmy LI-COR Inc.

Lokalizację punktów pomiarowych powinno się ustalić w terenie za pomocą urządzeń nawigacji satelitarnej GPS. Część punktów pomiarowych ze względu na występowanie trwałej nawierzchni, przeszkód terenowych może być przesunięte o niewielką odległość w stosunku do planowanej.

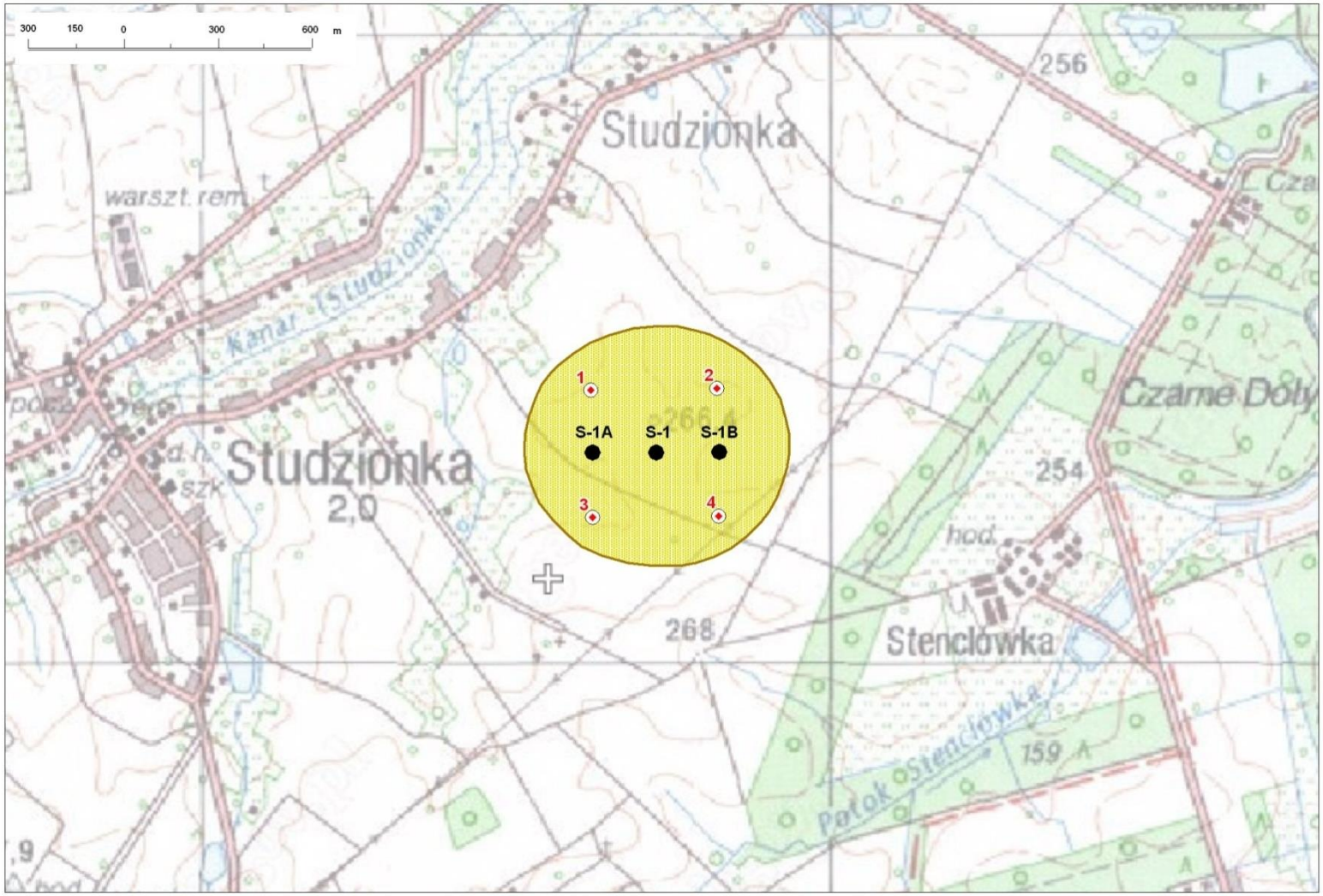


Fig. 1.1.18_242 Lokalizacja punktów pomiarów strumienia powierzchniowego CO_2 w powietrzu podglebowym i poboru próbek do badań biomonitoringu na składowisku Pawłowice-Studzionka

Harmonogram pomiarów zawartości i strumienia CO2

Badania zawartości dwutlenku węgla w powietrzu podglebowym będą prowadzone w trakcie głównych etapów projektu: monitorowanie poziomu odniesienia, w czasie eksploatacji i po zamknięciu składowiska (**Tab. 1.1.18_43**).

Tab. 1.1.18_43 Harmonogram pomiarów zawartości CO_2 w powietrzu podglebowym, strumienia i biomonitoringu na składowisku Pawłowice-Studzionka

Metoda badań		**Poziom odniesienia**	**Eksploatacja składowiska**	**Po zamknięciu składowiska**
Pomiar koncentracji CO_2	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_2	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

Harmonogram pomiarów stężenia CO_2 w powietrzu podglebowym

W ramach monitorowania poziomu odniesienia dla składowiska z obszaru proponuje się wykonanie następujących badań:

- szczegółowe zdjęcie 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 (dwukrotnie w sezonach wiosennym, letnim, jesiennym i zimowym),
- badania geochemiczne rozkładu stężeń CO_2 do głębokości 5 m w wybranych punktach – 2 razy w roku (sezon ciepły i chłodny),
- ciągłe pomiary zawartości CO_2 w powietrzu glebowym w zastabilizowanych punktach pomiarowych.

W trakcie eksploatacji składowiska CO_2 proponuje się wykonanie następujących badań geochemicznych zawartości dwutlenku węgla:

- szczegółowe zdjęcie 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,
- ciągłe pomiary zawartości CO_2 w powietrzu podglebowym w zastabilizowanych punktach pomiarowych.

Po zamknięciu składowiska z 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),
- ciągłe pomiary zawartości CO_2 w powietrzu podglebowym w zastabilizowanych punktach pomiarowych.

Harmonogram pomiarów strumienia CO_2

Pomiar strumienia dwutlenku węgla należy przeprowadzić w trakcie wszystkich głównych etapów projektu: monitorowanie poziomu odniesienia, w czasie eksploatacji i po zamknięciu

W ramach monitorowania poziomu odniesienia dla składowiska na obszarze Pawłowice-Studzionka proponuje się wykonanie następujących badań strumienia dwutlenku węgla:

- badania tła strumienia dwutlenku węgla w siatce podstawowej na terenie składowiska – razy w roku,

- badania tła strumienia dwutlenku węgla w pobliżu otworu zatłaczającego – 4 razy w roku,
- ciągłe pomiary strumienia dwutlenku węgla w pobliżu otworów.

W trakcie eksploatacji składowiska na obszarze Pawłowice-Studzionka proponuje się wykonanie następujących badań strumienia dwutlenku węgla:

- badania strumienia dwutlenku węgla w siatce podstawowej na terenie składowiska – 2 raz w roku (sezon ciepły i zimny),
- badania strumienia dwutlenku węgla w pobliżu otworu zatłaczającego – 4 razy w roku,
- ciągłe pomiary strumienia dwutlenku węgla w pobliżu otworów.

Po zamknięciu składowiska na obszarze Pawłowice-Studzionka proponowane są następujące badania strumienia dwutlenku węgla:

- badania tła strumienia dwutlenku węgla w pobliżu otworu zatłaczającego – 4 razy w roku,
- ciągłe pomiary strumienia dwutlenku węgla w pobliżu otworów.

Program biomonitoringu dla składowiska Pawłowice-Studzionka

Biomonitoring oparty będzie na badaniu zmian ilościowych wskaźnikowych mikroorganizmów i procesów życiowych będących wynikiem zmiany podaży dwutlenku węgla w środowisku glebowym wywołanej wyciekiem tego gazu z podziemnego składowiska.

Próby gruntowe pobierane z terenu składowiska CO_2 stanowią materiał do badań mikrobiologicznych wykonywanych w ramach prac monitoringowych. Przy poborze próbek należy uwzględnić odpowiednią lokalizację punktów i głębokość poboru oraz zachowania jałowości 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, dostępności poszczególnych punktów poboru próbek), lokalizacji otworu zatłaczającego, geologii struktury, w tym prawdopodobnego przebiegu uskoków.

W celu uzyskania pełnej informacji o mikroflorze występującej na danym terenie, w środowisku gruntowym, próbki powinno się pobierać ze stałej głębokości (60-80 cm). Zróżnicowanie mikroflory w zależności od głębokości bytowania jest znaczne, gdyż 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.

Metodyka i harmonogram badań biomonitoringu

Proponuje się przeprowadzenie następujących prac w ramach biomonitoringu składowania dwutlenku węgla przed, w trakcie i po zatłaczaniu gazu:

- 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 prowadzić przez 2 lata lub do momentu rozpoczęcia eksploatacji składowiska dwutlenku węgla.

Monitoring mikrobiologiczny w czasie eksploatacji składowiska dwutlenku węgla i po jej zakończeniu prowadzić się będzie poprzez badania zmian ilościowych bakterii i procesów wskaźnikowych na obszarze składowiska. Badania mikroorganizmów wskaźnikowych należy prowadzić czterokrotnie w ciągu roku przez cały czas trwania zatłaczania dwutlenku węgla.

Pobór próbek będzie wykonany na obszarze całego składowiska w siatce o rozmiarach około 400 x 400 m (**Tab. 1.1.18_42**, **Fig.1.1.18_242**). Próbki pobierane będą z głębokości 80 cm p.p.t. za pomocą świdra

ręcznego z zachowaniem czystości mikrobiologicznej. Przewiduje się również pobór próbek w pobliżu otworu zatłaczającego i obserwacyjnych.

Monitoring sejsmologiczny i metodą tomografii pasywnej dla wytypowanych składowisk w pokładach węgla GZW w rejonie Pawłowice-Mizerów (GIG)

(Grzegorz Mutke, Jarosław Chećko)

Na II półrocze 2011 roku w zadaniu **1.1.18**, dla GIG przewidziano wykonanie programu monitoringu wtłaczania CO_2 w pokłady węgla w wybranym obszarze w GZW w rejonie Pawłowice-Mizerów. Rejon ten został wybrany po analizie danych geologicznych, jako potencjalne miejsce składowania CO_2 w pokładach węgla. Główny Instytut Górnictwa miał skoncentrować się w tym zadaniu na opisie ogólnych założeń i celów monitorowania w czasie eksploatacji zbiornika i po jego zamknięciu, podstaw fizycznych monitorowania geofizycznego płynów złożowych, ogólnym opisie metod monitorowania oraz szczegółowym projekcie monitorowania płynów złożowych z wykorzystaniem metody sejsmologicznej na przykładzie kolektora w pokładach węgla GZW w rejonie Pawłowice-Mizerów.

CHARAKTERYSTYKA WYBRANEGO ZBIORNIKA SKŁADOWANIA CO2 W POKŁADACH WĘGLA GZW

W pokładach węgla wybrano dwa potencjalnie najlepsze zbiorniki tj. Studzionka (pokład 510) i Brzeźce (pokład 405) w południowej części zagłębia węglowego (Zad. **1.1.9** (Chećko i in., 2010), zad. **1.1.16** (Urych i inni 2011)). Na **Fig. 1.1.18_243** przedstawiono lokalizację wytypowanych otworów zatłaczających i produkcyjnych. Są to dwa zestawy otworów składające się z otworu iniekcyjnego oraz dwóch otworów produkcyjnych umiejscowionych po obu stronach otworu zatłaczającego i oddalonych od niego o 200 metrów. Pierwszy z zestawów otworów symulacyjnych zlokalizowano niedaleko miejscowości Brzeźce, a drugi w okolicy miejscowości Studzionka.

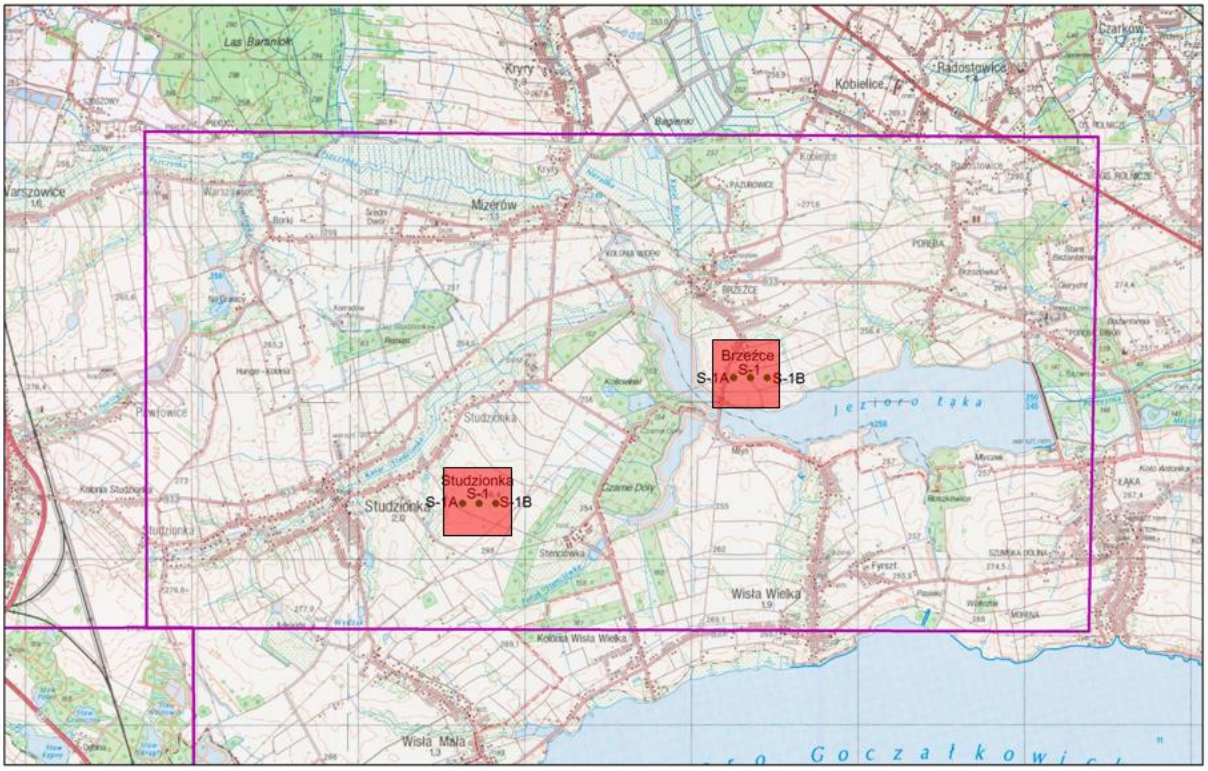


Fig. 1.1.18_243 Rozmieszczenie wytypowanych otworów

Dla wybranych lokalizacji wykonano modelowanie numeryczne. W pierwszym z wykonanych modeli numerycznych (Brzeźce) przeprowadzono szereg symulacji związanych z zatłaczaniem CO_2 do pokładu 405. W części centralnej modelu znajduje się otwór iniekcyjny Brzeźce S-1 oraz dwa otwory produkcyjne Brzeźce S-1A i Brzeźce S-1B (**Fig. 1.1.18_244a**).W otworze zatłaczającym spąg pokładu 405 zalega na głębokości 1388 m.

Drugi z wykonanych modeli numerycznych (Studzionka) obejmuje szereg symulacji związanych z zatłaczaniem CO_2 do pokładu 510. Na **Fig. 1.1.18_244b** przedstawiono rozmieszczenie otworu iniekcyjnego Studzionka S-1 oraz dwóch otworów produkcyjnych Studzionka S-1A oraz Studzionka S-1B. W otworze zatłaczającym spąg pokładu 510 zalega na głębokości 1526 m.

Dla opisanych lokalizacji wtłaczania CO_2 w pokłady węgla opracowano program monitorowania geofizycznego.

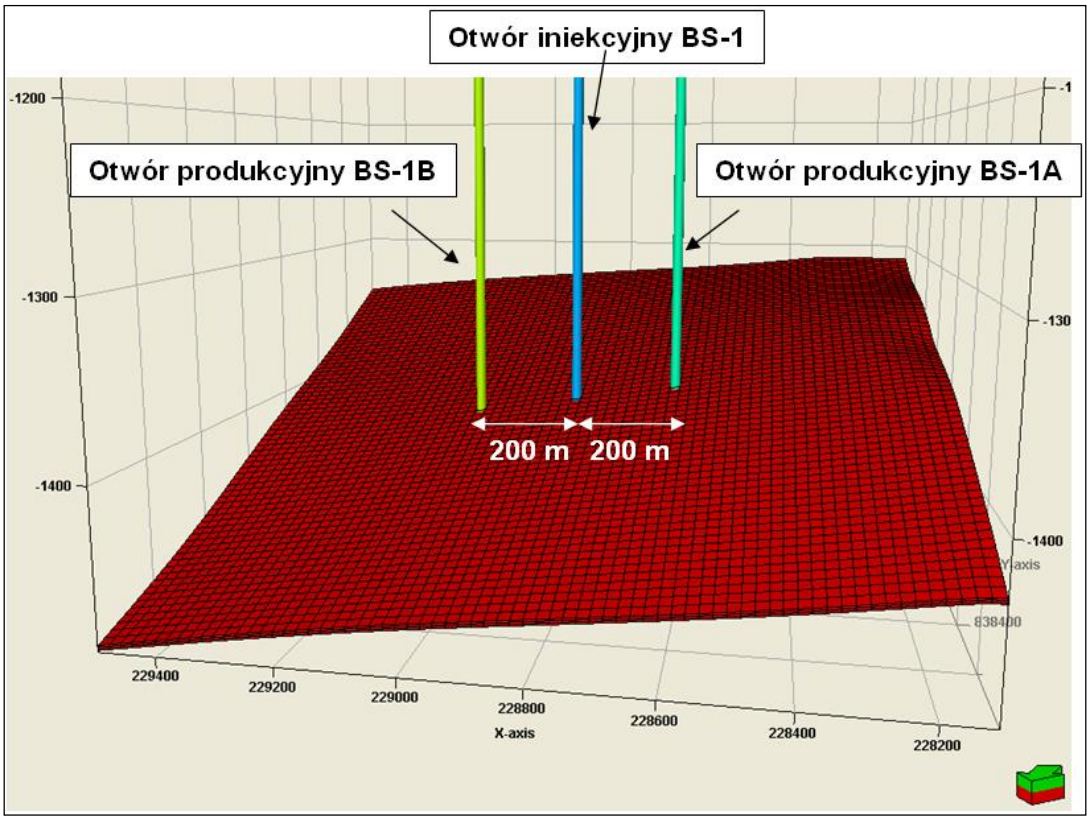


Fig. 1.1.18_244a Rozmieszczenie otworów w modelu Brzeźce

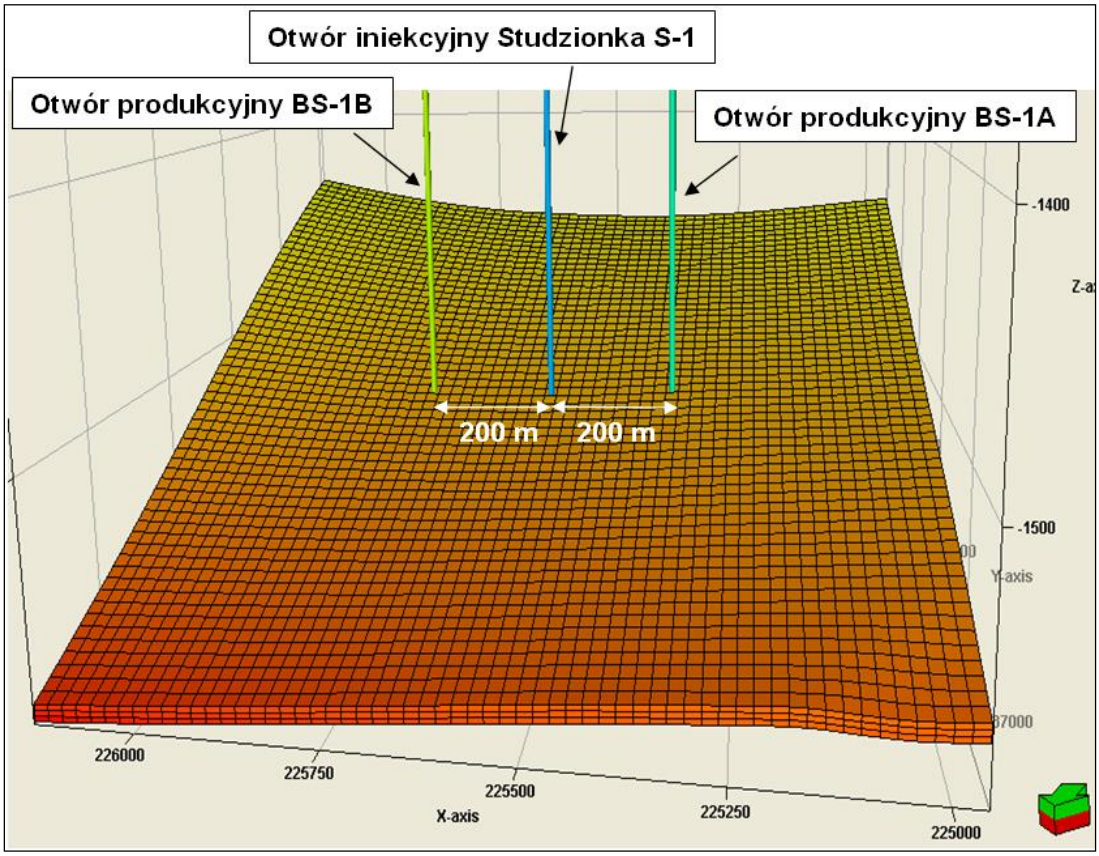


Fig. 1.1.18_244b Rozmieszczenie otworów w modelu Studzionka

PODSTAWY FIZYCZNE PROWADZENIA MONITORINGU GEOFIZYCZNEGO

Miejsce do składowania CO_2 musi się cechować odpowiednio dobrymi parametrami zbiornikowymi oraz posiadać wystarczającą izolację hydrauliczną skał stropowych i spągowych oraz posiadać wystarczającą izolację skał w strefach brzeżnych przyszłego zbiornika, celem uniemożliwienia ucieczki CO_2. Szczelność zależy od struktury geologicznej zbiornika jego własności petrofizycznych oraz od rodzaju płynu zatłaczanego (czy CO_2 jest w postaci gazowej czy w postaci krytycznej) oraz rozkładu ciśnienia w trakcie zatłaczania. Do badania szczelności zbiornika CO_2 najlepiej używać metod pozwalających kontrolować rozprzestrzenianie się gazu w strukturze geologicznej. Do osiągnięcia tego celu bardzo pomocnymi mogą być 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 prędkości fal sejsmicznych i ich tłumienie, gęstość ośrodka i jego własności elektryczne. Dodatkowo w pobliskich kopalniach węgla występują wstrząsy górotworu indukowane eksploatacją, które należy również monitorować i umieć odróżnić od wstrząsów sejsmicznych wywołanych samym procesem iniekcji CO_2.

Podstawowe techniki monitorowania płytkich i głębokich struktur opierają się na wykorzystaniu:

- Metody sejsmicznej;
- Metody grawimetrycznej;

- Metody elektrycznej i elektromagnetycznej;
- Metody sejsmologicznej;
- Pomiarach geochemicznych;
- Pomiarach satelitarnych i z samolotu;
- Badaniach geofizycznych w otworach;
- Metody sejsmometrycznej.

Metoda sejsmiczna

Prędkości fal sejsmicznych podłużnych V_s i poprzecznych V_s są związane z modułami sprężystości: K_s - modułem sprężystości objętościowej i μ -modułem sztywności przy pomocy zależności:

$$V_p = \sqrt{\frac{K_s + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \quad V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

gdzie ρ - gęstość objętościowa

Zgodnie z uogólnionym wzorem Gaussmana (Berryman 1999) ośrodek skalny nasycony gazem K_s zmienia moduł objętościowy.

$$K_s = K_d + \Delta K_d$$

$$\Delta K_d = \frac{K_0(1-\frac{K_d}{K_0})^2}{1-\phi-\frac{K_d}{K_0}+\phi.\frac{K_0}{K_f}} \quad \mu_s = \mu_d$$

gdzie K_0, K_f, K_d, K_s sprężyste moduły objętościowe odpowiednio dla, materiału budującego ziarna cieczy przepływającej przez pory, suchej skały i szkieletu skalnego nasyconego gazem. μ_s i μ_d modułu sztywności ośrodków pustych i nasyconych. Wzór ten można uprościć do postaci (De-hua Han, Michael L Batzle, 2004):

$$K_s = K_d + G(\phi).K_f$$

gdzie

$$G(\phi) = \frac{(1-K_n(\phi))^2}{\phi} \quad \text{gdzie } K_n = \frac{K_d}{K_0}$$

Wzory te wskazują na wpływ nasycenia ośrodka porowego na prędkość fal podłużnych. Na figurze **1.1.18_245** pokazano wyniki pomiarów prędkości fal sejsmicznych w zależności od ciśnienia i nasycenia. Jest to podstawa, na której można budować rozpoznanie zmian w ośrodku porowym wypełnianym dwutlenkiem węgla w oparciu o badania sejsmiczne. Trzeba jednak zwrócić uwagę na to, że prędkość fal podłużnych zależy nie tylko od nasycenia, ale również od innych czynników.

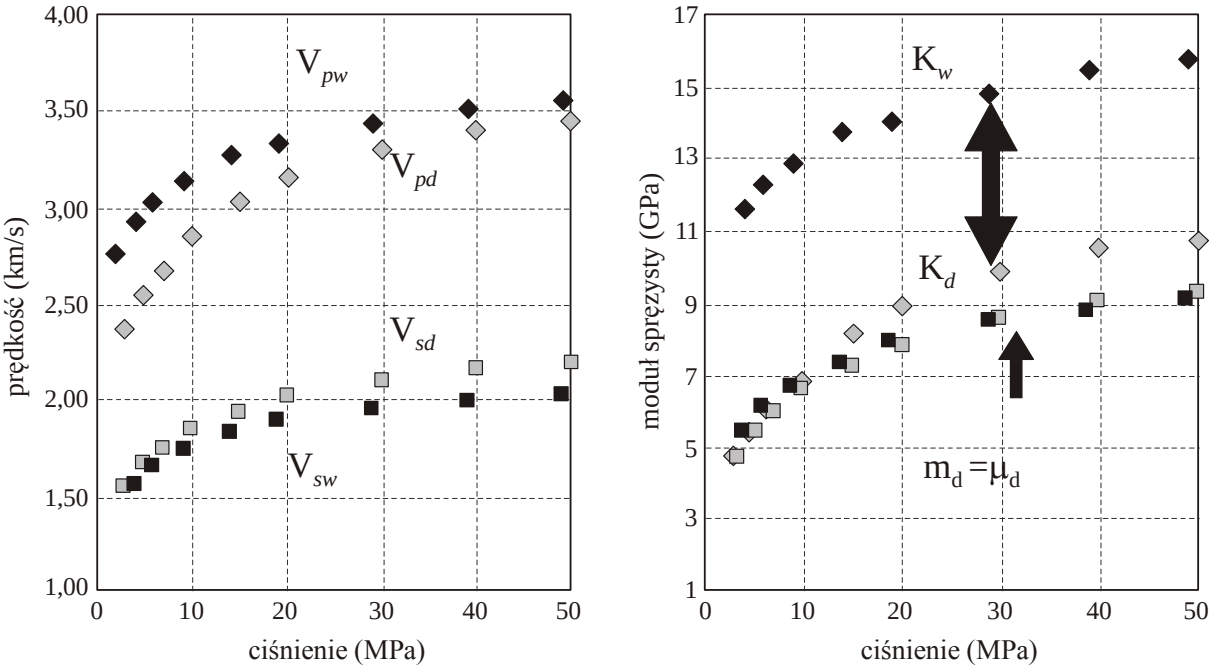
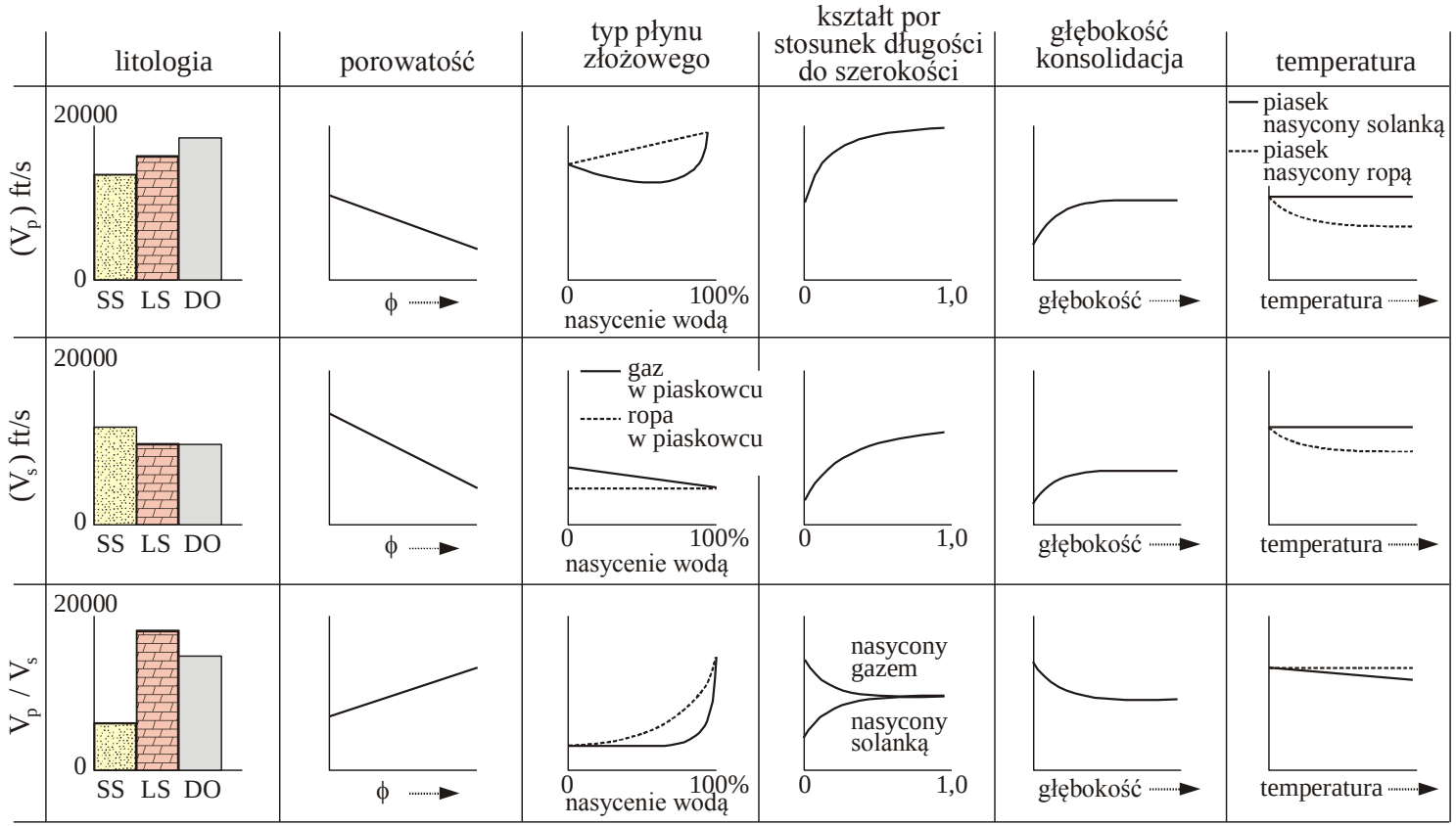


Fig. 1.1.18_245 Zmiana prędkości i modułu objętościowego w funkcji ciśnienia (De-hua Han, Michael L Batzle, 2004). Prędkości fali $V_{pw}, V_{pd}, V_{sw}, V_{sd}$ - odpowiednio prędkości podłużnej fali sejsmicznej w ośrodku nasyconym wodą i suchym oraz prędkości poprzecznej fali sejsmicznej w ośrodku nasyconym wodą i suchym



DO - dolomit

LS - skały klastyczne skonsolodoane

SS - skały klastyczne słabo skonsolodoane

ϕ - porowatość

Fig. 1.1.18_246 Zależność prędkości fal sejsmicznych w ośrodku porowym od parametrów charakteryzujących ośrodek (Tatham R.H., McCormack 1991)

Prędkości fal sejsmicznych zależą od budowy litologicznej (na figurze **1.1.18_246** SS - piaskowce drobnoziarniste, LS - piaskowce gruboziarniste DO - dolomity), porowatości (wzrost porowatości intensywnie zmienia prędkość fali podłużnej) nasycenia, kształtu porów oraz temperatury.

Jeżeli chcemy wykorzystać zmiany modułów sprężystości wywołane nasyceniem ośrodka porowatego przez CO_2 i związanymi z tym nasyceniem zmiany prędkości fal sejsmicznych to trzeba zwrócić uwagę na zależność tych własności od ciśnienia (**Fig. 1.1.18_247)**. Po przejściu dwutlenku węgla w stan subkrytyczny te własności zmieniają się diametralnie.

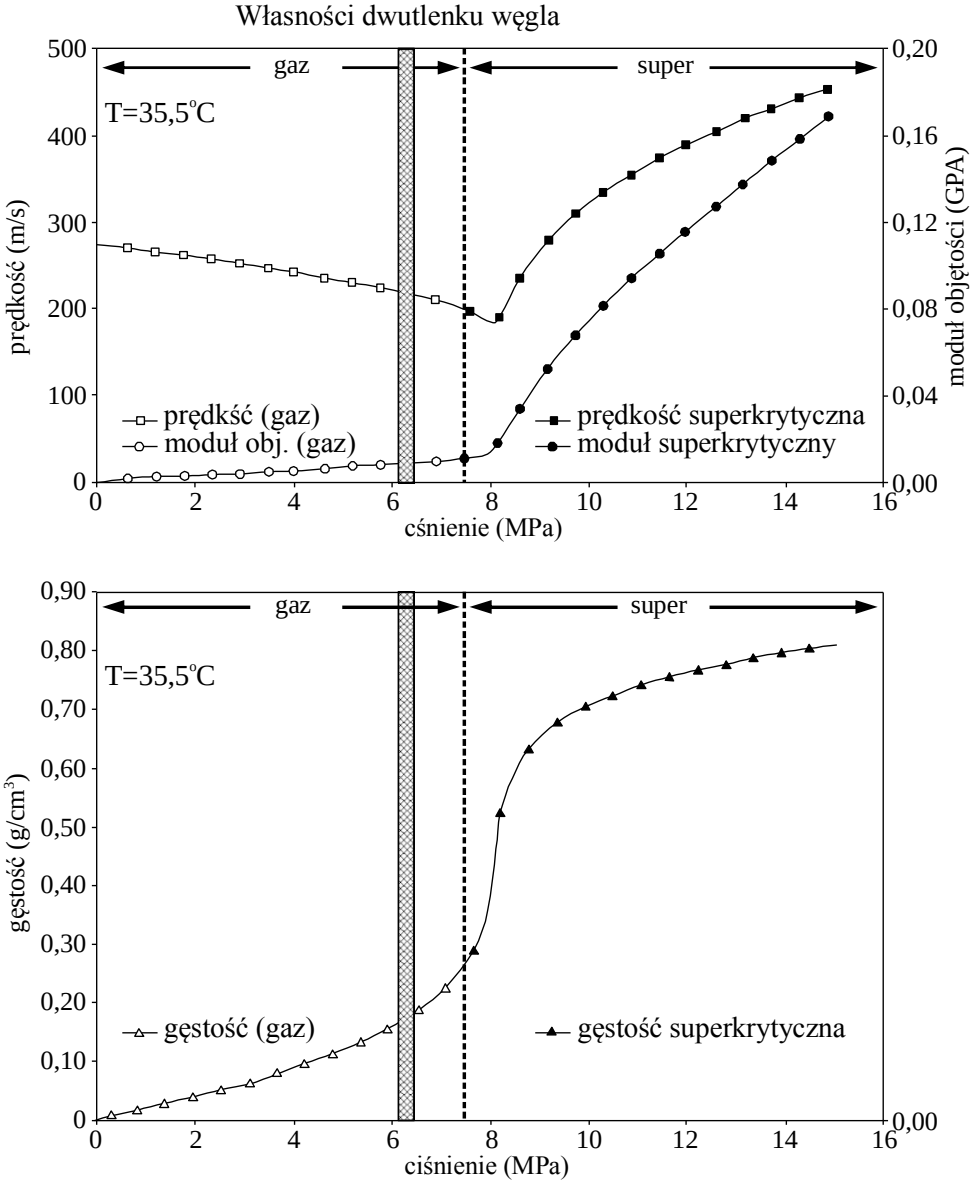


Fig. 1.1.18_247 Zmiana prędkości, gęstości i modułów sprężystych CO_2 w zależności od jego ciśnienia. (Kazemeini S H 2008)

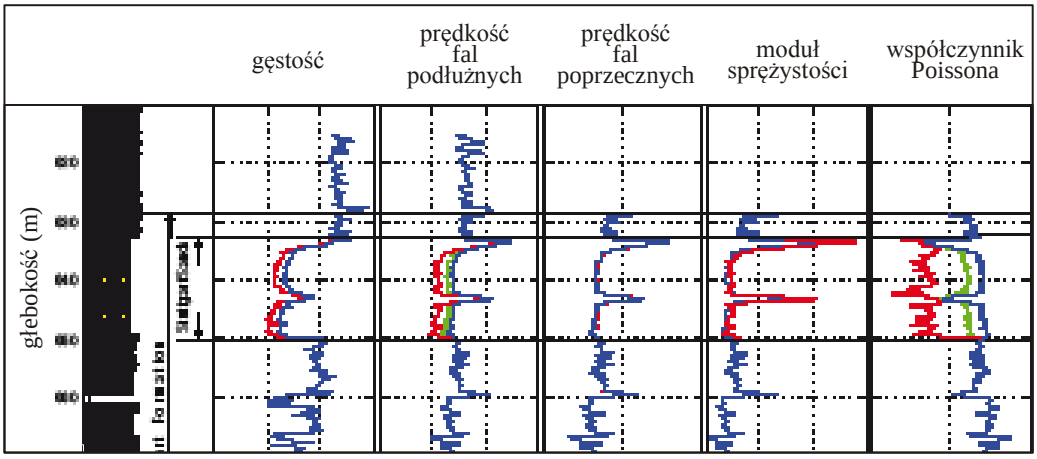


Fig. 1.1.18_248Własności fizyczne ośrodka (piaskowca) wypełnionego w 30% dwutlenkiem węgla (Norden i In. 2008)

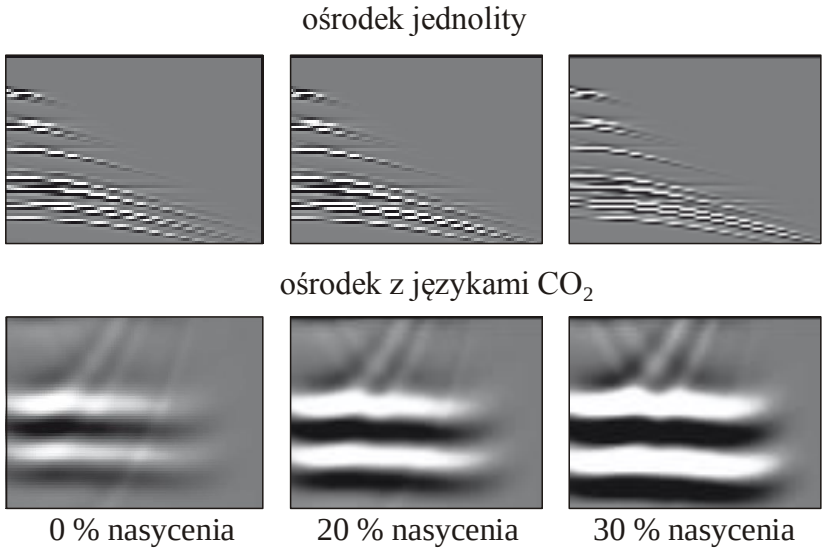


Fig. 1.1.18_249 Syntetyczne sejsmogramy przed i po zatłoczeniu CO_2 (Kazemeini S H, 2008)

Niemniej badania empiryczne wskazują na to że wprowadzenie dwutlenku węgla do porów powoduje istotną zmianę prędkości fal sejsmicznych. Na figurze **1.1.18_248** pokazano zmiany gęstości prędkości fal sejsmicznych i modułów sprężystych w warstwie nasyconej dwutlenkiem węgla a na figurze **1.1.18_249** zamieszczono sejsmogramy syntetyczne obliczone na podstawie danych pomiarowych. Różnice pomiędzy wynikami uzyskanymi dla warstwy nasyconej gazem i nienasyconej są ewidentne.

Tak więc zmiany własności sprężystych wywołane zatłoczeniem dwutlenku węgla dają wyraźny efekt sejsmiczny. Doświadczenie uzyskane dotychczas na złożu norweskim Sleipner oraz badania modelowe wykazały, że najlepszymi metodami wykorzystania pomiarów sejsmicznych jest badanie zmienności amplitudy (AVO) z odległością 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. Nasycenie warstwy dwutlenkiem węgla powoduje, że czas przejścia przez tą warstwę wzrasta a więc obserwujemy opóźnienie refleksów sejsmicznych pochodzących z poziomów niższych niż nasycona warstwa w porównaniu z czasami zarejestrowanymi w ośrodku nie nasyconym CO_2. Przykład takiej interpretacji pokazano na **Fig. 1.1.18_250**.

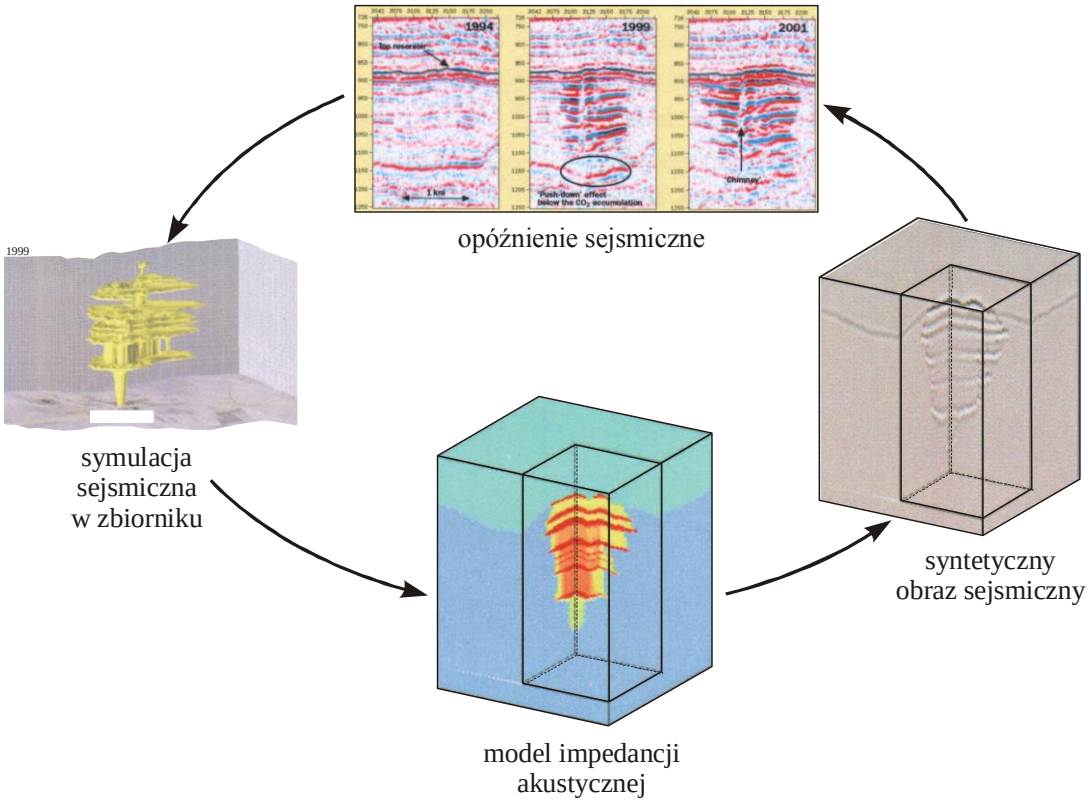


Fig. 1.1.18_250 Schemat badań sejsmicznych prowadzonych przez TNO w Holandii dla interpretacji zapisów sejsmicznych

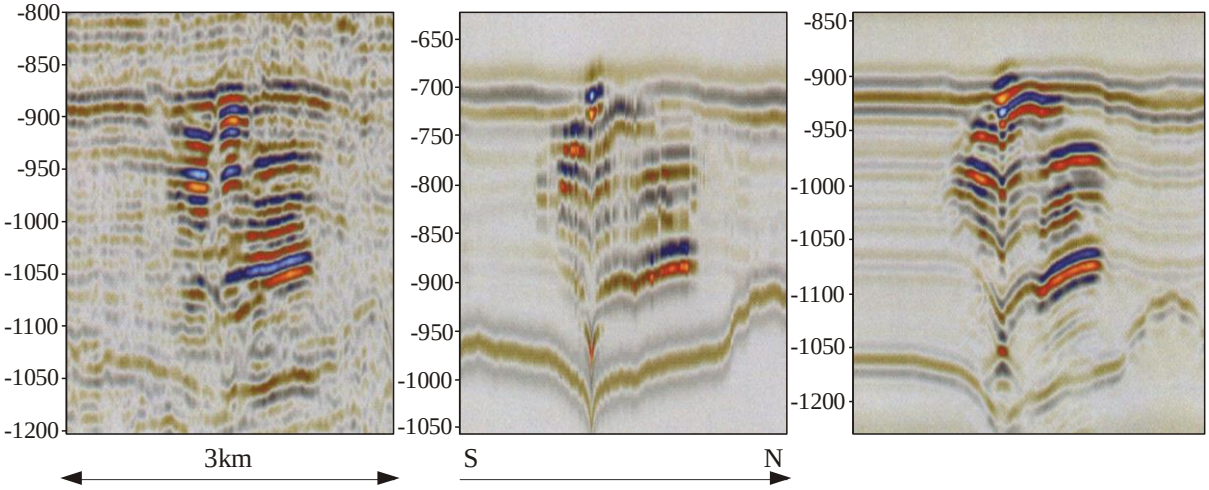


Fig. 1.1.18_251 Wyniki badań i modelowań opóźnień sejsmicznych na złożu Sleipner (prace prowadzone przez TNO)

Na figurze **1.1.18_251** przedstawiono spodziewane opóźnienia sejsmiczne w warunkach jakie występują w złożu Sleipner powstałe w wyniku zatłoczenia dwutlenku węgla. Potwierdzają one dużą wrażliwość tego parametru na objętość zatłoczonego medium.

Trzeba zwrócić uwagę na to, że badania szczelności zbiornika nie ograniczają się do odtwarzania zmian fizycznych w warstwie, do której gaz jest zatłaczany, ale również do badania zmian w nadkładzie. Na figurze **1.1.18_252** pokazano przykład badań w rejonie, w którym mamy uskok, który może być przepuszczalny dla gazu, w którym brak szczelności.

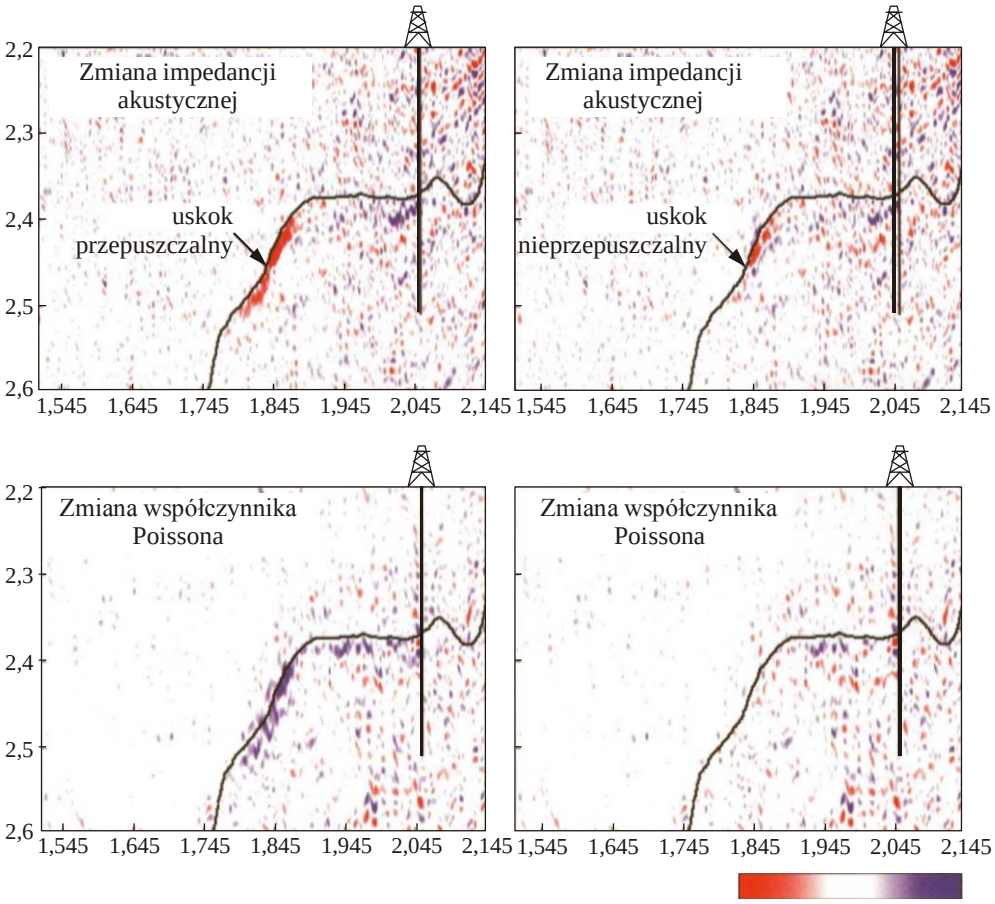


Fig. 1.1.18_252 Interpretacja danych sejsmicznych z rejonu uskoku oparta o wyniki uwzględniające opóźnienie sejsmiczne i bez tych wyników (Berclay 2008) Wartości amplitud zmieniają się od 0.94 (kolor czerwony) do 1.08 kolor niebieski) wartości średnich.

Dzięki zastosowaniu metody opóźnień sejsmicznych (**Fig. 1.1.18_252**) udało się zidentyfikować przepuszczalność strefy uskokowej.

Metoda grawimetryczna

Istotnym parametrem, który zmienia się w wyniku zatłoczenia poziomu geologicznego dwutlenkiem węgla jest zmiana gęstości objętościowej skały. Taka zmiana zależy zarówno od porowatości ośrodka jak również od stanu fizycznego, w którym znajduje się gaz (stan gazowy lub podkrytyczny). Można przyjąć, że gęstość objętościowa skały D_{bulk} jest równa:

$D_{bulk}= (1-S_w-S_{CO2}) D_{grain}+S_wD_{brine}+S_{CO2} D_{CO2}$

gdzie D_{grain}, D_{brine}, D_{CO2} są odpowiednio gęstościami ziaren, solanki i dwutlenku węgla. S_w i S_{co2} nasycenia wodą i dwutlenkiem wodą. W tym wzorze nie uwzględniono zmian gęstości wywołanej rozpuszczeniem gazu w solance.

Te zmiany gęstości można mierzyć metodami grawimetrycznymi (**Fig. 1.1.18_253**). 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 zatłaczaniem może być niemierzalny. Jeżeli jednak możemy go pomierzyć to ten sposób kontroli szczelności zbiorników jest użyteczny, ma bowiem następujące zalety: jest tani i pomiary można powtarzać często.

Można sporządzić bilans masowy (uwzględniając gaz rozpuszczony w wodach złożowych) co ma duże znaczenie w ocenie szczelności zbiornika. Można śledzić zmiany w nadkładzie związane z powstaniem przecieku.

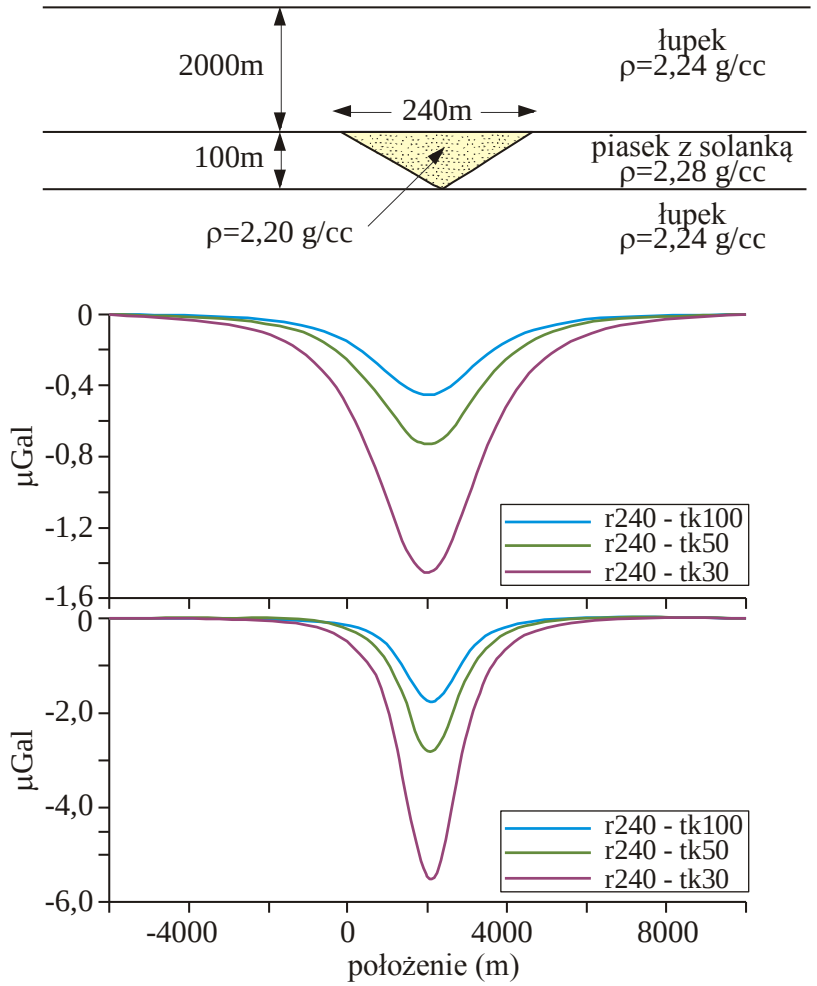


Fig. 1.1.18_253 Anomalie grawimetryczne wywołane zatłaczaniem CO_2 do złoża piaskowcowego Założono trójkątny kształt plamy o szerokości 240 m i głębokości odpowiednio 100, 50 i 30 metrów. Rozpatrzono gaz w stanie krytycznym (górna anomalia) i w stanie gazowym (dolna anomalia) (Gasperikowa i inni 2005)

Dla oceny na ile metoda grawimetryczna jest użyteczna trzeba przeprowadzić modelowania numeryczne.

Metoda elektryczna

Oporność elektryczna skał budujących zbiornik CO_2 jest zależna od nasycenia zbiornika zmineralizowanymi wodami złożowymi (Archie1942) Wypychanie solanki przez CO2 z por powoduje że oporność skały wyraźnie rośnie. Zmianę można zaprezentować obliczając oporności dla ustalonej porowatości i oporności solanki (**Fig. 1.1.18_254**). Należy zwrócić uwagę na to, że oporność po prawej stronie wykresu jest naniesiona w skali logarytmicznej co charakteryzuje istotność zmian jakich należy się spodziewać w rezultacie wzrostu nasycenia ośrodka gazem. Na figurze **1.1.18_255** pokazano przykład badań sejsmicznych i elektrycznych w rejonie, do którego zatłoczono CO_2. Widać bardzo istotną korelację wyników uzyskanych obydwoma metodami.

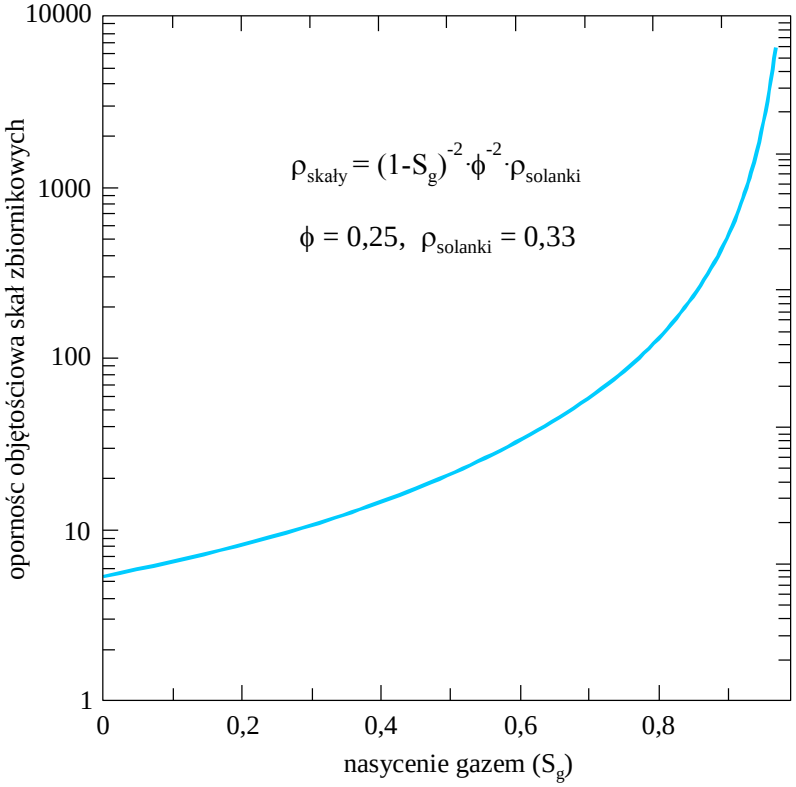


Fig. 1.1.18_254 Zmiany oporności elektrycznej skał zbiornikowych w zależności od nasycenia ośrodka dwutlenkiem węgla S_g.
Wykres sporządzono dla porowatości =0.25 i oporności solanki = 0.33

Badania elektryczne można prowadzić metodami elektromagnetycznymi dobranymi do modelu przepływu z uwzględnieniem własności ośrodka geologicznego.

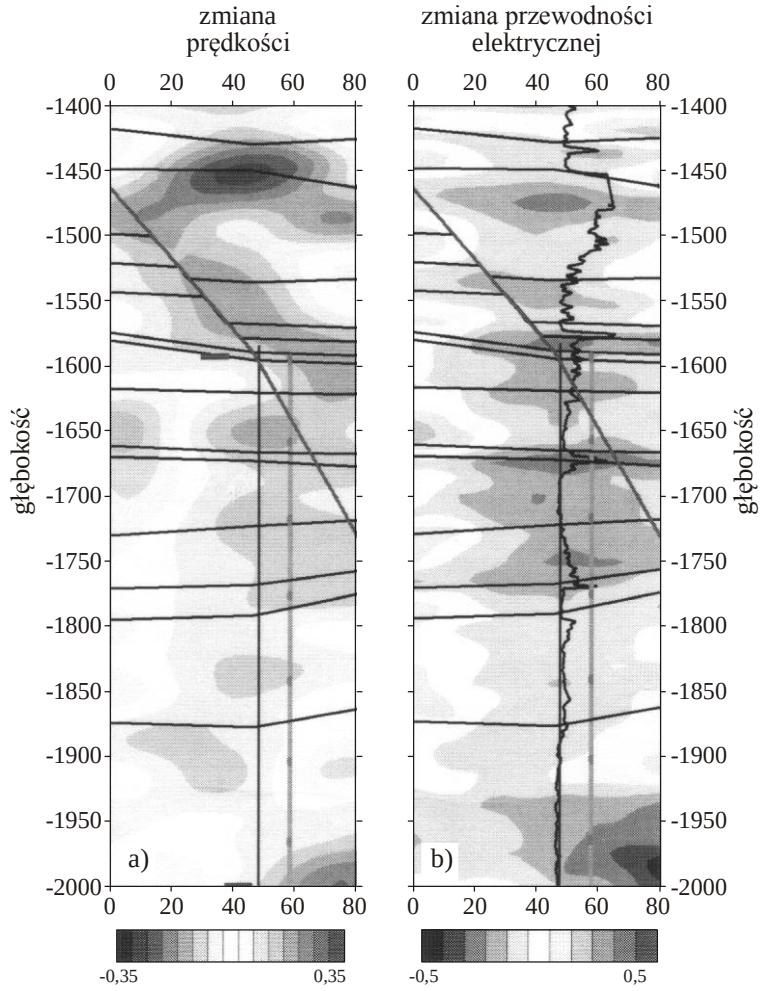


Fig. 1.1.18_255 Przykład badań sejsmicznych i elektrycznych w rejonie w którym zatłoczono CO_2 Berryman J.G. 1999 Orgin of Gassmann's equation Geophysics 64 1627-1629 G.M.Hoverstan, E Gasperikova 2005

Sejsmika pasywna

Zatłaczanie dwutlenku węgla do złoża powoduje powstanie naprężeń w ośrodku, o złożonym rozkładzie. Dotyczy to zarówno lokalnych rozkładów naprężeń wokół por jakie powstają w rejonach dużego gradientu ciśnień jak również regionalnych rozkładów w nadkładzie gdzie powstają naprężenia wynikające z przesuwającego się frontu zatłaczania. Jeżeli 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:

- można badać intensywność procesów zachodzących w ośrodku badając aktywność (ilość zdarzeń w jednostce czasu) sejsmoakustyczną. Na figurze **1.1.18_257** pokazano wyniki takiej rejestracji, jakie uzyskano w Kanadzie w trakcie zatłaczania. Zwraca uwagę korelacja pomiędzy czasem zatłaczania i jego wielkością a aktywnością zarejestrowaną po tym procesie,

• lokalizacja hipocentrum możliwa, gdy prowadzimy rejestrację przy pomocy sieci czujników pozwala wyznaczyć rejony, w których naprężenia są szczególnie intensywne.

• jeżeli rejestracja dotyczy fal poprzecznych to można określić kierunki spękań wykorzystując fakt że ten rodzaj fali ulega rozszczepieniu i dzięki temu zjawisku istnieje możliwość takiej interpretacji zarejestrowanych fal sejsmicznych aby można było wyznaczyć kierunki spękań. Rejestracja musi jednak być prowadzona w paśmie częstości dostosowanej do rozmiarów pęknięć (**Fig. 1.1.18_256)**.

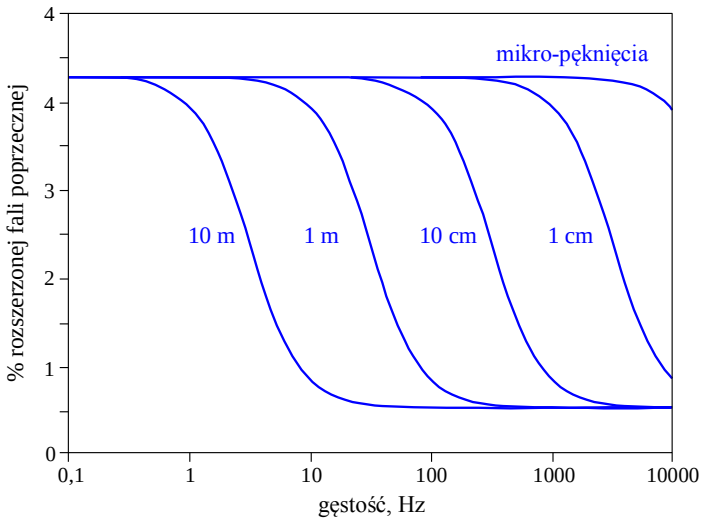


Fig. 1.1.18_256 Zakres długości pęknięć i związanych z tym częstości fali poprzecznej, które można wykorzystać w metodzie poprzecznej sejsmicznej fali rozszczepionej (shear splitting)

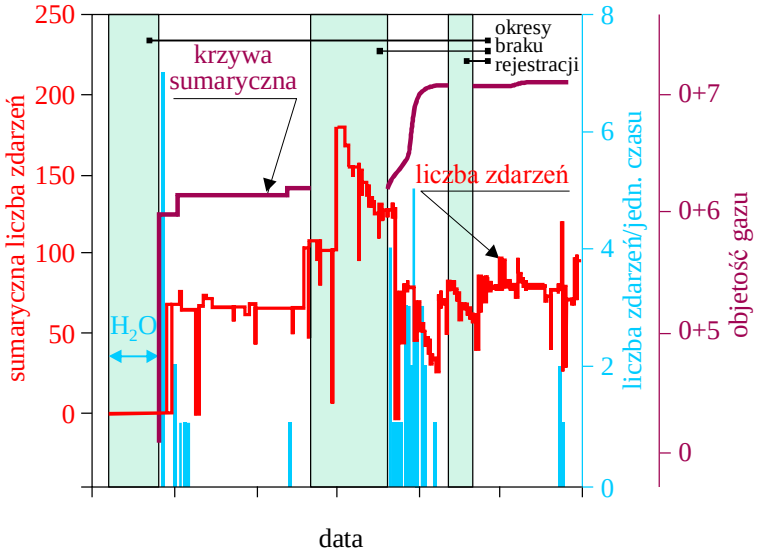


Fig. 1.1.18_257 Przykład rejestracji sejsmoakustycznej w czasie zatłaczania CO (Jverden, M Kendall 2007) Kolorem niebieskim zaznaczono okresy wtłaczania w których nie prowadzono rejestracji

W sprawozdaniu GIG w ramach zadania **1.1.18**, szczegółowo przedstawiony zostanie projekt monitorowania płynów złożowych w obrębie formacji zbiornikowych i uszczelniających w trakcie procesu wtłaczania CO_2 oraz po zamknięciu składowiska, z wykorzystaniem metody sejsmologicznej i pasywnej tomografii. Ponadto omówiona zostanie metoda sejsmometryczna stosowana do monitorowania poziomu drgań na powierzchni wywołanych wstrząsami górotworu indukowanymi przez iniekcję CO_2 oraz eksploatację węgla w pobliskich kopalniach. Pozostałe metody zostaną jedynie zasygnalizowane i zgodnie z zaleceniem koordynatora projektu zostały szczegółowo opisane przez inne instytucje.

ZAŁOŻENIA METODYCZNE MONITOROWANIA METODĄ SEJSMOLOGICZNĄ

Zainstalowanie stałej sieci sejsmologicznej w obszarze składowania CO_2 może dać bardzo duże korzyści monitorowania tego procesu. Można założyć dwa scenariusze podczas zatłaczania CO_2. Pierwszy odnosi się do przypadku gdy będzie występowała aktywność sejsmiczna (głównie zbiorniki o małej przepuszczalności i wtłaczaniu CO_2 pod dużym ciśnieniem) i drugi przypadek gdy aktywność sejsmiczna będzie bardzo niska słaba, trudna do zarejestrowania (jak przykładowo na złożu Sleipner gdzie mamy do czynienia z dużą porowatością i stosunkowo małymi ciśnieniami).

Przypadek I – występuje aktywność sejsmiczna

W pierwszym przypadku monitorowanie przy pomocy stałej sieci sejsmologicznej może być niezmiernie korzystne. Odpowiednio rozmieszczona sieć sejsmologiczna pozwoli na lokalizację zjawisk mikrosejsmicznych związanych z tworzeniem się spękań. Oznacza to możliwość śledzenia rozprzestrzeniania się chmury CO_2 oraz monitorowania wycieków w obszarze warstwy izolacyjnej. Zastosowanie analizy parametrów ognisk spękań, takich jak spadek naprężeń w źródle, pozwoliłoby na ocenę jakości procesu zatłaczania (wzrost spadków naprężeń informowałby o trudniejszej fazie zatłaczania medium do zbiornika). Drugą bardzo istotną korzyścią monitoringu sejsmologicznego byłaby możliwość zastosowania krzywoliniowej tomografii pasywnej (tomografia oparta na naturalnych źródłach emisji fal sejsmicznych) do badania pola prędkości. Warunkiem przestrzennej interpretacji pola prędkości jest dysponowanie przestrzennym rozmieszczeniem czujników drgań. Obliczenia takie można wykonywać z dużą częstotliwością w oparciu o bazę wstrząsów zarejestrowaną automatycznie przez stacjonarny rejestrator drgań. Wydaje się, że ze względu na uwarunkowania geologiczne w naszym kraju, można oczekiwać aktywności sejsmicznej w potencjalnych miejscach składowania. Tomografia pasywna pozwoliłaby na bardzo znaczne ograniczenie ilości wykonywania drogich pomiarów sejsmicznych. Ponadto gdy zbiornik zlokalizowany jest w pobliżu zagłębi górniczych w których występują wstrząsy, sieć sejsmologiczna jako jedyna metoda pozwala na ich monitorowanie i ocenę ewentualnego zagrożenia. Sytuacja taka może mieć miejsce w potencjalnych miejscach wyznaczonych w obszarze Górnośląskiego Zagłębia Górniczego. W kolejnych rozdziałach zostanie przedstawiona prognoza zagrożenia sejsmicznego wynikająca z pobliskiej eksploatacji węgla w kopalniach Zofiówka, Pniówek i Jas-Mos.

Przypadek II – brak aktywności sejsmicznej

W przypadku niskiej aktywności sejsmicznej podczas zatłaczania lub jej braku przydatność metody sejsmologicznej będzie znacznie mniejsza. Sieć sejsmologiczna może być jednak wykorzystana i w tym przypadku do badania pola prędkości fal metodą tomografii. Warunkiem będzie jednak sztuczne wzbudzanie fal sejsmicznych przy pomocy ładunków MW lub dużym wibratorem, podobnie jak się to robi przy pomiarach sejsmicznych. Korzyścią jest tutaj nie angażowanie tak często grupy pomiarowej, przez co można obniżyć koszty. Zaletą proponowanego rozwiązania jest obliczanie pola prędkości metodą tomografii między czujnikami w otworach i na powierzchni, co nie jest możliwe przy zastosowaniu powierzchniowych pomiarów sejsmicznych. W efekcie można w ten sposób prowadzić monitoring warstw nadkładu.

Monitorowanie sejsmologiczne może się odbywać w dwóch otworach monitorujących, wywierconych w odległości 200m od otworu iniekcyjnego BS-1 oraz S-1 (**Fig. 1.1.18_244a**i **Fig. 1.1.18_244b**).

Sieć sejsmologiczna

Budowa sieci sejsmologicznej jest jednorazowym wydatkiem na cały czas trwania procesu zatłaczania oraz na monitoring w czasie po likwidacji zbiornika. Sieć sejsmologiczna składa się z czujników drgań, transmisji danych i rejestratora wstrząsów (**Fig. 1.1.18_258**). Drgania sejsmiczne zarejestrowane po wystąpieniu wstrząsu są automatycznie wyzwalane i rejestrowane w pamięci rejestratora. Następnie poprzez transmisję (np. łączność komórkową, linie kablową) są automatycznie przesyłane do stacji bazowej, gdzie są gromadzone w formie plików cyfrowych. Zastosowanie odbiorników GPS na każdym stanowisku pomiarowym umożliwia czasowanie odebranych sygnałów przy wspólnej podstawie czasu, co pozwala w dalszej kolejności na interpretację zjawisk sejsmicznych (lokalizacja, magnituda, spadek naprężeń, 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.

W przypadku specjalistycznych sond do pomiaru drgań i rejestracji zjawisk sejsmicznych podczas zatłaczania 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, Canada, a przede wszystkim produkty firmy SERCEL z przykładowymi projektami tej firmy:

- Hydrofrac monitoring & seismology experiment in KTB deep experimental well (9000 m, 250°c) in Germany for GFZ
- Al Noor – Phase II: one well installation of tubing conveyed geophone for hydraulic fracturing monitoring.
- MAERSK - Offshore Denmark: 16 permanent geophone systems installed with SCHLUMBERGER in a 10,000 ft horizontal drain for water injection and fracturing monitoring in the North Sea
- PEMEX – MEXICO: Hydraulic fracturing monitoring jobs from treatment wells.

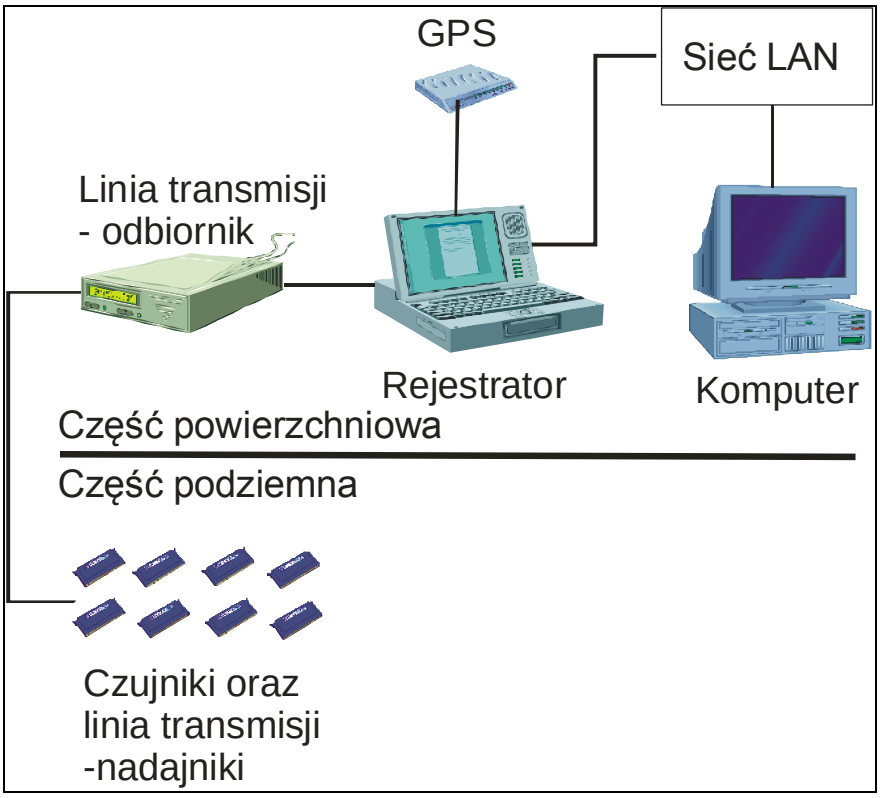


Fig. 1.1.18_258 Schemat aparatury sejsmologicznej SOS

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 na stałe umieszczone pod powierzchnią (sondy pomiarowe w płytkich otworach 20-30m, co zmniejszy szumy w porównaniu do lokalizacji czujników na powierzchni) oraz w otworach głębokich, najlepiej na głębokości zbliżonej do poziomu zatłaczania oraz na głębokościach pośrednich między powierzchnią i poziomem zatłaczania. Do tego celu można wykorzystać otwory monitorujące dla procesu zatłaczania. Warunkiem takiego rozwiązania jest jednak podjęcie decyzji o budowie przestrzennej sieci sejsmologicznej na etapie wiercenia otworów, gdyż jest to odpowiedni moment na ich zamontowanie.

Ryzyko sejsmiczne od naturalnych trzęsień ziemi i zjawisk parasejsmicznych

Sieć sejsmologiczna może być również wykorzystana do monitorowania sejsmiczności nie związanej z procesem zatłaczania CO_2. W strefach naturalnej aktywności sejsmicznej są to trzęsienia 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 (**Fig. 1.1.18_259)** (Intensywność drgań w skali EMS do 7). Wstrząsy indukowane działalnością górniczą (GZW, LGOM, Bełchatów) mogą również sporadycznie osiągać intensywność rzędu 5-6, szczególnie w rejonie epicentralnym (**Fig. 1.1.18_260**). Jeżeli ogniska takich

wstrząsów lokalizowane są na płaszczyznach uskokowych w rejonie planowanego zbiornika CO_2, to w ich efekcie następuje pękanie skał w źródle wstrząsu, co może stanowić potencjalną drogę wycieku CO_2. Monitorowanie sejsmiczności pozwala na ocenę ryzyka sejsmicznego w obszarze składowania CO_2 i zastosowanie wyprzedzająco profilaktyki.

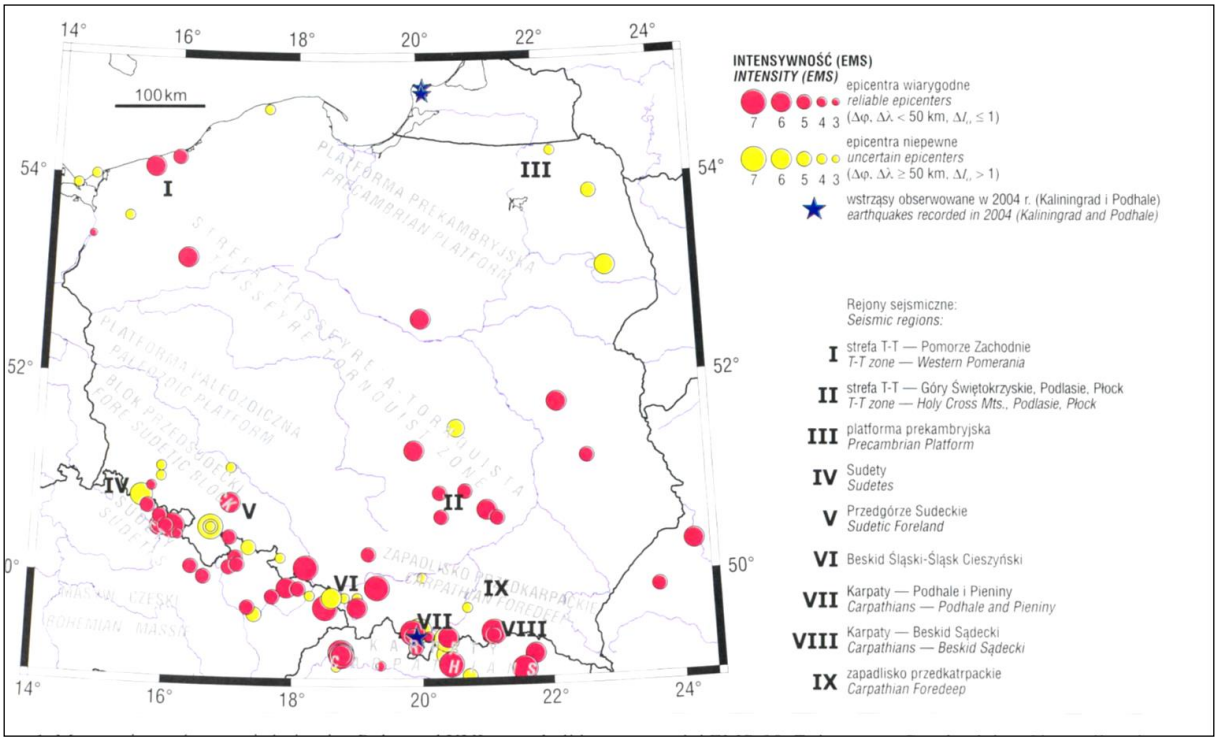


Fig. 1.1.18_259 Mapa epicentrów trzęsień ziemi w Polsce od XVI wieku , w skali intensywności EMS-98 (z artykułu Guterch, 2009)

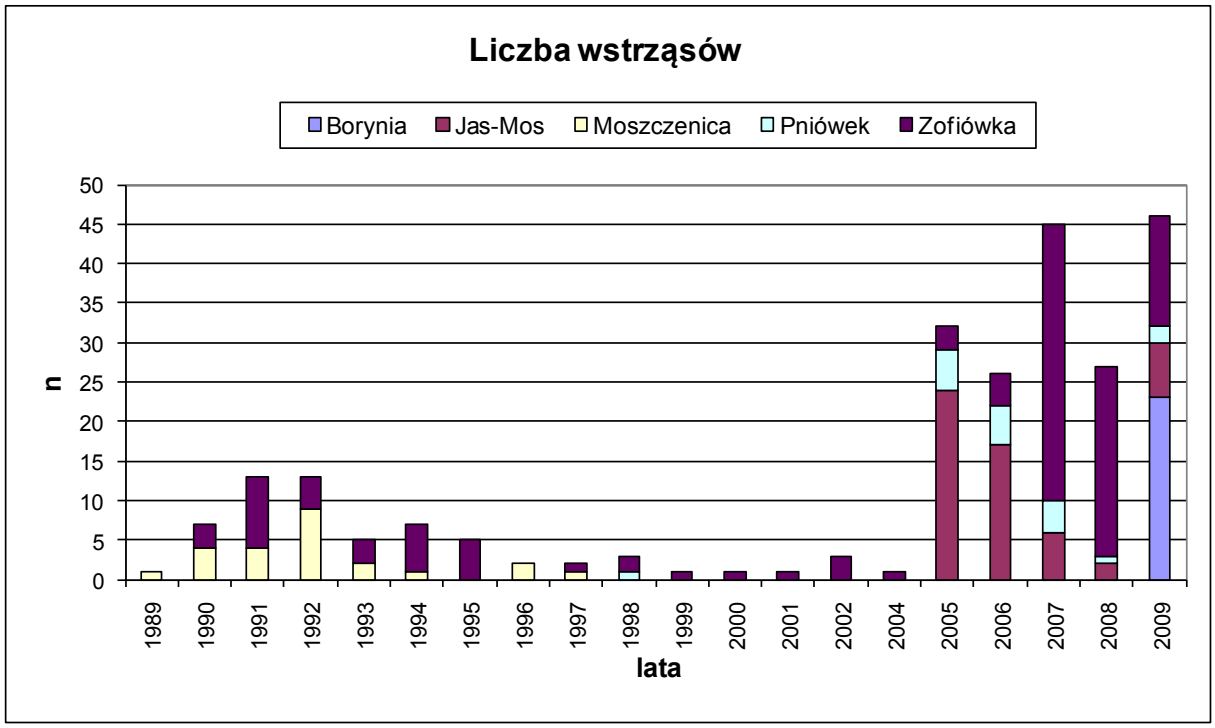


Fig. 1.1.18_260a Aktywność sejsmiczna w kopalniach sąsiadujących z wybranymi obszarami do sekwestracji CO2 w pokładach węgla w GZW

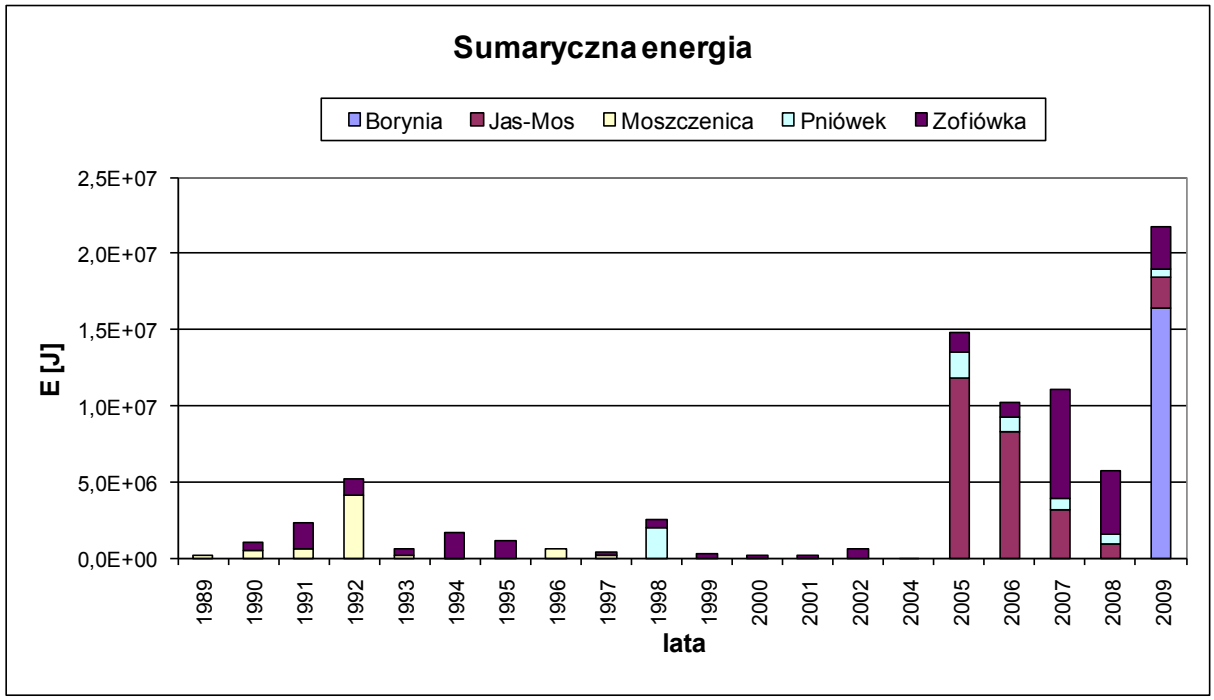


Fig. 1.1.18_260b Sumaryczna energia sejsmiczna w kopalniach sąsiadujących z wybranymi obszarami do sekwestracji CO2 w pokładach węgla w GZW

Prognoza zagrożenia sejsmicznego od sąsiednich kopalń - statystyczna ocena prawdopodobieństwa wystąpienia wstrząsów regionalnych w okresie 25 lat

Ocena maksymalnej energii sejsmicznej wstrząsów regionalnych, przy określonym prawdopodobieństwie ich zaistnienia, wyznaczana jest w oparciu o rozkłady statystyczne utworzone w oparciu o zgromadzone banki danych o zjawiskach sejsmicznych, zaistniałych w podobnych warunkach geologiczno-górniczych. Zjawiska sejsmiczne o charakterze regionalnym związane są najczęściej ze strefami zaburzeń tektonicznych (najczęściej z uskokami), dla których prowadzona eksploatacja górnicza (czasami dość odległa) spełnia rolę czynnika wyzwalającego wstrząs. Wynikiem zastosowania powyższych procedur prognostycznych w aspekcie określenia charakterystyk energetycznych ognisk spodziewanych wstrząsów, są rozkłady maksymalnych energii sejsmicznych E_s w polu projektowanej eksploatacji wraz z ustaleniem miejsc potencjalnej rejonizacji ognisk wstrząsów (x_0, y_o i szacunkowo z_0).

Do oceny powtarzalności silnych regionalnych wstrząsów górotworu w rejonie kopalń Jas-Mos, Moszczenica, Zofiówka, Borynia i Pniówek, uwzględniono bazę danych o wstrząsach z okresu czasowego 1990-2010.

Obliczony hazard sejsmiczny wskazuje , że możemy liczyc się z wystąpieniem wstrzasu o energii maksymalnej $1{,}4 \cdot 10^8$ J z prawdopodobieństwem 95% w okresie 25 lat.

Monitorowanie aktywności sejsmicznej w trakcie procesu składowania CO_2

W zbiornikach CO_2 o niskiej porowatości oraz przy dużych ciśnieniach wtłaczania, można oczekiwać występowania aktywności sejsmicznej. W takiej sytuacji prowadzenie stałego monitoringu sejsmologicznego może dać bardzo duże korzyści. Zarejestrowane zjawiska sejsmiczne są niecenionym i praktycznie darmowym źródłem fal sejsmicznych. Sejsmika prospekcyjna wymaga wykonania drogich strzelań i pomiarów ‘in situ’ aby uzyskać dane do interpretacji. Tutaj wstrząsy indukują się przy okazji samego procesu składowania CO_2. Zastosowanie algorytmów do przestrzennej lokalizacji ognisk wstrząsów pozwala na śledzenie rozprzestrzeniania się i dróg migracji CO_2. Zarejestrowane procesy pękania skały na skutek wtłaczania CO_2 pod dużym ciśnieniem, pozwalają również na oszacowanie jakości skał zbiornikowych. W tym celu można wykorzystać analizy parametrów źródła drgań, takie jak spadek naprężeń, naprężenia pozorne, aktywność sejsmiczna, moment sejsmiczny, przemieszczenie w ognisku, promień ogniska. Przykładowo duże spadki naprężeń będą świadczyły, że aktualnie wtłaczamy w gorszym fragmencie zbiornika. W połączeniu z tomografią pasywną również wykorzystującą do obliczeń naturalne „darmowe” zjawiska sejsmiczne, metoda sejsmologiczna daje dużo szersze i bardziej wiarygodne badania masywu skalnego i samego procesu zatłaczania do niego CO_2.

Możliwości zastosowania tomografii pasywnej do diagnostyki zmian w strukturach geologicznych w czasie procesu składowania CO_2

Wykorzystując naturalne zjawiska dynamiczne wywoływane tworzeniem się nowych szczelin podczas procesu zatłaczania CO_2 zarejestrowane przez przestrzenną sieć sejsmologiczną, można wykonywać obliczenia pola prędkości fal sejsmicznych metodą tzw. tomografii pasywnej. Metoda ta polega na ocenie i analizie pola prędkości fali podłużnej w przesuwającym się oknie czasowym. Technika taka pozwala na śledzenie zmian pola prędkości i korelowanie ich ze zmianami zachodzącymi w rejonie zatłaczania CO2 oraz w nadkładzie. Ponieważ nie dysponujemy praktycznymi zastosowaniami tej metody do monitorowania procesu zatłaczania CO2 w naszym kraju, poniżej przedstawiono przykład takiego monitoringu do badania spękań w trakcie eksploatacji złoża miedzi.

Przykład zastosowania tomografii pasywnej do diagnostyki struktury górotworu mogą być wyniki uzyskane dla kopalni miedzi Palabora w Południowej Afryce (Glazer i Lurka 2007). Kopalnia Palabora eksploatowała złoże metodą odkrywkową. Po osiągnięciu głębokości 800m od powierzchni terenu zakończono eksploatację odkrywkową i pod spodem odkrywki na głębokości 1200m rozpoczęto eksploatację podziemną tzw. system cave-mining. Eksploatacja podziemna powoduje spękania masywu skalnego w kierunku pionowym nad poziomem eksploatacyjnym (**Fig. 1.1.18_261**). Bezpieczna eksploatacja złoża wymaga by destrukcja górotworu nie doszła do poziomu dna starej odkrywki, co groziłoby katastrofą (przerwanie pasa izolacji i wdarcie się wody do kopalni podziemnej). Jednym z zaproponowanych sposobów śledzenia rozwoju strefy spękań skał była tomografia pasywna. Wykorzystując licznie rejestrowane zjawiska dynamiczne na geofonach umieszczonych na stałe w otworach na różnych głębokościach oraz na geofonach powierzchniowych, można było uzyskać bardzo dobre pokrycie promieniami sejsmicznymi obszaru badań między poziomem eksploatacji a dnem odkrywki (**Fig. 1.1.18_262**).

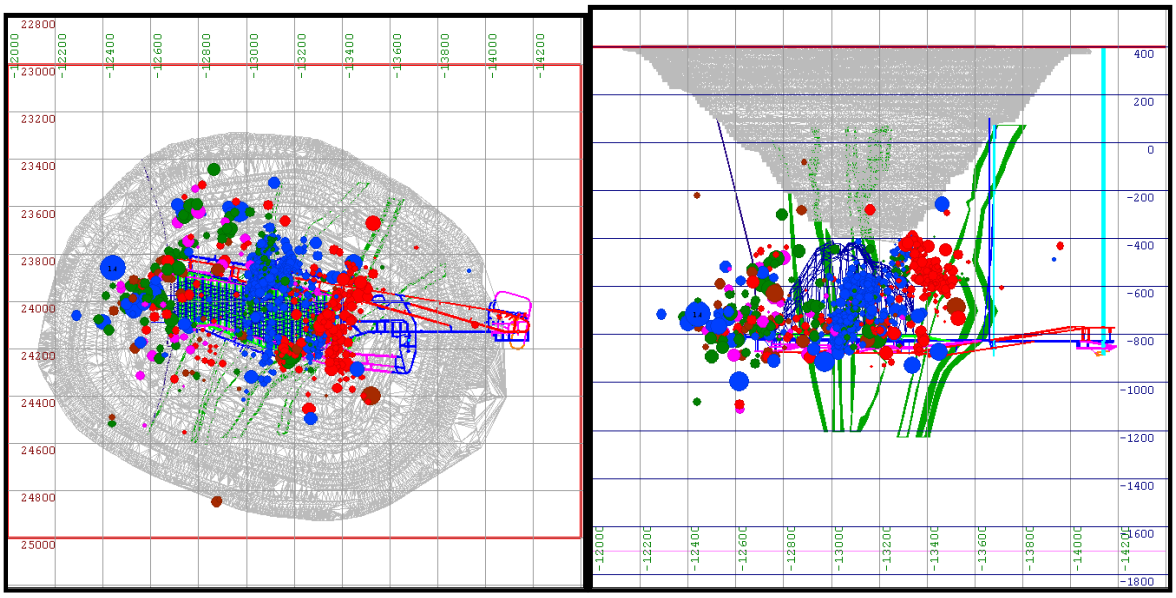


Fig. 1.1.18_261 Sejsmiczność w rzucie poziomym i pionowym w maju 2004 (za Glazer i Lurka 2007)

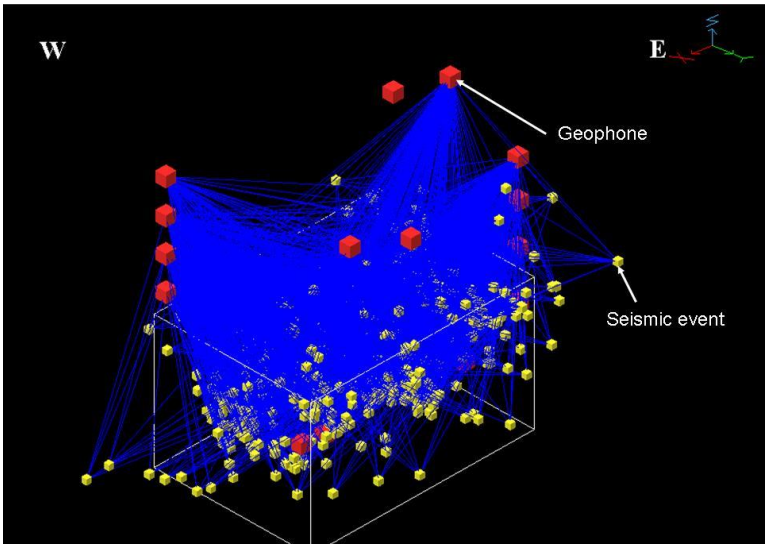


Fig. 1.1.18_262 Pokrycie promieniami sejsmicznymi obszaru badań dla wstrząsów zaistniałych w maju 2004 (za Glazer i Lurka 2007)

Obraz pola prędkości 3D przedstawiony na **Fig. 1.1.18_263** Odnosi się do stanu na koniec maja 2004r. Pokazano na nim strefę najwyższych prędkości zakładając, że najwyższe naprężenia i małe spękania lub ich brak korelują się z tą strefą.

Rekonstrukcja pola prędkości w maju 2004 pokazała, że we wschodniej części obszaru występuje lite skały lub mocno ściśnięte duże bloki skalne. W części zachodniej obszaru nastąpiło spękanie skał. W efekcie nastąpiło w tej części kopalni dojście obszaru spękań do dna odkrywki.

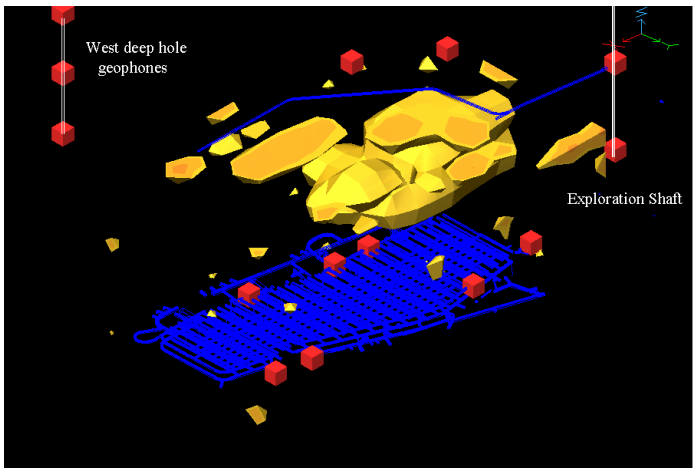


Fig. 1.1.18_263 Obszar o najwyższych prędkościach obliczony w maju 2004 (za Glazer i Lurka 2007)

Przedstawiony przykład obliczeniowy pozwala wiązać duże nadzieje z zastosowaniem tomografii pasywnej do śledzenia zmian strukturalnych w masywie skalnym w czasie procesu zatłaczania CO_2. Może pozwolić również na śledzenie migracji i geometrii zatłoczonego CO_2, o ile obrazy tomograficzne liczone będą w kolejnych oknach czasowych ukazując zmiany w czasie (tomografia pasywna 4D). Metoda wymaga oczywiście zainstalowania stałej sieci sejsmologicznej w rejonie zbiornika i zastosowania odpowiednich programów do tomografii pasywnej w wersji z krzywoliniowym promieniem. Opracowywanie kolejnych obrazów tomograficznych mogłoby się odbywać z dużą częstotliwością, nie wymagałoby dużych nakładów finansowych i byłoby zdecydowanie tańsze od sejsmiki 3D i 4D. Niewątpliwie zastosowanie tomografii pasywnej byłoby dużym przełomem w monitorowaniu procesu zatłaczania CO_2, zarówno pod względem jakości wyników jak i obniżenia kosztów. Warunkiem zastosowania tej metody jest jednak występowanie zjawisk sejsmicznych w trakcie zatłaczania. Eksploatacja węglowodorów jak również hydroszczelinowanie skał wskazują, że należy spodziewać się występowania aktywności sejsmicznej dla tych procesów (Baria i inni 2006). Również zatłaczanie CO_2 powinno wywoływać powstawanie efektów dynamicznych związanych z spękaniem masywu skalnego podczas tego procesu.

Niezależnie od naturalnych zjawisk dynamicznych stanowiących źródła fal sejsmicznych do tomografii pasywnej, można wspomóc się wytwarzaniem jej przy pomocy źródeł sztucznych (wibratory lub strzelania MW – podobnie jak to się robi w sejsmice prospekcyjnej). Przewagą systemu sejsmologicznego zamontowanego na stałe jest w takim przypadku przestrzenne rozmieszczenie czujników drgań (lepsza dokładność i wiarygodność odwzorowania pola prędkości) oraz niższe koszty (w sejsmice każde obliczenia nowych obrazów pola prędkości wymagają przyjazdu ekipy pomiarowej z ciężkim sprzętem). Tomografia pasywna wydaje się w tej chwili jedną z najbardziej obiecujących metod śledzenia spękań w masywie skalnym oraz śledzenia rozwoju chmury zatłaczanego CO_2 oraz wykrywania dróg migracji CO_2.

Tomografia pasywna krzywoliniowa

Dla celów projektu, opracowano w GIG założenia metody sejsmologii pasywnej z krzywoliniowym promieniem sejsmicznym. Tomografia z promieniem krzywoliniowym znacznie poprawi dokładność lokalizacji stref epicentrów wstrząsów oraz rozkładu prędkości propagacji fal w przestrzeni.

W ramach realizacji zadania opracowano oprogramowanie komputerowe do algorytmu obliczeniowego rozwiązania tomografii pasywnej z krzywoliniowym śledzeniem promieni sejsmicznych i regularyzacją z uwzględnieniem minimalizacji funkcjonału według algorytmu optymalizacji nieliniowej (Levenberga-Marquardta) oraz śledzenie promieni sejsmicznych (reytracing) według metody Mosera, Noleta i Sniedera.

Przykład modelowania trajektorii promieni sejsmicznych

Model prędkości o stałym gradiencie

Model o stałym gradiencie prędkości opisuje następująca formuła

$$V(x,y) = 3000 + 0,3 \cdot (y + 2200) \text{ dla } y \geq 2200 \qquad (1)$$

Model ten, przedstawiony w postaci graficznej na figurach **1.1.18_264** i **1.1.18_265.** Krzywizna uzyskiwanych promieni jest mała, a sam ośrodek dobrze odpowiada prędkościom obserwowanym w

podziemnych kopalniach węgla w Polsce. Na figurze **1.1.18_266** przedstawiono wyznaczone numerycznie trajektorie dla źródła znajdującego się w punkcie [−2000; 0], skierowane do wszystkich analizowanych odbiorników drgań. Liniami białymi oznaczono trajektorie promieni sejsmicznych wyznaczone dla siatki rzadkiej (12 × 12), natomiast linie czerwone pokazują promienie sejsmiczne obliczone dla siatki gęstej (700 × 700). Na **Fig. 1.1.18_266**wyraźnie widać, że zagęszczenie siatki prędkości nie wpłynęło w istotny sposób na przebieg promieni sejsmicznych, co jest spowodowane głównie tym, że badany model ośrodka nie zawiera gwałtownych zmian pola prędkości. Na figurach **1.1.18_267** i **1.1.18_268** pokazano, obliczony numerycznie przebieg wszystkich krzywoliniowych promieni sejsmicznych, a więc łączących wszystkie źródła drgań z wszystkimi odbiornikami, odpowiednio dla siatki rzadkiej (12 × 12) i gęstej (700 × 700) modelu prędkości. Porównując przebieg tych promieni widać, że różnice są niewielkie, co oznacza, że wpływ parametryzacji modelu prędkości na inwersję tomograficzną nie będzie zbyt istotny.

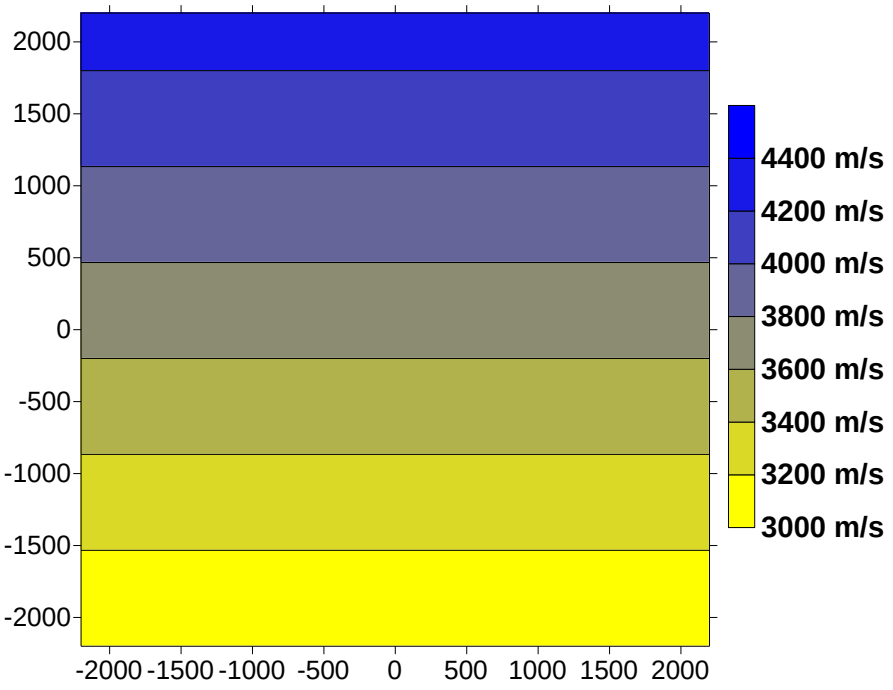


Fig. 1.1.18_264 Konturowa mapa modelu gradientowego ośrodka prędkości

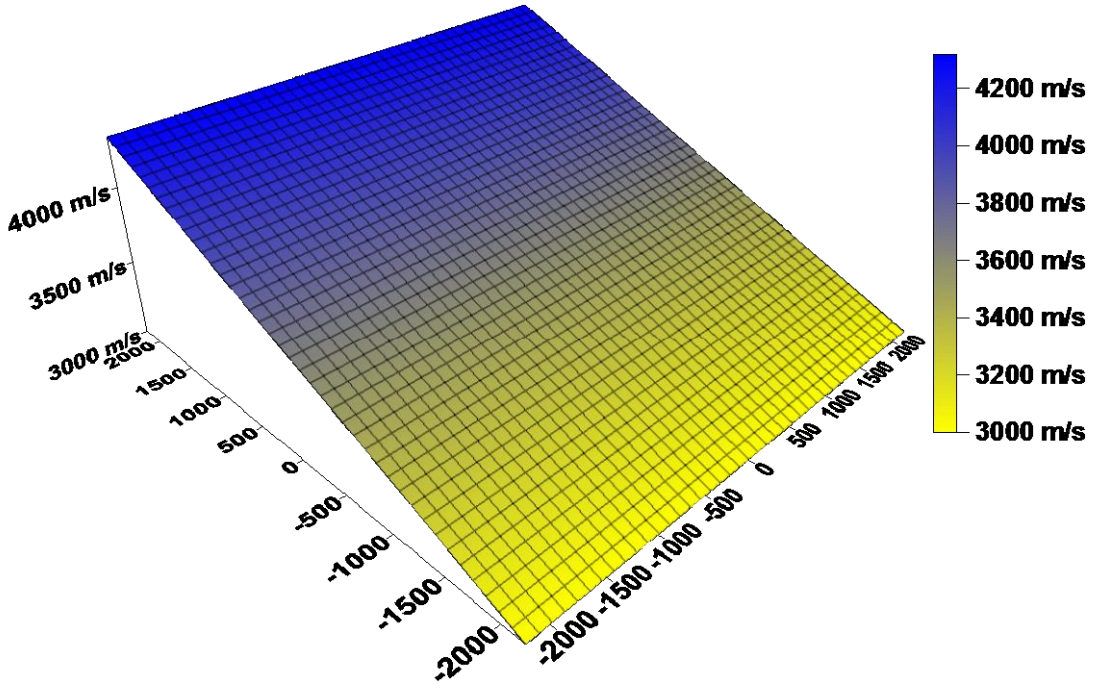


Fig. 1.1.18_265 Trójwymiarowa mapa modelu gradientowego ośrodka prędkości

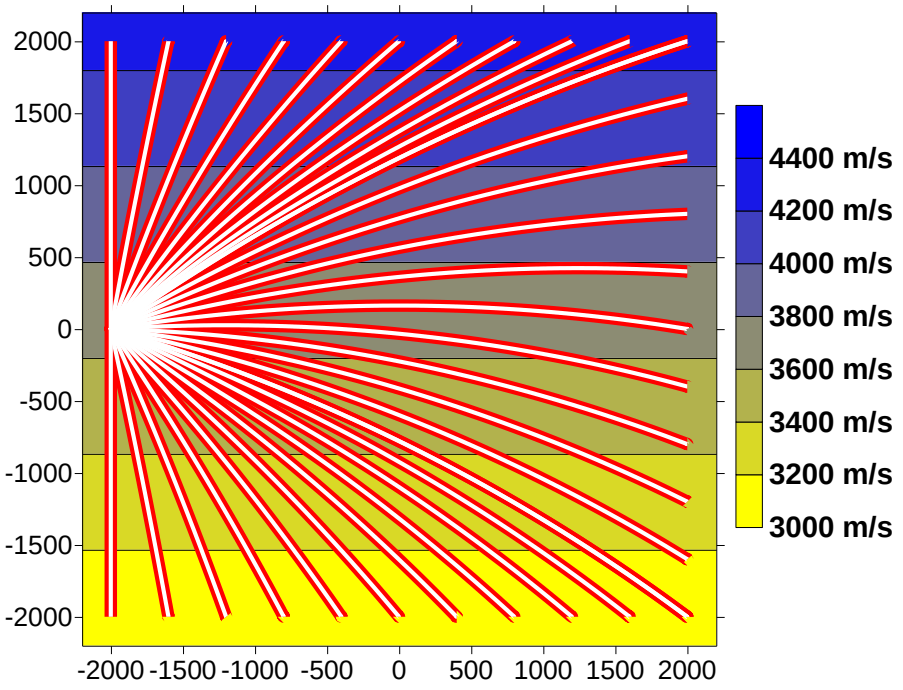


Fig. 1.1.18_266 Modelowanie numeryczne promieni sejsmicznych w ośrodku z **Fig. 1.1.18_264** dla gęstej (700 × 700) i rzadkiej (12 × 12) siatki modelu prędkości; czerwone linie – promienie dla siatki gęstej, białe linie – promienie dla siatki rzadkiej

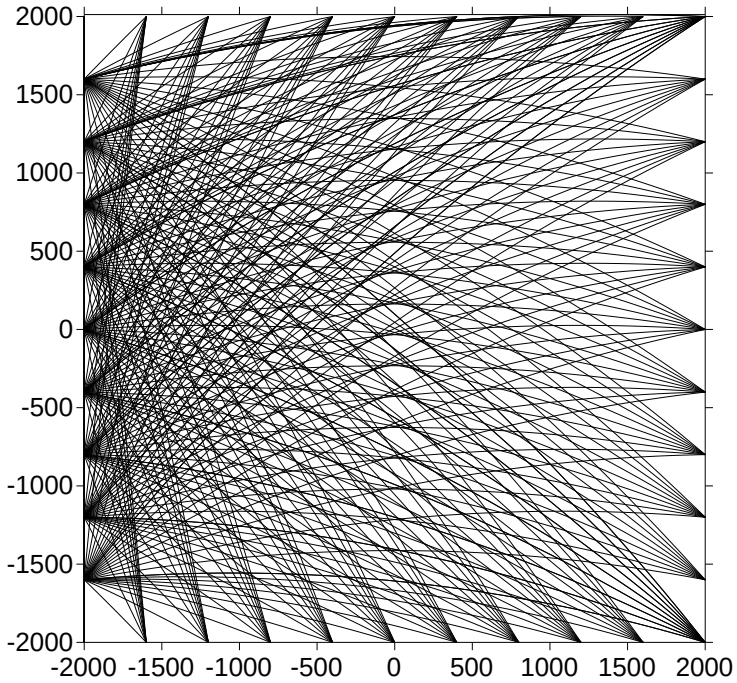


Fig. 1.1.18_267 Modelowanie numeryczne pełnego pokrycia promieniami sejsmicznymi w ośrodku z **Fig. 1.1.18_264** dla rzadkiej (12 × 12) siatki modelu prędkości

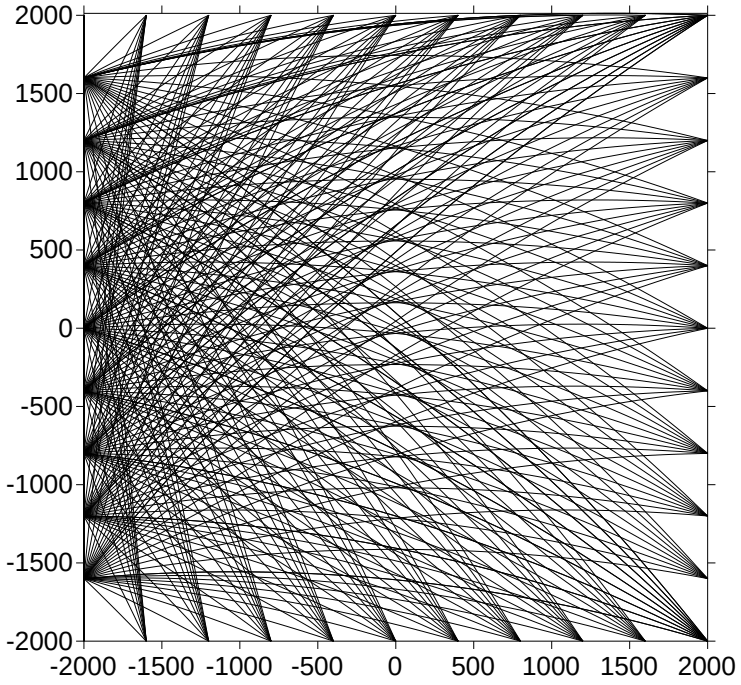


Fig. 1.1.18_268 Modelowanie numeryczne pełnego pokrycia promieniami sejsmicznymi w ośrodku z **Fig. 1.1.18_264** dla gęstej (700 × 700) siatki modelu prędkości

Przykład modelowania inwersji tomograficznego pola prędkości

W niniejszym rozdziale przedstawiono przykładowe wyniki uzyskane z zastosowaniem tomograficznej inwersji krzywoliniowej i regularyzacji, odniesione do różnych modeli prędkościowych ośrodka. Jako dane wejściowe do algorytmu inwersji wykorzystano teoretyczne czasy przejścia fali sejsmicznej wyznaczone na siatce o rozmiarze 700 × 700 zarówno w kierunku poziomym, jak i pionowym, z zastosowaniem interpolacji liniowej. Czasy te zostały obliczone na podstawie algorytmu krzywoliniowego śledzenia promieni sejsmicznych, który daje wynik w postaci trajektorii krzywoliniowych promieni sejsmicznych.

Inwersja modelu prędkości o stałym gradiencie

Inwersję tomograficzną wykonano dla modelu prędkości przedstawionego na **Fig. 1.1.18_264.** Wyniki inwersji tomograficznej dla funkcjonału z nowo wprowadzoną regularyzacją przedstawiają figury **1.1.18_269**-**1.1.18_271**. Wartości startowe prędkości w algorytmie tomograficznym były stałe i wynosiły odpowiednio 2000, 3500 i 5000 m/s. Z porównania figur figury **1.1.18_269**-**1.1.18_271** wynika, że rezultaty inwersji są bardzo podobne, co świadczy, że nowa regularyzacja pozwoliła uniezależnić się w dużym przedziale zmienności od wartości startowych prędkości. Ponadto widoczne jest, że inwersja w nowym wariancie regularyzacji pozwala wyznaczyć charakter zmienności pola prędkości w badanym modelu oraz dobrze odwzorowuje same wartości pola prędkości.

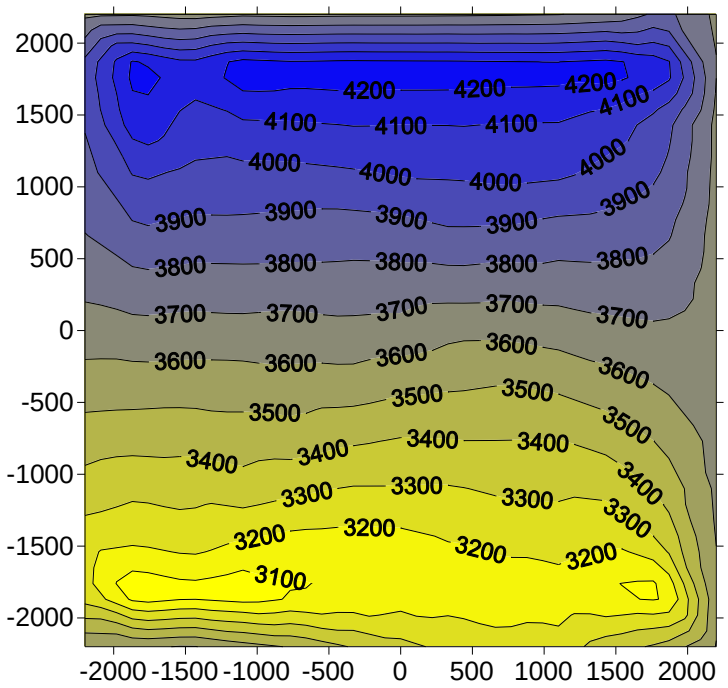


Fig. 1.1.18_269 Wyniki krzywoliniowej inwersji tomograficznej modelu prędkości z **Fig. 1.1.18_264** z wykorzystaniem funkcjonału z regularyzacją bez zaburzeń współrzędnych źródeł sejsmicznych i startową prędkością 2000 m/s

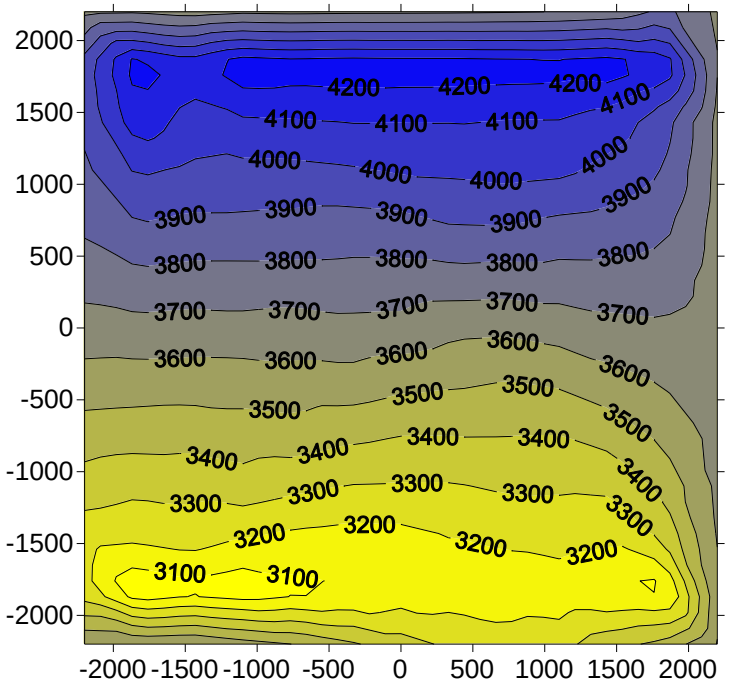


Fig. 1.1.18_270 Wyniki krzywoliniowej inwersji tomograficznej modelu prędkości z **Fig. 1.1.18_264 z** wykorzystaniem funkcjonału z regularyzacją bez zaburzeń współrzędnych źródeł sejsmicznych i startową prędkością 3500 m/s

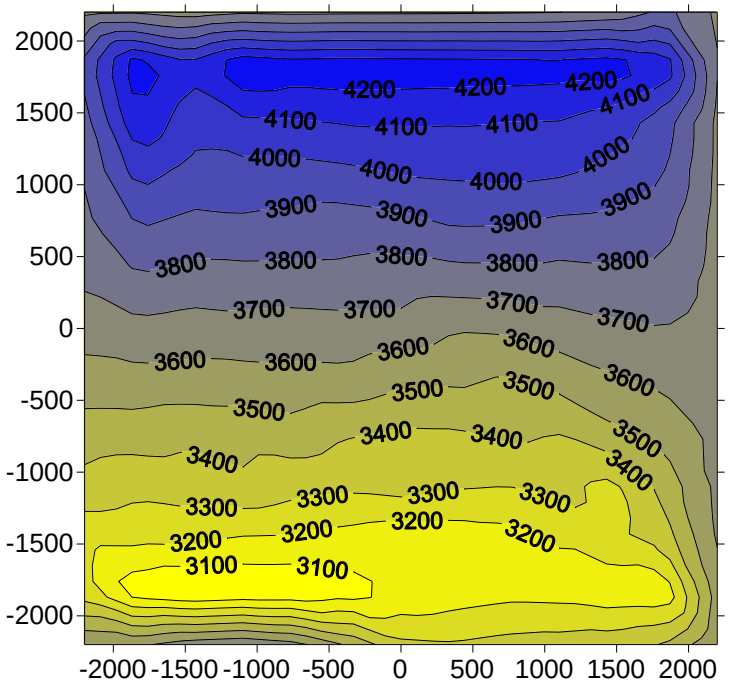


Fig. 1.1.18_271 Wyniki krzywoliniowej inwersji tomograficznej modelu prędkości z **Fig. 1.1.18_264** z wykorzystaniem funkcjonału z regularyzacją bez zaburzeń współrzędnych źródeł sejsmicznych i startową prędkością 5000 m/s

Program do obliczania pola prędkości metodą tomografii pasywnej z krzywoliniowym śledzeniem promieni sejsmicznych może wykorzystywać jako parametry wejściowe zbiór cyfrowo zarejestrowanych wstrząsów górniczych przy użyciu aparatury SOS zaprojektowanej w GIG.

Opis sieci sejsmologicznej dla struktury Brzeźce i Studzionka

Jak już wspomniano wcześniej, w pokłady węgla w zbiorniku Brzeźce i Studzionka planuje się wtłaczać jednym otworem do każdego zbiornika.

Proponuje się zainstalowanie 12 trójskładowych czujników drgań w dwóch otworach monitorujących (**Fig. 1.1.18_244a i 1.1.18_244b**). Trzy czujniki należałoby zainstalować co 10-15m w ostatnich 40 m otworu (kolektor), a kolejne 6 czujników w odstępach 50m. Sygnały z czujników (zjawiska sejsmiczne) rejestrowane winny być automatycznie na rejestratorze na powierzchni. Ponadto proponuje się instalację systemu przypowierzchniowych sond geofonowych w płytkich otworach (30-50m). Połączone wspólnym czasem (GPS) geofony w otworze monitorującym oraz geofony przypowierzchniowe, pozwolą na pseudo-ciągłą obserwację mikrosejsmologiczną podczas zatłaczania CO2, wykonywania 4D obrazów tomograficznych (w przypadku znaczącej aktywności sejsmicznej – metodą tomografii pasywne, a w przypadku słabej aktywności sejsmicznej - metodą tomografii aktywnej (wykonanie strzelań ładunkami MW lub metodą wibracji). Z pomiarami mikrosejsmologicznymi oraz pasywną tomografią w zaproponowanej geometrii sieci geofonowej, można równocześnie wykonywać inne pomiary i analizy znane z aktywnej sejsmiki prospekcyjnej, takie jak profilowanie VSP, time laps 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, Kanada, gdzie wtłaczany jest CO2.

Aparatura do pomiarów sejsmometrycznych

Aparatura do pomiarów sejsmometrycznych ma za zadanie monitorowanie wstrząsów górniczych oraz ewentualnych silnych wstrząsów indukowanych wtłaczaniem CO2 do pokładów węgla. Pomiary monitoringowe sejsmometryczne są niezbędne do oceny wpływu potencjalnych wstrząsów na środowisko powierzchniowe.

Siec sejsmometryczna powinna się składać z 3-5 stanowisk powierzchniowych rozlokowanych bezpośrednio przy otworze wtłaczającym, 2 otworach monitoringowych oraz ewentualnie przy pobliskich obiektach strategicznych.

Przykladem takiej aparatury może być opracowana w GIG aparatura sejsmometryczna AMAX 99. Jest to aparatura mobilna, stosowana do pomiarów drgań parasejsmicznych i wstrząsów górotworu.

Podstawowe wymagane parametry aparatury sejsmometrycznej powierzchniowej:

- przejrzysta i wygodna prezentacja graficzna zarejestrowanych wstrząsów
- analiza widmowa wstrząsów (FFT)
- całkowanie zapisów przyspieszenia drgań na amplitudy prędkości z uwzględnieniem korekty linii bazowej (tzw. baseline correction)
- projektowanie przez użytkownika filtrów o wybranej dowolnej charakterystyce

- Obliczanie czasu trwania wstrząsu
- Eksport i import plików w formacie ASCII
- Podstawowe oprogramowanie aparatury sejsmometrycznej
- Obliczanie spektrów odpowiedzi
- Ciągła rejestracja drgań w plikach
- Detekcja zjawisk sejsmicznych
- Podstawowe parametry aparatury sejsmometrycznej
- zakres częstotliwości: od 1 do 500 Hz
- maksymalne amplitudy prędkości drgań do 200 mm/s
- maksymalne amplitudy przyspieszenia do 3000 mm/s^2
- automatyczne wyzwalanie zapisów wstrząsów
- zdalne sterowanie aparaturą przez GRSM lub internet.

Koszty

W dyrektywie Parlamentu Europejskiego w sprawie geologicznego składowania dwutlenku węgla (2009) wskazuje się na konieczność zapewnienia środków na monitorowanie na okres eksploatacji oraz przynajmniej 20-30 lat po likwidacji zbiornika. Znacząco niższe koszty obliczeń tomograficznych opartych na rejestracji przy pomocy stałej sieci sejsmologicznej założonej w obszarze zbiornika, w porównaniu do okresowych badań sejsmicznych wskazują, że warto zainwestować w zastosowanie tej techniki monitorowania procesu zatłaczania CO_2 w trakcie zatłaczania i w okresie po likwidacji składowiska.

Koszt montażu na stałe sejsmicznych mierników drgań (12 sond) w otworze o długości do 1500m, wraz z systemem do rejestracji, akwizycji i analizy danych, wyniesie około 0,7 do 1,0 mln Euro. Do tego należałoby doliczyć koszty sieci powierzchniowej w kwocie rzędu 200-300 tys. Euro oraz koszty roczne nadzoru technicznego i merytorycznego (analiza danych i opracowywanie wyników do sprawozdań.

Koszt aparatury sejsmometrycznej to około 0,5 mln zł oraz koszty nadzoru technicznego i obsługi w okresie czasu monitorowania.

PODSUMOWANIE

Poza standardowo stosowanymi aktualnie technikami monitorowania, w dokumentacji zaproponowano wykorzystanie metody sejsmologicznej do monitorowania geologicznego składowania CO_2 w pokładach węgla oraz monitorowania drgań na powierzchni metodą sejsmometryczną. Stacjonarna sieć sejsmologiczna jest w stanie rejestrować zjawiska sejsmiczne związane z pękaniem skał o niskiej porowatości w trakcie wtłaczania CO_2. Metoda ta pozwala na lokalizację pęknięć, a tym samym na śledzenie chmury wtłaczanego CO_2 oraz położenia i kierunku ewentualnych dróg przecieku.

Wykorzystując naturalne zjawiska dynamiczne wywoływane tworzeniem się nowych szczelin podczas procesu zatłaczania CO_2 zarejestrowane przez przestrzenną sieć sejsmologiczną, można również 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 zatłaczania CO2 oraz w nadkładzie. Zaproponowano zastosowanie algorytmu obliczeniowego opartego o krzywoliniowy promień sejsmiczny.

Sieć sejsmometryczna została zaproponowana do monitorowania silniejszych wstrząsów związanych z procesem zatłaczania CO_2, naturalnej aktywności sejsmicznej oraz wstrząsów górotworu indukowanych procesem eksploatacji węgla w pobliskich kopalniach. Pomiary sejsmometryczne są niezbędne do oceny wpływu potencjalnych drgań na środowisko powierzchniowe.

Program monitoringu grawimetrycznego stanu początkowego oraz w trakcie i po zakończeniu zatłaczania CO_2 dla obiektu w pokładach węgla (PBG)

(Zdzisław Żuk, Cezary Ostrowski, Tomasz Bąk)

Monitoring metodą grawimetryczną

Dotychczasowe badania grawimetryczne w omawianym rejonie pochodzą sprzed kilkudziesięciu lat. Zgromadzone wówczas materiały znajdują się w *banku danych grawimetrycznych*. Wprawdzie służyły one do opracowywania map grawimetrycznych i modelowań gęstościowych 2D, ale należy pamiętać, że dokładność wyników interpretacji jest pochodną jakości materiałów źródłowych, które często nie odpowiadają stawianym obecnie wymogom. Dotyczy to stosowanego wcześniej podkładu topograficznego, braku poprawki topograficznej, używania przyrządów o małej dokładności, prostych metod interpretacji. Z konieczności istniejące dane służyły dotychczas do różnego rodzaju analiz zaburzeń pola siły ciężkości. Na podstawie tych materiałów (Reczek, 1972; Kleszcz, 1979) opracowana została i do tej pory obowiązuje podstawowa mapa grawimetryczna anomalii siły ciężkości w redukcji Bouguera.

Na obszarze Warszowice-Pawłowice (Pawłowice-Mizerów) dostępne jest półszczegółowe grawimetryczne, charakteryzujące się zagęszczeniem ok. 4 pkt./km^2 i dokładnością typową dla tego typu prac, mieszczącą się w przedziale: ±0.041 mgal. W latach osiemdziesiątych ub. wieku w ramach tematu „Mapa grawimetryczna Polski - ark. Cieszyn" (J. Grzywacz, S. Szczypa) materiał źródłowy ujednolicono i zakodowano na komputerowe nośniki. W końcu lat dziewięćdziesiątych Przemysł Naftowy zainicjował dostosowanie pomiarów grawimetrycznych wykonanych w starym układzie (układ Borowa Góra) do układu geodezyjnego (układ 42), obowiązującego w sejsmice. Ze względu na wymogi interpretacji kompleksowej, dane grawimetryczne zostały przeliczone do układu 42.

CEL I ZAKRES BADAŃ

Zadaniem prac będzie uszczegółowienie obrazu grawimetrycznego wywołanego budową strukturalną rejonu Warszowice-Pawłowice. Prace grawimetryczne są częścią szerokiego przedsięwzięcia, którego cel sprowadza się do dokładniejszego rozpoznania kompleksów geologicznych w obrębie karbonu do głębokości około 2000m i większych, co w połączeniu z wynikami projektowanych prac geologicznych oraz badań innymi metodami geofizycznymi, przybliży rozwiązanie problemów związanych z przewidywaną geologiczną sekwestracją CO_2.

Zadania stawiane przed grawimetrią w zakresie prac terenowych obejmują:

- wykonanie zdjęcia o wysokiej dokładności pomiarów polowych na stanowiskach pomiarowych oddalonych od siebie o 150-250 m, przy użyciu przyrządów pomiarowych najnowszej generacji, lub

- stosowanie systemu punktów profilowych przy wzajemnych odległościach co 200 m wzdłuż linii planowanych pomiarów sejsmicznych, oraz systemu punktów rozproszonych pomiędzy profilami i w ich otoczeniu – punkty rozproszone przy odległościach względem siebie jak poprzednio 150-250 m.

W obu przypadkach zagęszczenie stanowisk pomiarowych wyniesie około 25 pkt/1 km^2.

W dalszych etapach prac prowadzonych w ramach monitoringu grawimetrycznego, należy zwiększyć ilość stanowisk pomiarowych do 200-400/1 km^2 w rejonach otworów służących do zatłaczania składowanego medium.

W ramach przetwarzania danych polowych i prac dokumentujących opracowane zostaną:

- katalog anomalii siły ciężkości w redukcji Bouguera,

- mapa anomalii Bouguera – podstawowa mapa grawimetryczna,

- ewentualnie inne mapy anomalii grawimetrycznych według zapotrzebowania.

Interpretacja materiałów grawimetrycznych dostarczy nowych informacji o budowie strukturalnej oraz tektonice kompleksów karbonu: górnośląskiej serii piaskowcowej, serii mułowcowej oraz głębiej wystepujacych kompleksów w obrębie karbonu i utworów starszych, w rejonie planowanego składowania CO_2.

W ramach monitoringu grawimetrycznego planowane są cykliczne pomiary w odstępach kilkuletnich. Umożliwią one rozpoznanie dynamiki zmian zachodzących w rozkładzie masy utworów wokół składowisk dwutlenku węgla i w ich nadkładzie. Przedmiotem analizy będą różnicowe anomalie siły ciężkości w redukcji Bouguera (potocznie nazywane anomaliami pomierzonymi). Projekt powinien zakładać przeprowadzanie pomiarów monitorujących przez cały okres eksploatacji składowiska CO_2 oraz po zakończeniu, a wówczas proponowane są prace w takim samym zakresie, przy zachowaniu metodyki, lokalizacji i ilości pomiarów jak w ramach monitoring stanu początkowego. Pierwszy monitoring w trakcie eksploatacji powinien zostać przeprowadzony po 2 latach od rozpoczęcia zatłaczania, a potem co 3-4 lata. Po zakończeniu zatłaczania należy wykonywać ten sam zakres pomiarów co 5 lat.

Projektowane zdjęcie grawimetryczne obejmie obszar o powierzchni około 50 km^2 (10 km x 5 km; **Rys. 3**, **Fig. 1.1.18_228**). Przy średnim zagęszczeniu punktów pomiarowych wynoszącym 25 pkt/1 km^2, łącznie planowane jest założenie i wykonanie pomiarów na 1250 punktach grawimetrycznych.

Polowe prace geodezyjne

- założenie 1250 grawimetrycznych punktów pomiarowych: rozproszonych przy odległościach między punktami 150-250 m, oraz profilowych wzdłuż linii sejsmicznych przy kroku pomiarowym 200 m,

- określenie wysokości *h* dla 1250 punktów pomiarowych (niwelacja) z powtórzeniem pomiarów na ok. 5 % stanowisk. Średni błąd kwadratowy niwelacji nie powinien przekroczyć ±0,05 m. Niwelację należy dowiązać 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 5º (dla określenia poprawki topograficznej),

- lokalizacja punktów pomiarowych wg mapy topograficznej w skali 1:25 000 lub 1:10 000.

Pomiary grawimetryczne

- uzupełnienie istniejącej sieci grawimetrycznej o 3-4 punkty podstawowe przez wykonanie pomiarów 6-9 przęseł łączących te punkty z punktami osnowy grawimetrycznej. Możliwe też jest założenie mniejszej lub większej ilości punktów sieci grawimetrycznej. O uzupełnieniu (lub jedynie uaktualnieniu) sieci punktów podstawowych zadecyduje kierujący pracami polowymi po przeprowadzeniu wizji terenowej,

- wykonanie 1380 pomiarów siły ciężkości na 1250 stanowisk pomiarowych,

- wykonanie 100 nawiązawczych pomiarów siły ciężkości na stanowiskach bazowych (podstawowych), w tym także pomiary przęseł sieci podstawowej,

- 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 ±0,025 mGal.

Prace obliczeniowe i techniczne

- określenie dla każdego stanowiska pomiarowego współrzędnych *x* i *y* w układzie 1992 na podstawie pomiarów GPS,

- obliczenie dla wszystkich punktów pomiarowych wysokości *h* i wartości przyspieszenia siły ciężkości *g*,

- opracowanie modelu rzeźby terenu i obliczenie poprawki topograficznej w strefach do 20 km dla każdego punktu grawimetrycznego,

- obliczenie dla 7200 punktów pomiarowych wartości anomalii siły ciężkości w redukcji Bouguera dla stałej i zmiennej gęstości utworów warstwy redukowanej,

- zestawienie katalogu punktów pomiarowych zawierającego:

- współrzędne *x* i *y* w układzie 1992 [km],

- wartości przyspieszenia siły ciężkości *g* [mGal] w systemie IGSN 71,

- wysokości *h* punktów [m] dla poziomu odniesienia Kronsztadt,

- wartości anomalii w redukcji Bouguera [mGal] dla stałych i zmiennej gęstości utworów warstwy redukowanej oraz dla elipsoidy GRS 80,

- wartości sumaryczne poprawki topograficznej siły ciężkości [mGal],

- sporządzenie operatu pomiarowego.

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

Zestawienie materiałów z prac terenowych i obliczeniowych

Dane grawimetryczne z pomiarów terenowych i prac obliczeniowych dla każdego punktu pomiarowego zestawione będą, jak wspomniano wyżej w postaci katalogu, stanowiącego bardzo istotną część dokumentacji z wykonanych prac. Punkty pomiarowe, którym dwukrotnie wyznaczono współrzędne, wysokość lub przyspieszenie siły ciężkości, będą posiadały w katalogu uśrednione wartości tych parametrów.

Materiały dokumentujące wykonanie pomiarów grawimetrycznych i związanych z nimi robót geodezyjnych oraz prac obliczeniowych zestawione będą w postaci operatu pomiarowego i złożone w archiwum wykonawcy prac. W skład operatu wejdą między innymi:

- mapy dokumentacyjne (topograficzne) w skali 1:25 000 (lub 1:10 000),

- dzienniki niwelacyjne,

- dzienniki pomiarów grawimetrycznych.

PRACE GRAWIMETRYCZNE W ASPEKCIE zapewnienia bezpieczeństwa powszechnego, bezpieczeństwa pracy i ochrony środowiska

Grawimetria należy do metod przyjaznych środowisku. Wykonanie pomiaru grawimetrycznego sprowadza się do dotarcia na zaplanowane miejsce i zarejestrowania przyspieszenia ziemskiego bez najmniejszej ingerencji w środowisko. W związku z tym wykluczone jest, aby projektowane badania w jakikolwiek sposób mogły wpłynąć niekorzystnie na grunty rolne, leśne lub szatę roślinną na terenie przewidywanych prac. Uwaga ta dotyczy również powietrza atmosferycznego jak i środowiska gruntowo-wodnego.

INTERPRETACJA DANYCH GRAWIMETRYCZNYCH

Do opracowania i wykreślenia map grawimetrycznych zastosowane będzie profesjonalne oprogramowanie: program SURFER firmy Golden Software Inc. oraz programy z pakietu OASIS montaj firmy Geosoft Inc. Wszystkie procedury w ramach sporządzania map wykonywane będą po zapisaniu danych początkowych w postaci siatek wyinterpolowanych wartości anomalii. W przypadku anomalii Bouguera zostaną utworzone, w zależności od potrzeb różne siatki interpolacyjne (siatki kwadratów). Mapy anomalii Bouguera będą

opracowane na podstawie wartości anomalii wyliczonych dla gęstości stałej i/lub gęstości zmiennej (wg uzgodnień).

W ramach prac interpretacyjnych uzasadnione jest opracowanie następujących map grawimetrycznych:

- anomalii rezydualnych na podstawie filtracji częstotliwościowej lub według klasycznej metody Griffina dla zadanych głębokości planowanego rozpoznania,

- anomalii regionalnych przy zastosowaniu filtracji częstotliwościowej lub metody Griffina dla zobrazowania efektu grawitacyjnego pochodzącego od podłoża,

- gradientu poziomego i dekonwolucji Eulera dla rozpoznania elementów tektoniki i granic ciał wywołujących anomalie.

Wymienione wyżej mapy zostaną sporządzone po transformacjach rozkładu anomalii Bouguera. Metody przekształcania pomierzonego pola grawitacyjnego oraz parametry transformacji zostaną wybrane po analizie danych geologiczno-wiertniczych i ukierunkowane na rozpoznanie budowy strukturalnej w założonym interwale głębokości.

Uzyskane dane grawimetryczne powinny być dostosowane do późniejszej kompleksowej interpretacji geofizycznej ukierunkowanej na dalsze rozpoznanie litologii oraz struktury i tektoniki rejonu badań.

Zmiany czasowe anomalii Bouguera

Okresowe pomiary grawimetryczne w cyklu kilkuletnim, wykonywane w ramach tzw. monitoringu grawimetrycznego doprowadzą do uzyskania anomalii Bouguera (w tych samych punktach) dla kolejnych serii pomiarowych. Różnice anomalii pomiędzy seriami (tzw. anomalie różnicowe) będą obrazowały zmiany gęstości objętościowej zachodzące w utworach skalnych zalegających pod analizowanym profilem czy rejonem badań. Analizie poddane będą różnice wartości pomiędzy daną serią i pierwszą, a także pomiędzy kolejnymi seriami, co pozwoli ocenić dynamikę zmian rozkładu masy utworów skalnych w poszczególnych interwałach czasowych (Fajklewicz, 2007).

Forma udokumentowania wyników

Opracowanie końcowe będzie zwierało:

- część tekstową, w tym:

- opis techniki i metodyki prac pomiarowych,

- zakres wykonanych prac,

- opis metodyki przetwarzania danych i interpretacji,

- omówienie wyników i ich analizę,

- część graficzną w postaci opracowanych map grawimetrycznych - skala 1:50 000 (lub inna),

- część dokumentacyjną zapisaną na CD lub DVD, zawierającą:

- katalogi danych grawimetrycznych,

- podstawową mapę anomalii Bouguera.

Wszystkie zmiany zakresu prac interpretacyjnych i formy załączników będą uzgadniane na poszczególnych etapach prac z przedstawicielem Zamawiającego.

HARMONOGRAM ORAZ KOSZTORYS PRAC

Czas realizacji planowanych prac (w pierwszej serii i każdej następnej objętej monitoringiem) wyniesie 9-10 miesięcy. Poszczególne etapy wykonane będą w następujących terminach:

- przeprowadzenie pomiarów terenowych – 1-2 miesiące,

- przetwarzanie danych – 2-3 tygodnie,

- opracowanie i analiza wyników, sporządzenie dokumentacji – około 1 miesiąca.

Koszt jednostkowy wykonania pomiarów i opracowania danych dla jednego punktu pomiarowego wyniesie 160 zł netto. Dla 7200 punktów łączny koszt to 0,2 mln zł.

UWAGI KOŃCOWE

Zleceniodawcy przysługuje prawo wprowadzania zmian do projektu, łącznie ze zmianą metodyki prac, w zależności od uzyskiwanych wyników, a także prawo przerwania prac terenowych, jeśli nie gwarantują uzyskania technicznie poprawnych rezultatów, pozwalających rozwiązać postawione zadanie.

Odpowiedzialność za właściwe i ekonomiczne wykorzystanie środków technicznych przeznaczonych na prace ponosi wykonawca.

W przypadku konieczności wprowadzenia zmian metodycznych w stosunku do określonych w projekcie lub też zmiany zakresu prac w wyniku nieprzewidzianych trudności terenowych, obowiązkiem wykonawcy jest wystąpić z odpowiednio umotywowanym wnioskiem do Zleceniodawcy o ich zmianę. Zmiany, o których mowa, muszą być zaakceptowane przez Zleceniodawcę.

PODSUMOWANIE II SEGMENTU (zadania 1.1.14 - 1.1.18)

(Adam Wójcicki, Janusz Jureczka, Jan Lubaś, Jarosław Chećko, Stanisław Nagy, Bartosz Papiernik, Radosław Tarkowski)

W ramach II Segmentu wykonano dla powyższego zakresu ramowego (zadania **1.1.14** - **1.1.18**) analizy i scenariusze dla następujących obiektów:

1. Obiekt w poziomach solankowych w rejonie Bełchatowa (Budziszewice-Zaosie) jako potencjalne składowisko dla projektu demonstracyjnego CCS PGE Bełchatów.

2. Obiekt w poziomach solankowych na południowym skraju rejonu GZW (Skoczów-Czechowice) jako potencjalne składowisko dla projektu demonstracyjnego PKE&ZAK Kędzierzyn (anulowany w 2010 roku, możliwy inny projekt CCS Tauronu w rejonie GZW, ale raczej w dalszej perspektywie).

3. Trzeci obiekt w poziomach solankowych to właściwie dwa obiekty/struktury:

- Choszczno-Suliszewo w rejonie NW Polski, ewentualnie na potrzeby aglomeracji szczecińskiej

- Grodzisk-Ujazd-Bukowiec (Niecka Poznańska - megastruktura solankowa, w stropie której występują też złoża gazu) w rejonie Wielkopolski, ewentualnie na potrzeby aglomeracji poznańskiej

4. Kolektory w wyeksploatowanych złożach gazu ziemnego i/lub ropy naftowej - prace wykonano dla trzech obiektów:

- złoże ropy Nosówka koło Rzeszowa (możliwe wspomaganie wydobycia ropy przez zatłaczanie CO2 od niedużego emitenta z Rzeszowa lub Tarnowa),

- złoże gazu Wilków koło Głogowa (możliwe składowanie CO2 od emitentów średniej wielkości, tzn. np. z Zagłębia Miedziowego, wspomaganie wydobycia gazu raczej mało perspektywiczne w porównaniu z przypadkiem złoża ropy),

- złoże gazu i kondensatu Łąkta wraz z podścielającym poziomem solankowym (możliwe składowanie CO2 od emitentów średniej wielkości, z aglomeracji krakowskiej lub Tarnowa, obok składowania w solankach także wspomaganie wydobycia gazu i kondensatu na niewielką skalę); przypadek pośredni miedzy scenariuszem 3 i 4 (**3a**).

5. Głębokie nieeksploatowane pokłady węgla - obiekt Warszowice-Pawłowice (możliwe wspomaganie wydobycia metanu pokładów węgla na niewielką skalę).

Ad. 1

Obiekt w poziomach solankowych w rejonie Bełchatowa (struktura Budziszewice-Zaosie)

Opracowanie dla struktury Budziszewice stanowiło 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 sejsmiką (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 podręcznikowych kryteriów przydatności na potencjalne składowisko dla projektu demonstracyjnego PGE Elektrownia Bełchatów S.A., ale tylko dla niej można przeprowadzić w miarę 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 połączony z płytszym kolektorem górnego pliensbachu; główne uszczelnienie stanowią utwory dolnego toarku) oraz w mniejszym stopniu triasu dolnego.

Własności kolektorskie utworów dolnej jury są, według realistycznych szacunków wystarczające dla geologicznego składowania dwutlenku węgla w założonych ilościach (w ramach zadania **1.1.16** dla scenariuszy zatłaczania uzyskano, zależnie od ilości otworów zatłaczających i wykorzystanych kolektorów, pojemność dynamiczną, czyli praktyczną w granicach **50 - 120 mln ton**, a statyczną, efektywną dwukrotnie większą). Zatłaczanie 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-Tuszyn i Wojszyce, które były w tym czasie (2009 rok) nieporównywalnie słabiej rozpoznane. Dla wspomnianych struktur rezerwowych PGE wykonało (2009/2010) następnie rozpoznawcze prace sejsmicznych (Nowak et al., 2009a i 2009b) i odwierciło po jednym otworze badawczym. Przewidziano w tym wykonanie jednego otworu w rejonie Pabianic, na SE od struktury Lutomiersk, w sąsiedztwie węzła tektonicznego, co miało umożliwić 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 nawiercajacych jurę (są dopiero w jej sąsiedztwie). Po wykonaniu powyższych prac i opracowaniu ich wyników struktury te były rozpoznane w porównywalnym stopniu jak struktura Budziszewice-Zaosie. Struktura w rejonie Pabianic okazała się gorsza z punktu widzenia bezpieczeństwa i wykonalności składowania niż Budziszewice a struktura Wojszyce –

lepsza i ona została właśnie wstępnie wybrana przez PGE EBSA na potrzeby projektu demonstracyjnego, ale nie wykonano dotąd żadnych dalszych prac badawczych na strukturze Wojszyce, oprócz tych rozpoznawczych zakończonych w 2010 roku, których wyniki opracowano w 2011 roku.

W ramach zadania 1.1.18 sporządzono założenia projektu prac geologicznych na potrzeby monitoringu potencjalnego składowiska projektu demonstracyjnego PGE EBSA – Budziszewice-Zaosie, którego szczegółową charakterystykę przedstawiono w rozdziałach **1.1.14** – **1.1.17** oraz projekty prac geologicznych na wiercenie otworów do pilotażowego zatłaczania dwutlenku węgla (Modliński et al., 2009a i 2009b).

Ad. 2

Obiekt w poziomach solankowych na południowym skraju rejonu GZW (Skoczów-Czechowice)

Z przeprowadzonej oceny występujących w profilu geologicznym Górnośląskiego Zagłębia Węglowego kompleksów skał średnio- i gruboklastycznych wynika, że najkorzystniejszymi parametrami, pod kątem potencjalnego składowiska CO2, charakteryzują się warstwy dębowieckie w profilu utworów mioceńskich.

Utwory średnio- i gruboklastyczne krakowskiej serii piaskowcowej karbonu węglonośnego, co prawda należą do silnie wodonośnej części karbonu i charakteryzują się relatywnie dobrą przepuszczalnością i wodonośnością, jednak na ogół zalegają stosunkowo płytko, a na obszarach, w których zalegają głębiej – poniżej 800 m – kontynuują się powyżej tego poziomu do znacznie mniejszych głębokości. Nieprzepuszczalne utwory ilaste miocenu zalegają na stropie KSP na ogół na nie większych głębokościach niż 400–450 m. Z kolei utwory piaszczysto-zlepieńcowe górnośląskiej serii piaskowcowej wykazują się dobrymi parametrami geologicznymi pod względem głębokości zalegania i przykrycia utworami izolującymi, lecz słabymi parametrami hydrogeologicznymi, zwłaszcza w zakresie przepuszczalności.

Na tle zbiorników karbońskich znacznie korzystniej rysuje się zbiornik warstw dębowieckich o dość dobrych parametrach geologicznych i hydrogeologicznych. Zbiornik ten jest stosunkowo rozległy, a jego parametry geologiczne w zakresie miąższości utworów piaszczysto-zlepieńcowych i głębokości ich zalegania są zróżnicowane. Biorąc pod uwagę to zróżnicowanie, a także stan dotychczasowego rozpoznania geologicznego i hydrogeologicznego oraz położenie w stosunku do kopalń węgla kamiennego, w zbiorniku tym można wydzielić kilka obszarów, które mogą być rozpatrywane jako miejsca ewentualnego składowania CO2. Obszary te należy lokalizować w zachodniej i północnej części zbiornika warstw dębowieckich. Według obecnego stanu rozpoznania największe potencjalne możliwości daje obszar położony na zachód i północny-zachód od Bielska-Białej rozciągający się od Cieszyna i Skoczowa po Czechowice-Dziedzice (dalsze badania i ewentualna lokalizacja instalacji składowania możliwa byłby w południowej i wschodniej części tego obszaru, na skłonach obiektu, który nie ma jednak charakteru antykliny, lecz zagłębienia). Ten rejon występowania zbiornika warstw dębowieckich został poddany szczegółowej analizie w zakresie możliwości bezpiecznego składowania CO2. Obliczone statyczne, efektywne pojemności składowania CO2 dla warstw dębowieckich w badanym rejonie zostały oszacowane na 40–60 Mt, natomiast dynamiczne, praktyczne, niestety tylko na **20-25 mln ton** CO2. Stąd składowisko może jedynie wystarczyć na potrzeby emitenta CO2 średniej wielkości z rejonu GZW, a nie nadaje się np. do składowania emisji z elektrowni zawodowych.

Ad. 3

Struktura Choszczno-Suliszewo(-Radęcin-Pławno)

Antykliny Choszczna i Suliszewa (-Radęcina-Pławna) są położone w południowo-zachodniej części niecki szczecińskiej w strefie granicznej z przyległym na południe blokiem Gorzowa. Właściwie jest to struktura Choszczno-Suliszewo-Radęcin-Pławno z kilkoma kulminacjami, z których Suliszewo i Pławno-Radęcin nie dzielą w zasadzie żadne bariery a kulminacja Choszczno oddzielona jest od pozostałych przegięciem. Podstawowym kolektorem są tu piaskowce dolnej jury, a analizowany podstawowy kompleks składowania obejmuje utwory od dolnego toarku (podstawowe uszczelnienie) poprzez pliensbach po synemur i hettang włącznie (kolektory). Kolektory w górnym triasie nie mają tak korzystnych własności jak te w dolnej jurze.

Założono szereg wariantów zatłaczania CO2, obejmujących poszczególne kulminacje struktury, zarówno dla założonej ilości otworów i okresu funkcjonowania projektu CCS (25 lat – w sumie **100 mln ton** pojemności dynamicznej, przy założeniu stałej wydajności zatłaczania standardowo 1 mln ton CO2 rocznie na otwór, co wynika ze znakomitych własności zbiornikowych piaskowców dolnej jury) jak i dla zatłaczania do momentu całkowitego wypełnienia – otrzymano maksymalną pojemność dynamiczną, praktyczną **634 mln ton** – bliską pojemności statycznej, efektywnej, określającej całkowity potencjał składowania zbiornika.

Wykonane modelowania wskazują więc na bardzo dobre i stabilne warunki dla wgłębnego magazynowania CO2 w strukturach antyklinalnych strefy Choszczno - Suliszewo. Ich potencjał magazynowy wydaje się być ogromny, a ryzyko błędnej oceny ich pojemności zdaje się być nieznaczne. Do czynników stanowiących o ewentualnym ryzyku składowania CO2 w tym rejonie należy zaliczyć przede wszystkim niską jakość oraz ilość danych definiujących parametry zbiornikowe i filtracyjne poziomów uszczelniających i zbiornikowych. Może się to przekładać zwłaszcza na niezbyt poprawne odwzorowanie uszczelnień. Słabe jest też rozpoznanie tektoniki struktur co uniemożliwia jednoznaczne wykluczenie możliwości migracji CO2 z kompleksu składowania do jego nadkładu. W rozpatrywanym rejonie występuje 19 otworów wiertniczych, które mogą być stosunkowo łatwą drogą migracji zatłoczonego CO2 i stąd istotne jest szczegółowe rozpoznanie ich stanu technicznego, sposobów likwidacji a także uwzględnienie konieczności przeprowadzenia ponownej likwidacji niektórych otworów wiertniczych

Problem stanowi (nie)dostępność kulminacji Pławno-Radęcin gdzie występują obszary NATURA2000, a częściowo także Suliszewo gdzie obszary chronione sąsiadują z lokalizacją zatłaczania. Jedynie kulminacja Choszczno położona jest z dala od obszarów chronionych.

W przypadku podjęcia decyzji o składowaniu CO2 w analizowanych strukturach antyklinalnych niezbędne będzie wykonanie zdjęcia sejsmiki 3D, które umożliwi bardzo szczegółowe odwzorowanie geometrii struktur i wiarygodne rozpoznanie porowatości z wykorzystaniem inwersji sejsmicznej. Zastosowanie sejsmiki 4D umożliwiłoby monitorowanie bezpieczeństwa napełnianej struktury.

Struktura jest odpowiednia dla zaspokojenia potrzeb emitentów CO2 z aglomeracji szczecińskiej i ewentualnie elektrowni Dolna Odra.

Obiekt Grodzisk-Ujazd-Bukowiec (Niecka Poznańska - megastruktura solankowa, w stropie której występują też złoża gazu)

Obiekt zlokalizowany jest w północnej części monokliny przedsudeckiej w obrębie jednostki regionalnej – niecki poznańskiej ograniczonej od południa i południowego zachodu wyniesieniem wolsztyńskim. Kolektor obejmuje piaszczyste utwory górnego czerwonego spągowca. Pomiary nasycenia wód wgłębnych gazem ziemnym w kolektorze, wykonane próbnikiem złoża, wykazały znaczną zawartość rozpuszczonego gazu. Migrujący poprzez fazę wodną gaz po wypełnieniu lokalnych niewielkich pułapek został zablokowany od góry szczelnym ekranem ewaporatów cechsztyńskich i zaczął rozprzestrzeniać się na boki mega struktury. Zjawisko to pozwoliło w efekcie na nasycenie mega akifera gazem rozpuszczonym w fazie wodnej. Cały więc poziom czerwonego spągowca wypełniony jest wodą nasyconą gazem ziemnym, jedynie niewielkie podniesienia morfologiczne bądź jego wyklinowania w postaci pułapek litologicznych wypełnione są lub były gazem.

Obiekt obejmuje obszar sięgający w kierunku zachodnim po złoże gazu ziemnego Paproć. Jego południowa granica przebiega wzdłuż wyniesienia wału wolsztyńskiego i w swojej środkowej części obejmuje złoże Ujazd. Północna granica rozpatrywanego obszaru biegnie wzdłuż linii łączącej złoża Sątopy, Porażyn, Szewce W, Piekary i Stęszew. W kierunku wschodnim model rozciąga się równoleżnikowo od Stęszewa do Borowa (którego nie obejmuje).

Wykonano symulacje zatłaczania do megastruktury Niecki Poznańskiej (rejon Grodzisk Ujazd-Bukowiec-Paproć), przyjmując dwa warianty zatłaczania: 3 lub 7 otworów przez 50 lat, o wydajności około 73 tys. ton CO2 każdy, co dało sumaryczną ilość zatłoczonego CO2 w granicach **11 - 25 mln ton** (na potrzeby emitenta z Poznania średniej wielkości). Struktura posiada (statyczną) pojemność sekwestracyjną przewyższającą znacznie (o rząd wielkości) założone ilości zatłaczanego CO2. Na aktualnym etapie rozpoznania struktury, własności warstw wodonośnych nie gwarantują wystarczających chłonności dla zatłoczenia CO2 poniżej limitu na maksymalne ciśnienie denne i wymagają przeprowadzenia intensywnych zabiegów stymulacyjnych. Stąd przyjęto stosunkowo niewielką wydajność zatłaczania w pojedynczym otworze, która nie stanowiła by żadnego zagrożenia dla szczelności nadkładu. Ponadto istotna jest szczelność starych otworów, które licznie nawiercają rozpatrywany obszar, w aspekcie odziaływania z fazą wolną CO2 i dwutlenkiem węgla rozpuszczonym w solance.

Procesowi zatłaczania CO2 do struktury towarzyszą zjawiska:

- konwekcji fazy CO2 do wyższej położonych warstw struktury, równoczesnej z efektem

- rozpuszczania CO2 w solance w stopniu ograniczającym jego migracje zarówno w kierunku pionowym (do stropu struktury) jak i kierunkach lateralnych mogących stanowić potencjalną drogę ucieczki CO2 poza strukturę,

- wypieranie przez CO2 metanu z solanki i jego migrację do stropu struktury zasilającą naturalne pułapki gazu ziemnego zlokalizowane na strukturze – proces ten zachodzi jednak w wolnym tempie, a jego obserwowalne efekty przejawiają się po upływie setek lat.

Mamy tu więc do czynienia z formą wspomagania wydobycia gazu, chociaż w bardzo rozległym horyzoncie czasowym.

Ad. 4

Złoże ropy Nosówka

Złoże ropy naftowej Nosówka położone jest w brzeżnej strefie Karpat fliszowych, w południowo - zachodniej części tzw. zatoki rzeszowskiej. Akumulacja ropy naftowej związana jest skałami węglanowymi, reprezentowanymi przez wapienie i wapienie dolomityczne wizenu (karbon dolny).

Skonstruowano dynamiczny model symulacyjny złoża Nosówka w utworach wizenu w celu zweryfikowania możliwości składowania CO2 przy równoczesnej dalszej eksploatacji złoża i wykonano kilka wariantów zatłaczania. Najbardziej obiecujące wyniki otrzymano dla wariantu zakładającego wydobycie ropy naftowej dwoma odwiertami, poprzedzone wstępną sekwestracją CO2, poprzez zatłaczanie jednym (trzecim) odwiertem, przy czym eksploatacja rozpoczyna się w chwili osiągnięcia przez średnie ciśnienie złożowe pierwotnej wartości (a po zakończaniu wydobycia ropy ponownie dotłaczanie CO2 do momentu osiągnięcia przez średnie ciśnienie złożowe pierwotnej wartości). W wariancie tym uzyskano stopień sczerpania złoża na poziomie około 64%, co oznacza zysk na poziomie około 130 tys. Nm3 ropy naftowej w rezultacie wstępnej sekwestracji CO2, w porównaniu z odpowiednim wariantem bazowym. W takim przypadku przewidziano zatłoczenie około 0,5 mln ton CO2 (wstępna sekwestracja CO2 przed produkcją ropy i dotłaczanie CO2 po jej zakończeniu – obydwie fazy po około 2,5 roku). Potrzebny CO2 (w ilościach rzędu 100 tys. ton/rok) mógłby pochodzić od niedużego emitenta z Rzeszowa lub Tarnowa (Zakłady Azotowe?). Taki projekt CCS, ze wspomaganiem wydobycia ropy, ma szanse realizacji w najbliższej przyszłości i mógłby być nawet opłacalny ekonomicznie (vide projekt Weyburn w Kanadzie/USA).

Złoże gazu Wilków

Złoże gazu ziemnego Wilków jest złożem związanym z przystropową partią piaszczystych utworów czerwonego spągowca. Zlokalizowane jest na monoklinie przedsudeckiej w obrębie jednostki regionalnej – depresji zielonogórskiej ograniczonej od północy wyniesieniem wolsztyńskim, a od południa blokiem przedsudeckim.

Wyniki symulacji pokazują, iż przy zatłaczaniu z zadaną wydajnością CO_2 bardzo szybko wypełnia strukturę, a wzrost jego udziału w produkowanym gazie (a co za tym idzie, spadek zawartości węglowodorów) powoduje szybkie wyłączenie kolejnych odwiertów. Całkowita ilość zatłoczonego CO_2 (pojemność struktury) zależy od przyjętego dopuszczalnego maksymalnego ciśnienia złożowego na koniec zatłaczania oraz założonej ilości otworów zatłaczających (5 otworów). Jeżeli za ciśnienie dopuszczalne przyjmiemy ciśnienie początkowe, sumaryczna ilość zatłoczonego dwutlenku węgla wynosi ok. **10,0 Mt** (stan osiągany po 5 latach i 7 miesiącach zatłaczania). Jeżeli dopuścimy przewyższenie ciśnienia końcowego o ok. 10% względem początkowego, pojemność struktury wzrasta do **11,3 Mt**. Jest to pojemność dynamiczna, praktyczna, natomiast pojemność statyczna, efektywna, obrazująca całkowity potencjał struktury, jest prawie dwukrotnie większa. Nie uzyskano przy tym istotnego wspomagania wydobycia gazu, stąd złoże Wilków nadaje się jedynie na składowisko CO2 dla któregoś z niedużych emitentów z Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego (najbliżej jest elektrociepłownia w Głogowie).

Złoże gazu i kondensatu Łąkta wraz z podścielającym poziomem solankowym

Złoże ropy naftowej Nosówka położone jest w brzeżnej strefie Karpat fliszowych. Akumulacja ropy naftowej związana jest skałami węglanowymi, reprezentowanymi przez kawernisto-szczelinowate wapienie późnej jury oraz piaskowcami cenomanu.

Symulacje zatłaczania CO2 wskazują że struktura posiada ograniczoną pojemność sekwestracyjną z powodu dużej aktywności wód złożowych objawiających się wysokim ciśnieniem złożowym pomimo stosunkowo wysokiego sczerpania jej zasobów gazu ziemnego. Maksymalizacja pojemności sekwestracyjnej wymaga zastosowania strategii jednoczesnego zatłaczania CO2 i wydobycia gazu ziemnego pozostałego w złożu. Wykorzystanie istniejącego systemu odwiertów do realizacji powyższej strategii wymaga rekonstrukcji odwiertów wydobywczych położonych w szczycie struktury i przystosowania peryferyjnych odwiertów zawodnionych do zatłaczania CO2. Zależnie od ilości odwiertów zatłaczających (4 - 9) zmagazynowano w strukturze od około **4,5** do **8,5 mln ton CO2** (pojemność dynamiczna, praktyczna – wyższa wartość stanowi około 80% pojemności statycznej, efektywnej samego złoża) w ciągu dwudziestu kilku lat. Pozwoliło to na dodatkowe wydobycie około 0,4 mld m3 gazu. Realizacja takiego projektu CCS wymagałaby dostarczenia kilkuset tysięcy ton CO2 od emitenta średniej wielkości z Krakowa lub Tarnowa.

Ad. 5

Obiekt w głębokich nieeksploatowanych pokładach węgla

Badania związane ze składowaniem CO2 w głęboko zalegających, nieeksploatowanych pokładach węgla w połączeniu z odzyskiem metanu z tych pokładów (technologia ECBM) na obecnym etapie są nadal w fazie rozpoznawczej, nie tylko w skali Polski, ale i świata. Selekcja potencjalnych składowisk, oprócz założeń o charakterze geologicznym, związanych m.in. z głębokością zalegania i metanonośnością pokładów węgla, powinna przede wszystkim uwzględniać ochronę istniejących złóż węgla kamiennego oraz dostępność pokładów dla możliwej eksploatacji w przyszłości. W GZW ze względu na bezpieczeństwo prowadzonych robót górniczych, obszary czynnych kopalń zostały wyłączone z oceny możliwości składowania CO2 w pokładach węgla. Poza obszarami złóż zagospodarowanych, jako minimalną głębokość zalegania pokładów przyjęto 1000 m, przy czym założono, że optymalnie głębokość ta powinna być nie mniejsza niż 1250–1300 m.

Z przeprowadzonej analizy regionalnej, której podstawowym wskaźnikiem była metanonośność pokładów węgla w interwale głębokości 1000–2000 m, wynika, że korzystne warunki dla lokalizacji składowisk występują głównie w centralno-południowej części GZW ze względu na powszechne występowanie poniżej głębokości 1000 m pokładów węgla o metanonośności większej niż 4,5 m3 CH4/Mg csw, obecność nieprzepuszczalnych utworów miocenu, istnienie dużych powierzchniowo obszarów odległych od czynnych kopalń węgla kamiennego oraz niski stopień zurbanizowania. W tej części zagłębia potencjalne pod względem składowania CO2 są przede wszystkim pokłady węgla górnośląskiej serii piaskowcowej oraz serii mułowcowej. Wstępne oszacowanie pojemności składowania CO2 wykonano w rejonie badawczym Pawłowice-Mizerów (jeden z trzech rejonów wytypowanych w ramach I segmentu dla pokładów węgla), dla którego opracowano szczegółowy, statyczny model strukturalno-parametryczny pokładów węgla górnośląskiej serii piaskowcowej. Obliczone (statyczne, efektywne) pojemności składowania dla tych pokładów oszacowane zostały na **8,3 Mt**. Tego rzędu pojemność składowania w przypadku połączenia z eksploatacją metanu może być wykorzystana przez lokalne mniejsze zakłady przemysłowe. Wykonano scenariusze zatłaczania CO2 do pokładów węgla z odzyskiem metanu, z których najbardziej obiecujący objął zatłaczanie do 200 tys. ton CO2 z wykorzystaniem otworu poziomego, co dało produkcję około 60 mln m3 metanu. Nie oznacza to, że dynamiczna pojemność składowania w rejonie badawczym Pawłowice-Mizerów wynosi jedynie 200 tys. ton, lecz że do wykorzystania potencjału pokładów węgla potrzebne byłoby odwiercenie parudziesięciu otworów iniekcyjnych (poziomych).

Dodatek A. Modelowania procesów zatłaczania CO2 do potencjalnych składowisk

(Adam Wójcicki, Sylwia Kijewska)

Problematyka modelowań procesów fizykochemicznych związanych z zatłaczaniem CO2 (Pruess et al., 2004) odnosi się do wielu aspektów związanych z inżynierią złożową i poszczególnymi mechanizmami wiązania CO2 w górotworze i solance. W ramach niniejszego przedsięwzięcia przewidziano przeanalizowanie i porównanie szeregu metodyk postępowania wykorzystywanych do oceny rozpływu, rozpuszczania i chemicznego wiązania CO2 z minerałami, czyli informacji bardzo istotnych z punktu widzenia wymogów Dyrektywy w sprawie geologicznego składowania dwutlenku węgla odnośnie rozpoznania warunków geologiczno-złożowych potencjalnego składowiska.

Na przykładzie rejonu Bełchatowa wykonano następujące prace:

W zadaniu 1.1.25 AGH wykonało obliczenia geochemiczne (program SOLMINEQ) na przykładzie otworu Jeżów IG-1, położonego w sąsiedztwie struktury B-Z. Określono dla takiego modelu 1-D (dolna jura) wpływ rozpuszczania CO2 w solance w funkcji temperatury na obniżenie pH, a także na wzrost zawartości jonów H^+ i HCO_3^- (czyli produktów dysocjacji kwasu węglowego). Są to fakty znane, ale istotne dla poprawnego wykonania symulacji i analiz laboratoryjnych reaktywności CO2-solanka-skała dla konkretnego rejonu i składowiska.

Natomiast w zadaniu 1.1.32 AGH wykonało regionalne modelowanie procesów zatłaczania CO2 (program GEM), dla obszaru obejmującego strukturę B-Z i inną strukturę, położoną w rejonie Zgierz-Łowicz, później odrzuconą z uwagi na niepewność co do szczelności kompleksu składowania. Wykorzystano przy tym regionalny model statyczny Papiernika. Dynamiczna pojemność składowania, otrzymana dla struktury B-Z wynosi w tym przypadku około 100 mln ton CO2. Kontynuacja tych prac była realizowana w ramach zadania 1.1.34, gdzie analizowano zachowanie się CO2 zatłoczonego do rozpatrywanych struktur, przez setki lat po zakończeniu zatłaczania. Wyniki tych prac były punktem odniesienia dla modelowań szczegółowych (1.1.16). Istotny wniosek z modelowań jest taki, że w rejonie otworu iniekcyjnego występuje zjawisko wychłodzenia górotworu w trakcie zatłaczania, stąd w przypadku struktury B-Z bardziej sensowne byłoby lokalizowanie otworów zatłaczających na zboczach struktury lub zatłaczanie do głębiej położonego zbiornika dolnej jury.

Następnie PIG-PIB wykonał regionalne modelowania rozpływu CO2 (program MODFLOW, zadanie 1.1.9) w rejonie Bełchatowa, zakładając zatłaczanie CO2 do 15 otworów symulacyjnych, o wydajnościach nieco mniejszych od przyjętych w modelach regionalnych AGH. Rozpływ CO2 kontrolowany był przez pole ciśnień, znane dzięki dostępnym wynikom pomiarów w odwiertach. Otrzymane wyniki sugerują, że front zatłoczonego CO2 rozprzestrzeni się w ciągu 5000 lat o 13-25 km od otworów symulacyjnych (nie uwzględniono w tym przypadku rozpuszczania CO2 w solance).

Z kolei w ramach zadania 1.1.16 AGH i GIG wykonały szczegółowe modelowanie dynamiczne zatłaczania CO2 do zbiorników dolnojurajskich. W obu przypadkach podstawą do tych analiz był model statyczny struktury B-Z z bezpośrednim otoczeniem, uszczegółowiony w stosunku do rozpatrywanego fragmentu modelu Papiernika o wyniki z interpretacji profili sejsmicznych RWE Dea i innych archiwalnych profili sejsmicznych. Poza faktem, że do modelowania wykorzystano różne programy (odpowiednio GEM i

TOUGH2), inne były założenia odnośnie scenariuszy sekwestracji dla obu wykonawców. AGH wykonało symulacje zatłaczania dla trzech wariantów – trzech otworów pionowych, dwóch otworów pionowych i jednego otworu poziomego. Wszystkie dotyczyły zatłaczania CO2 w szczytowej partii struktury, w ilościach takich jakie planowano w ramach projektu demo CCS PGE Bełchatów (około 2 mln ton rocznie). Natomiast GIG prowadził symulacje zatłaczania w otworach położonych na zboczach struktury – dla wariantu projektu demo CCS były to 4 otwory, a poza tym wykonano wariant zatłaczania testowego, na niewielką skalę, w jednym otworze. Wykonano w obu scenariuszach „pełnoskalowych" symulacje zachowania się zatłaczanego CO2 przez setki i tysiące lat. Porównując rezultaty modelowań AGH i GIG, otrzymujemy, że zatłaczanie na zboczu struktury (GIG) w mniejszym stopniu zaburza istniejące pole ciśnień i szybciej powracają w tym przypadku pierwotne warunki złożowe, niż w przypadku zatłaczania w szczycie struktury. Podobnie, relatywnie niewielkie i przemijające jest odziaływanie na pole ciśnień regionalnego modelu zatłaczania realizowanego przez PIG-PIB. Zależnie od scenariusza zatłaczania pojemność dynamiczna struktury waha się w granicach 60-120 mln ton CO2.

W zadaniu 1.1.16 dla rejonu Bełchatowa INiG wykonał modelowanie zatłaczania do zbiornika triasu dolnego. Celem prac było oszacowanie wykonalności takiego przedsięwzięcia, związanego z wykorzystaniem zbiornika o słabych i bardzo zmiennych parametrach złożowych.

Ponadto w ramach zadania 1.1.14 IGSMiE wykonał modelowania reaktywności CO2-skała-płyny złożowe (program PHREEQC) dla próbek skał z rejonu struktury B-Z. Wynikiem modelowań, kalibrowanych analizami laboratoryjnymi było określenie zachowania się CO2 w reakcjach krótkoterminowych w obrębie układu CO2-skała-płyny złożowe oraz w procesach długoterminowych. W ostatnim przypadku otrzymano, oprócz rozpuszczania CO2 w solance, wiązanie CO2 z minerałami (np. dawsonit, syderyt, kalcyt lub dolomit – w ciągu okresu czasu do 20 000 lat, zależnie od składu mineralnego skały, możliwa jest sekwestracja mineralna do kilkunastu kg CO2 na m3 skały, czyli nie są to ilości znaczące w bilansie sekwestracyjnym).

Z punktu widzenia modelowań, strukturze B-Z poświęcono wiele miejsca i wysiłków. Wynikało to z faktu że była to pierwsza struktura w ramach niniejszego przedsięwzięcia charakteryzowana zgodnie z wymogami Dyrektywy w sprawie geologicznego składowania dwutlenku węgla, w zależności od posiadanych danych, stąd było to niejako „rozpoznanie bojem".

Struktury naftowe (czy obiekty związane ze strukturami naftowymi, jak Niecka Poznańska), generalnie dobrze rozpoznane, nie wymagały tylu zabiegów, podobnie jak pokłady węgla.

Dwa warianty modelowania wykonały ponadto AGH i GIG dla struktury dolnojurajskiej Choszczno-Suliszewo, gdzie analizowano, podobnie jak w przypadku struktury B-Z, różne scenariusze zatłaczania, zaś IGSMiE wykonał analizy laboratoryjne i symulacje procesów reaktywności CO2-skała-płyny złożowe.

Choć niektórzy wykonawcy realizowali wcześniej, w ramach innych przedsięwzięć, niektóre elementy powyższego zakresu prac, jest to pierwszy przypadek w naszym kraju, gdzie przeanalizowano z punktu widzenia wymogów (Aneksu nr 1) Dyrektywy w sprawie geologicznego składowania dwutlenku węgla szereg struktur – potencjalnych składowisk CO2, co prawda bazując na często niewystarczających danych archiwalnych.

Celem tych modelowań, podobnie jak całego II segmentu, była wstępna charakterystyka wytypowanych struktur na potrzeby wyboru potencjalnych składowisk dwutlenku węgla. Zagadnienia te (**Fig. 1.1.18_272**),

o czym wspomniano we wstępie do II Segmentu, stanowią początkowy etap analiz przydatności obiektu jako potencjalnego składowiska. Nawet w przypadki struktur naftowych (np. złoże ropy naftowej Nosówka – H. Jędrzejowska-Tyczkowska) prezentowane w ramach II Segmentu modele statyczne są niewystarczające na potrzeby sporządzenia dokumentacji potrzebnej do koncesji na składowanie, tzn. dane na podstawie których konstruowany jest model statyczny charakteryzują się zwykle zróżnicowaną jakością i wiarygodnością. Informacje te są w przypadku struktur naftowych co najwyżej wystarczające do zaprojektowania rozpoznania szczegółowego/monitoringu zerowego (przed zatłaczaniem CO2), zaś dopiero rezultaty tych prac umożliwiłyby opracowanie studium wykonalności dla monitoringu zatłaczania CO2.

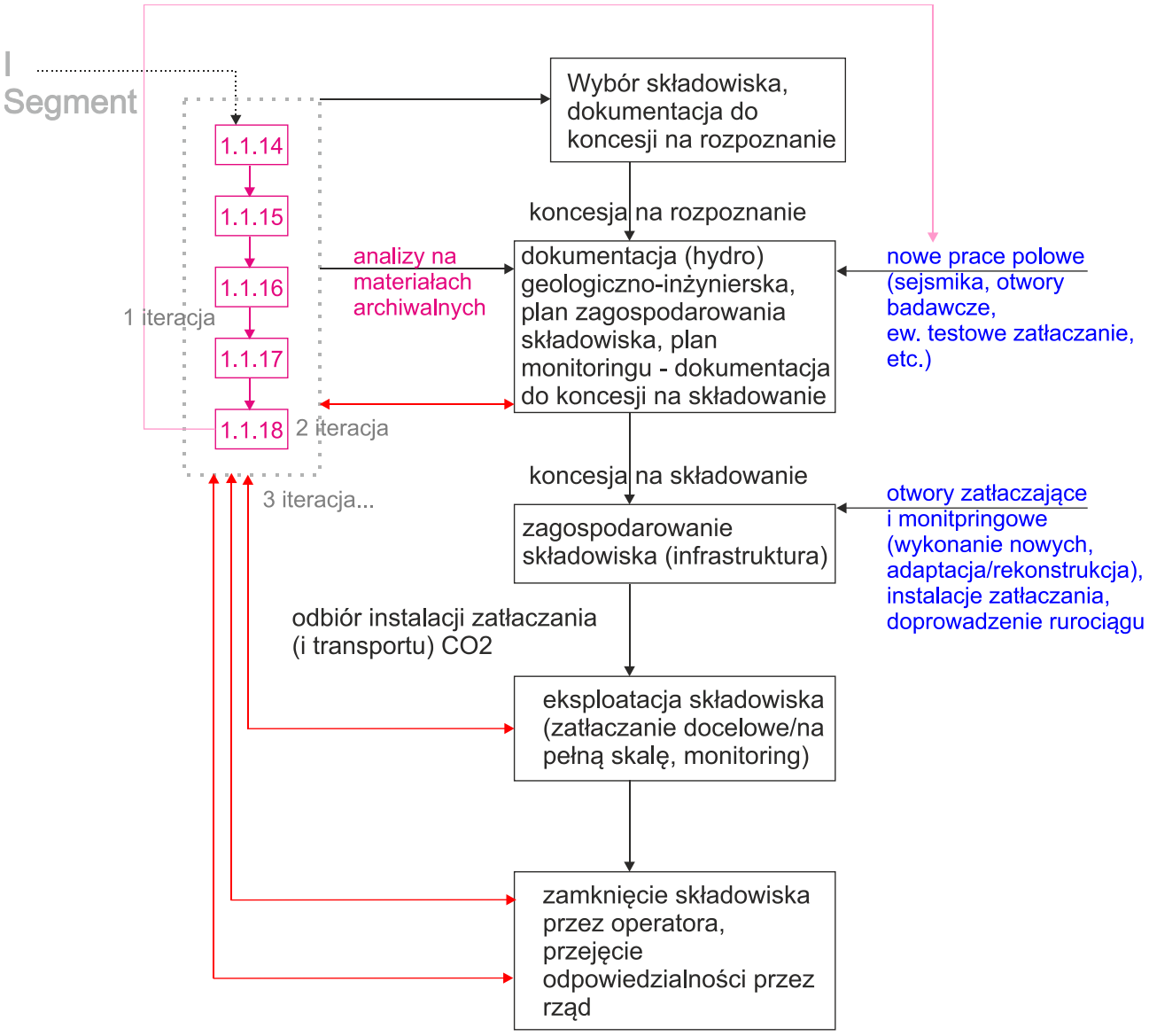


Fig. 1.1.18_272 Relacja prac wykonanych w ramach II segmentu, np. dla struktury B-Z, do cyklu życia projektu demo CCS PGE Bełchatów, w przypadku wybrania struktury na składowisko demo.

Tym bardziej dotyczy to struktur solankowych, charakteryzujących się na ogół stąd w Dyrektywie CCS i jej implementacji do prawa krajowego przewidziano etap prac objętych koncesją na rozpoznanie (**Fig. 1.1.18_272**), obejmujący prace polowe (sejsmika, inne metody geofizyczne, otwory badawcze). Etap ten może, ale nie musi, obejmować testowe zatłaczanie CO2 w ilości odpowiadającej drobnemu ułamkowi ilości przewidzianej docelowo (do 100 kt, a więc w przypadku projektu demonstracyjnego, dla którego przewidziano zatłaczanie 2 mln ton CO2 rocznie, jest to 5%). Etap rozpoznania składowisk może obejmować zarówno „poszukiwania" (prace półregionalne, na szerszym obszarze, obejmujące jedną lub więcej struktur – potencjalnych składowisk – było to prowadzone w ramach początkowego etapu prac projektu demonstracyjnego PGE Bełchatów, ale bez koncesji, ponieważ jeszcze wtedy nie zostało wdrożone odpowiednie prawo – implementacja Dyrektywy CCS) jak i też, co najistotniejsze, szczegółowe rozpoznanie/udokumentowanie wytypowanej struktury (w tym monitoring stanu początkowego i ewentualnie testowe zatłaczanie), niezbędne do sporządzenia dokumentacji do koncesji na składowanie.

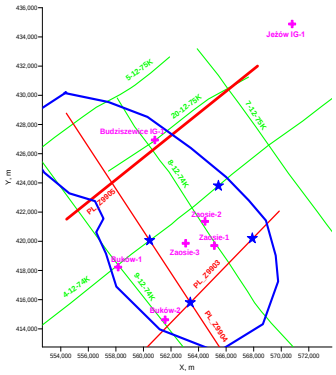
Z powodów podanych powyżej taki tok postępowania powinien również dotyczyć sczerpanych złóż węglowodorów, wybieranych na potencjalne składowiska CO2 (w przypadku złoża węglowodorów, gdzie np. zatłaczamy CO2 dla wspomagania wydobycia, o składowaniu mówimy dopiero po zakończeniu jego eksploatacji).

Wracając do struktur solankowych, a więc np. struktury Budziszewice-Zaosie opracowanej dla rejonu Bełchatowa, czy struktury Choszczno-Suliszewo w rejonie NW Polski, dostępne dane geologiczno-geofizyczne były niewystarczające do sporządzenia dokumentacji do koncesji na składowanie. Modele statyczne były oparte na danych sejsmicznych o przeważnie słabej jakości, wykonanych niegdyś dla rozwiązania zupełnie innego zadania geologicznego. Informacje z otworów charakteryzowały się zróżnicowaną jakością i było ich niewiele. Modele te stanowiły stąd niedostateczny materiał na potrzeby wykonania wiarygodnych symulacji zatłaczania CO2 na docelową skalę w obrębie rozpatrywanych obiektów, zidentyfikowania wszystkich aspektów ryzyka geologicznego wiążącego się z zatłaczaniem i składowaniem CO2 oraz opracowaniem finalnych planów monitoringu, umożliwiających wiarygodne śledzenie zachowania się CO2 w obrębie struktur (stąd jest to 1 iteracja na diagramie **Fig. 1.1.18_272**). Na pytania te odpowiedziałyby dopiero wyniki nowych prac polowych, które objęłyby także tzw. monitoring zerowy (stan początkowy struktury, przed zatłaczaniem), którego założenia m.in. przedstawiono w powyższych podrozdziałach **1.1.18**, dotyczących poszczególnych struktur, w oparciu o wyniki **1.1.14**, **1.1.15**, **1.1.16**, **1.1.17**. Dopiero prace w ramach koncesji na rozpoznanie (2 iteracja) odpowiedziałyby na powyższe pytania, w tym czy struktura faktycznie nadaje się do składowania założonych ilości CO2, natomiast zakres prac wykonanych w ramach II Segmentu pozwolił na określenie obszaru naszej niewiedzy.

Należy przy tym nadmienić że wspomniane dwie struktury są, jak na obiekty solankowe w Polsce, stosunkowo dobrze rozpoznane. Dla przykładu, w rejonie Bełchatowa Konsorcjum rozpatrywało też jako poważnego kandydata do prac w II Segmencie strukturę Lutomiersk, gdzie dostępny był jeden (!) stary profil sejsmiczny. Model statyczny struktury, oparty o jeden przekrój sejsmiczny (i mapy regionalne Papiernika oraz parę otworów na strukturze i w jej otoczeniu) byłby bardzo prosty i jednoznaczny, nie wymagałby też zbyt wielu wariantów modelowania. Ale z punktu widzenia metodycznego, wyniki takich modelowań byłyby nieprzydatne nawet dla przygotowania założeń dla rozpoznania składowiska/monitoringu zerowego. Z kolei na strukturze Wojszyce były dostępne w chwili realizacji kilka starych profili sejsmicznych, ale nie było ani jednego otworu w obrębie struktury. PGE Bełchatów wykonało w ramach projektu demo półregionalne

prace sejsmiczne i grawimetryczne na strukturach Lutomiersk-Tuszyn i Wojszyce. Szkoda że prace takie nie zostały wykonane na strukturze Budziszewice-Zaosie (a były proponowane, przynajmniej parę profili sejsmicznych, ale PGE najwyraźniej uznało że na tym etapie wystarczą dane archiwalne, zwłaszcza że przyznane im środki unijne były ograniczone).

Dla zilustrowania problemów odnoszących się do, jak wspomniano wyżej, zróżnicowanej i często słabej jakości danych sejsmicznych dostępnych dla rozpatrywanych struktur, przedstawiono poniżej szereg figur.



Profil PL_Z9905

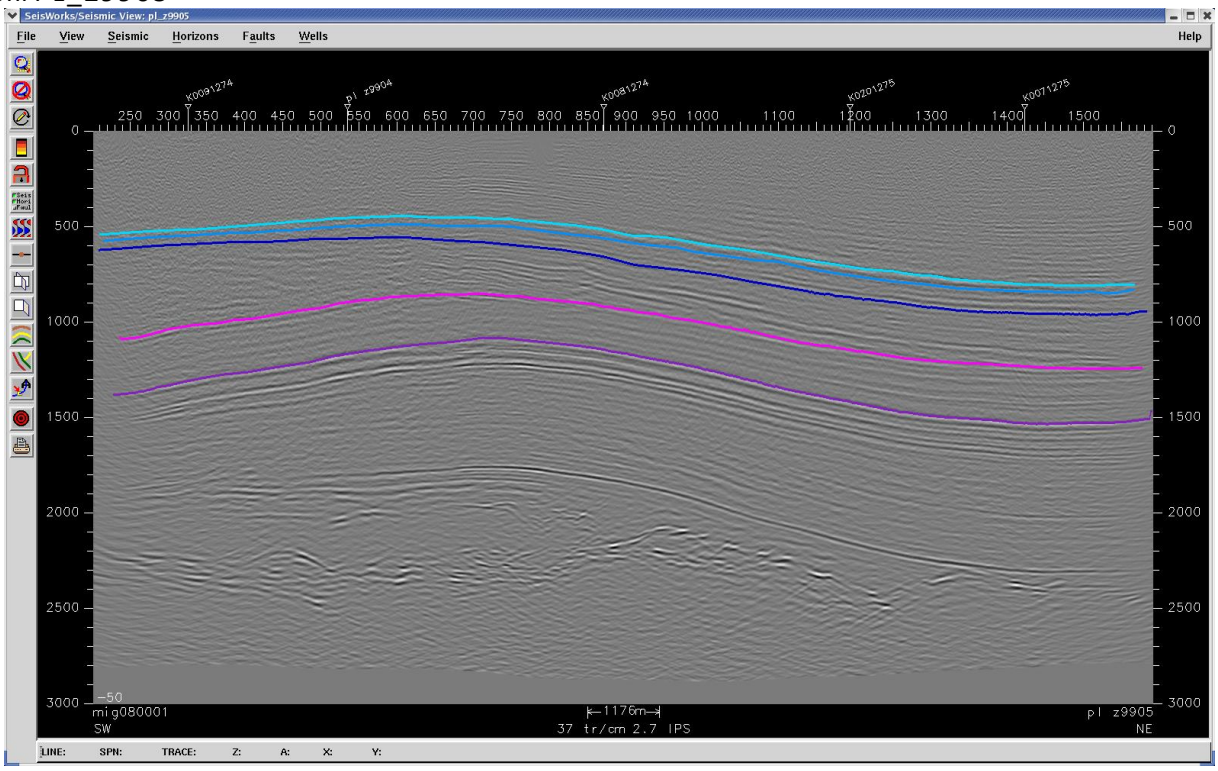


Fig. 1.1.18_273 Interpretacja geologiczna sekcji sejsmicznej dla profilu RWE Dea PLZ9905. Odcieniami niebieskiego zaznaczono horyzonty jury dolnej (od góry: strop toarku dolnego, strop pliensbachu górnego i strop synemuru; odpowiadają one utworom iłowcowym formacji ciechocińskiej, piaskowcom formacji drzewickiej i ostrowieckiej) zaś poniżej horyzonty triasowe (wewnątrzkajprowy i wapienia muszlowego

Na **Fig. 1.1.18_273** przedstawiono czasowy przekrój sejsmiczny RWE Dea z rejonu Budziszewic, który jest przykładem danych sejsmicznych o stosunkowo dobrej jakości, pomimo że przedmiotem zainteresowania wykonawcy prac były kompleksy permskie (poszukiwania naftowe) a nie jurajskie. Niestety, zarówno ten profil jak i pozostałe dwa, nie przechodzą przez kulminację struktury w rejonie otworów Zaosie.

Następnie przedstawiono ponownie ten przekrój (**Fig. 1.1.18_274**) dla porównania z dwoma atrybutami sejsmicznymi (**Fig. 1.1.18_275** i **276**), których typ i parametry wybrano pod kątem detekcji stref uskokowych w obrębie nadkładu uszczelniającego dla kolektorów dolnojurajskich. Atrybuty te są dostępne w programach do modelowania statycznego (w tym przypadku jest to program Schlumberger Petrel) i są analizowane na etapie konstrukcji modeli. W rezultacie analizy atrybutów, podobnie jak w przypadku interpretacji sekscji sejsmicznej (**Fig. 1.1.18_273**), nie stwierdzono obecności walnych uskoków w obrębie formacji ciechocińskiej (dolny toark). Jednak nawet dla tegoż przekroju, o relatywnie dobrej jakości, nie jesteśmy do końca pewni, czy faktycznie nie ma tam żadnych uskoków w nadkładzie uszczelniającym, a ponadto parametry akwizycji profilu były ustawione na kompleksy głębsze, perspektywiczne dla węglowodorów (perm). Ponadto profil ten, jak i pozostałe profile RWE Dea na strukturze, nie przechodzi przez kulminację struktury.

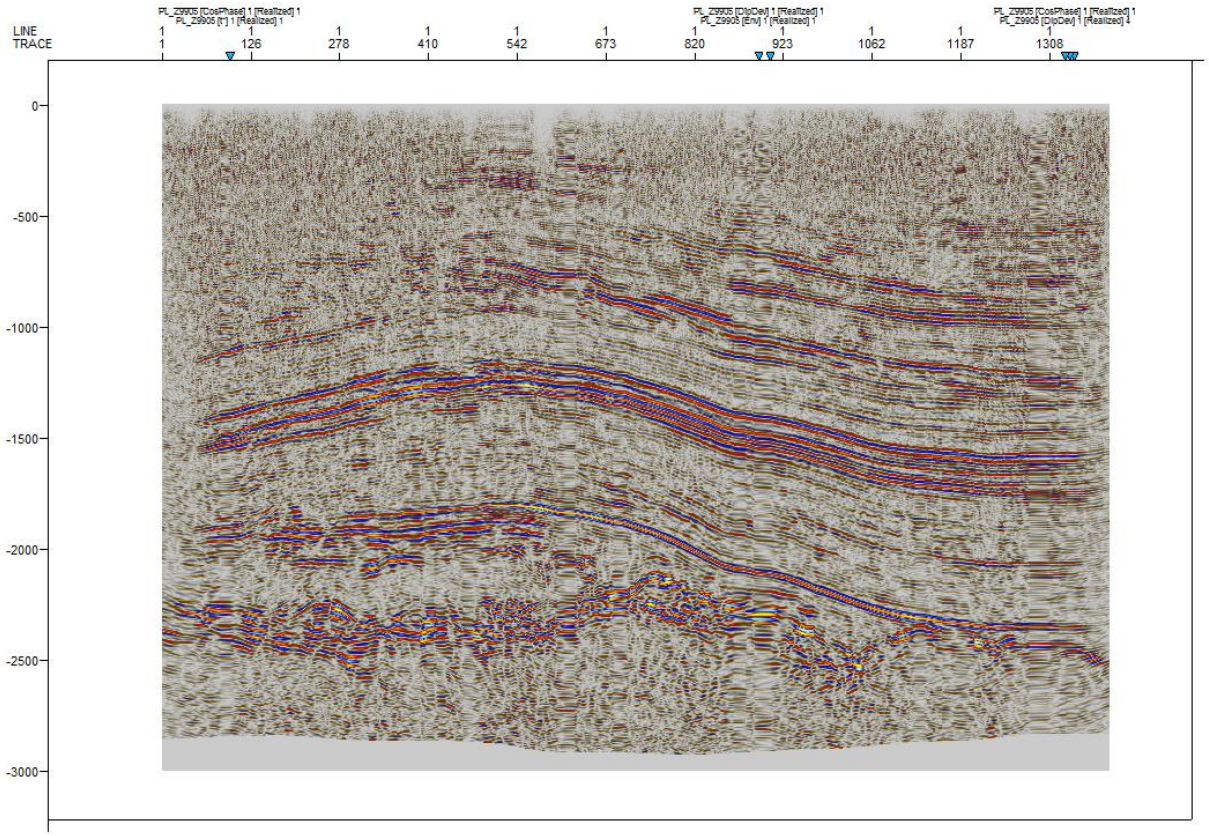


Fig. 1.1.18_274 Sekcja sejsmiczna (czasowa) dla profilu RWE Dea PLZ9905

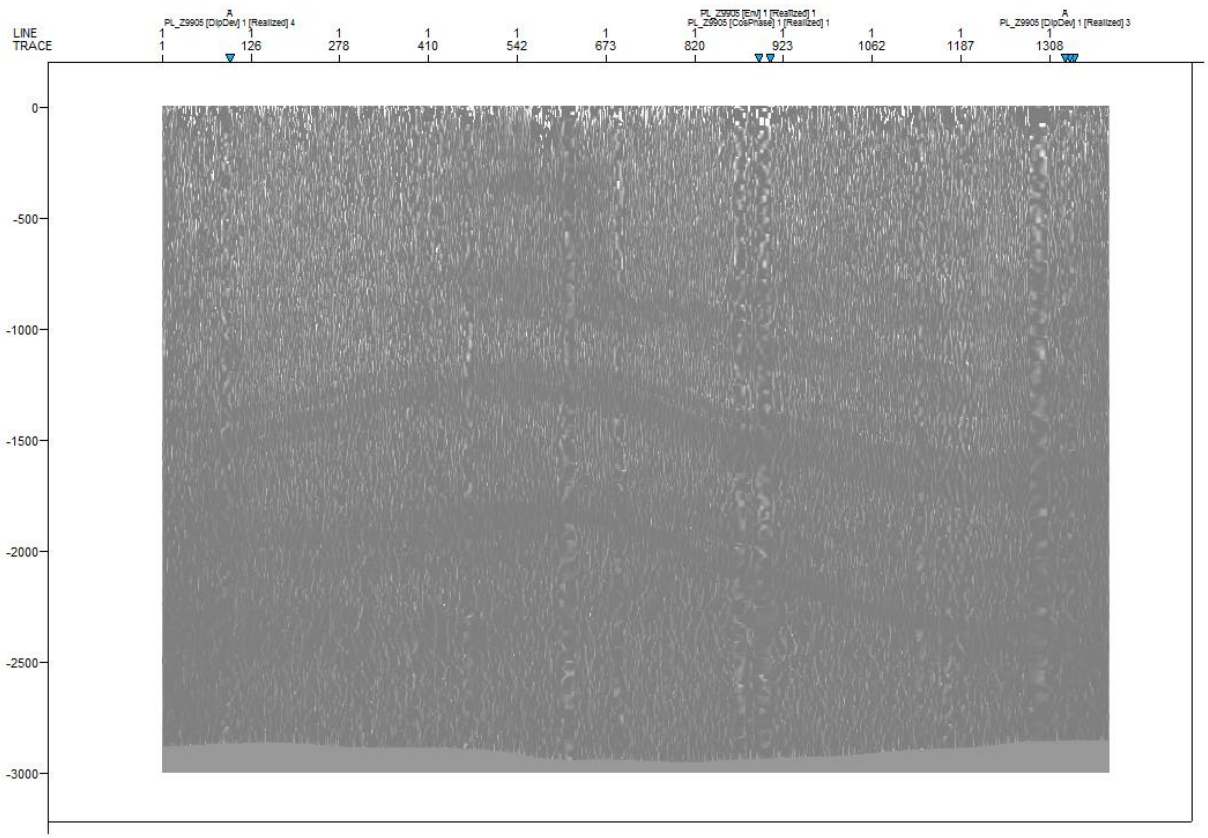


Fig. 1.1.18_275 Atrybut 3D curvature dla profilu RWE Dea PLZ9905

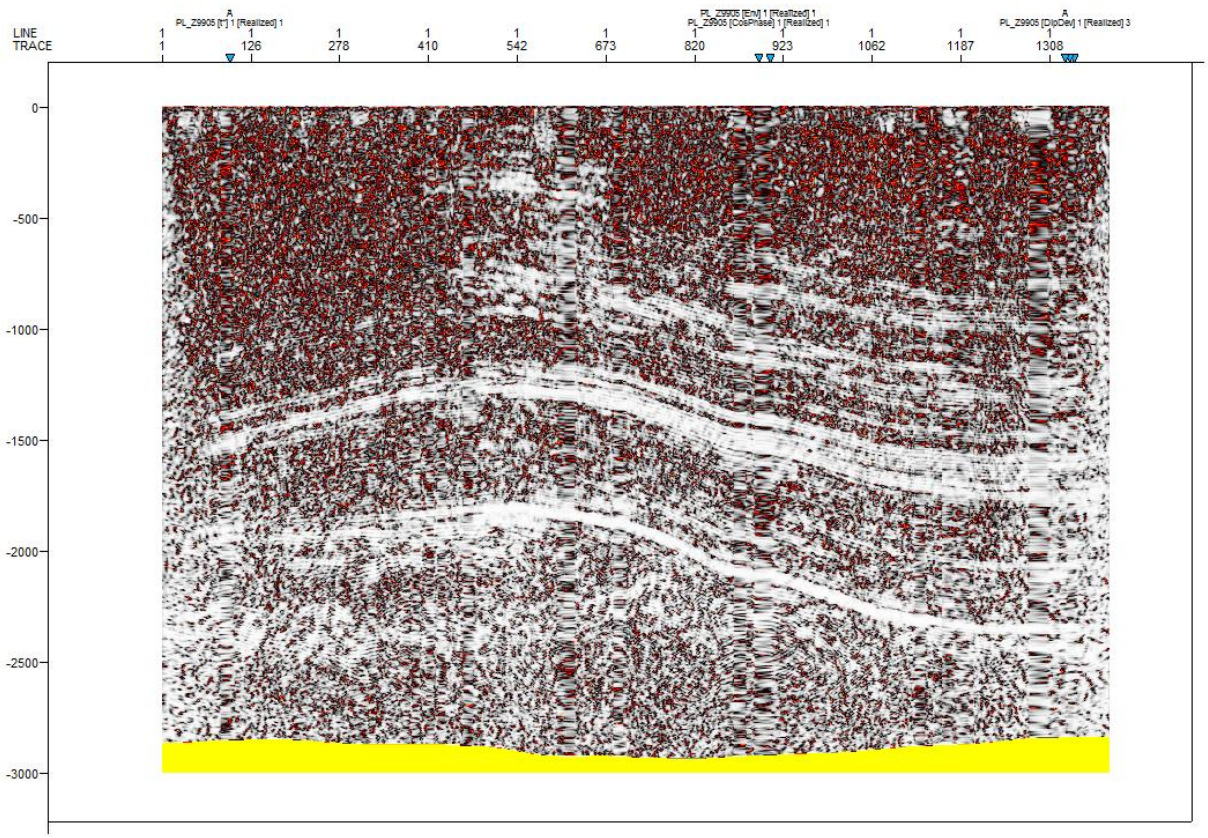


Fig. 1.1.18_276 Atrybut Chaos dla profilu RWE Dea PLZ9905

Jeśli chodzi o strukturę Choszczno-Suliszewo to poniżej przedstawiono czasowy przekrój sejsmiczny W0250386 (**Fig. 1.1.18_277**), przechodzący przez północny skraj kulminacji Choszczna. Profil sejsmiczny został wykonany w roku 1986, przy pomocy znacznie mniej zaawansowanej technologii niż to miało miejsce w przypadku profilu RWE Dea z rejonu Budziszewic, omawianego powyżej.

Wyniki interpretacji sejsmicznej na tym przekroju, jak również na innych przekrojach przechodzących przez strukturę Choszczno-Suliszewo (G. Wróbel; patrz też rozdział **1.1.3**, rejon VII) wskazują na brak walnych uskoków w nadkładzie kolektorów dolnojurajskich (**Fig. 1.1.18_277**).

W przypadku tego przekroju, o raczej słabej jakości, nie jesteśmy do końca pewni, czy faktycznie nie ma tam żadnych uskoków w nadkładzie uszczelniającym, a ponadto parametry akwizycji profilu były ustawione na kompleksy głębsze, perspektywiczne dla węglowodorów (perm).

Z drugiej strony, w rozdziale **1.1.15** IGSMiE PAN analizowało ten sam profil i opracowało dlań sekcję efektywnych współczynników odbicia (**Fig. 1.1.18_278**). Na sekcji zaznaczają się strefy uskokowe w nadkładzie kolektorów dolnojurajskich (górna i środkowa jura, stropowa część dolnej jury), których śladu nie ma na przekroju sejsmicznym (**Fig. 1.1.18_277**), co prawdopodobnie można tłumaczyć słabą jakością obrazu sejsmicznego (która mogła spowodować artefakty na przekroju współczynników odbicia). Stąd

przekrój IGSMiE PAN nie był wykorzystany do opracowania modelu statycznego struktury Choszczno-Suliszewo, a jedynie potraktowany jako opracowanie autorskie (o czy wspomniano w odnośnych miejscach w tekście).

Dla wyjaśnienia sprawy analizowano także atrybuty w programie do modelowania statycznego (w tym przypadku jest to program Schlumberger Petrel), analogiczne jak w przypadku wyżej omawianego profilu z rejonu Budziszewic. Przedstawiono ponownie ten przekrój (**Fig. 1.1.18_279**) dla porównania z dwoma atrybutami sejsmicznymi (**Fig. 1.1.18_280** i **281**), których typ i parametry wybrano pod kątem detekcji stref uskokowych w obrębie nadkładu uszczelniającego dla kolektorów dolnojurajskich. Rezultaty nie są do końca jednoznaczne (zwłaszcza w centralnej i prawej, tzn. SW, części profilu – obraz odwrócony w stosunku do **Fig. 1.1.18_277** i **278**), obraz atrybutów nie pokazuje wyraźnych stref uskokowych, ale też ich obecności nie można całkowicie wykluczyć. Ponadto dla części profilu, gdzie obraz sejsmiczny jest najbardziej niejednoznaczny wykonano złożenie atrybutów (**Fig. 1.1.18_282**, **283**, **284**), które sugeruje występowanie raczej artefaktów związanych z akwizycją i processingiem niż uskoków (ale też nie ma tu całkowitej pewności, co do przyczyn występowania takiego obrazu na sekcjach atrybutów).

Jest to przykład profilu o raczej słabej jakości zapisu sejsmicznego, typowego dla danych sejsmicznych dostępnych na większości struktur solankowych na obszarze Polski (dla których z tego powodu nie zamieszczano analizowanych atrybutów sejsmicznych w podstawowej części niniejszego opracowania).

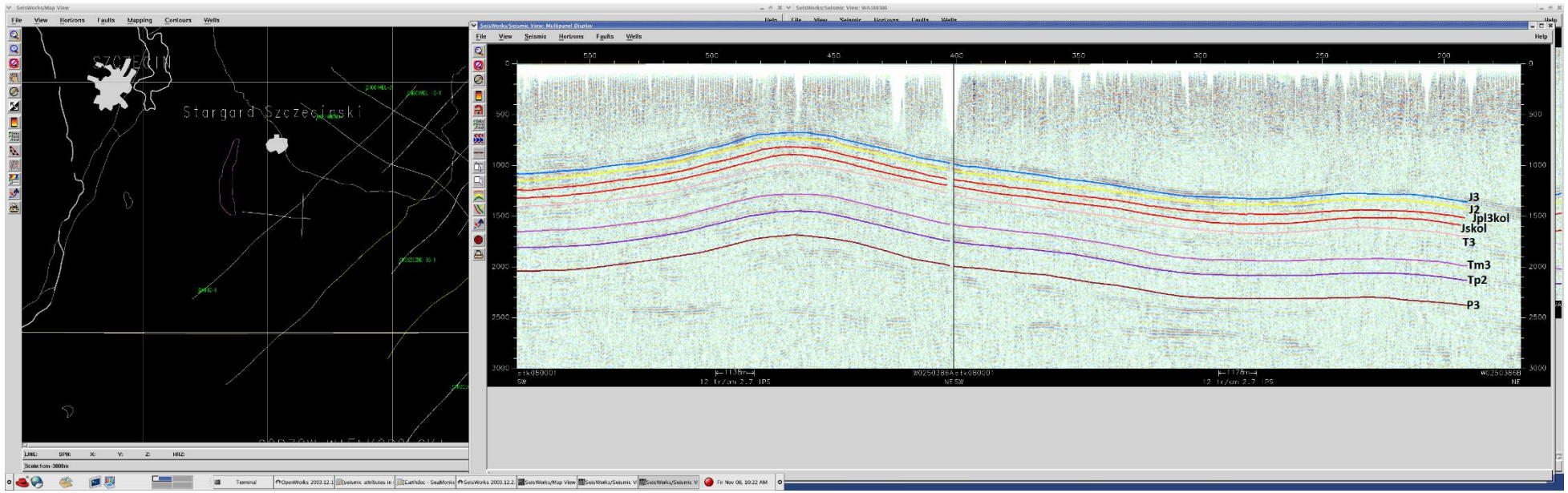


Fig. 1.1.18_277 Interpretacja geologiczna sekcji sejsmicznej dla profilu W0250386 w rejonie Choszczna (NW Polska). Horyzonty: J3 – strop jury górnej; J2 – strop jury środkowej; JPL3-kol – strop górnego pliensbachu – kolektor; JS-kol – strop synemuru i hetangu – kolektor (czerwony); T3 – strop triasu; Tm3 – strop górnego wapienia muszlowego; Tp2 – strop środkowego pstrego piaskowca; P3 – strop utworów permu górnego.

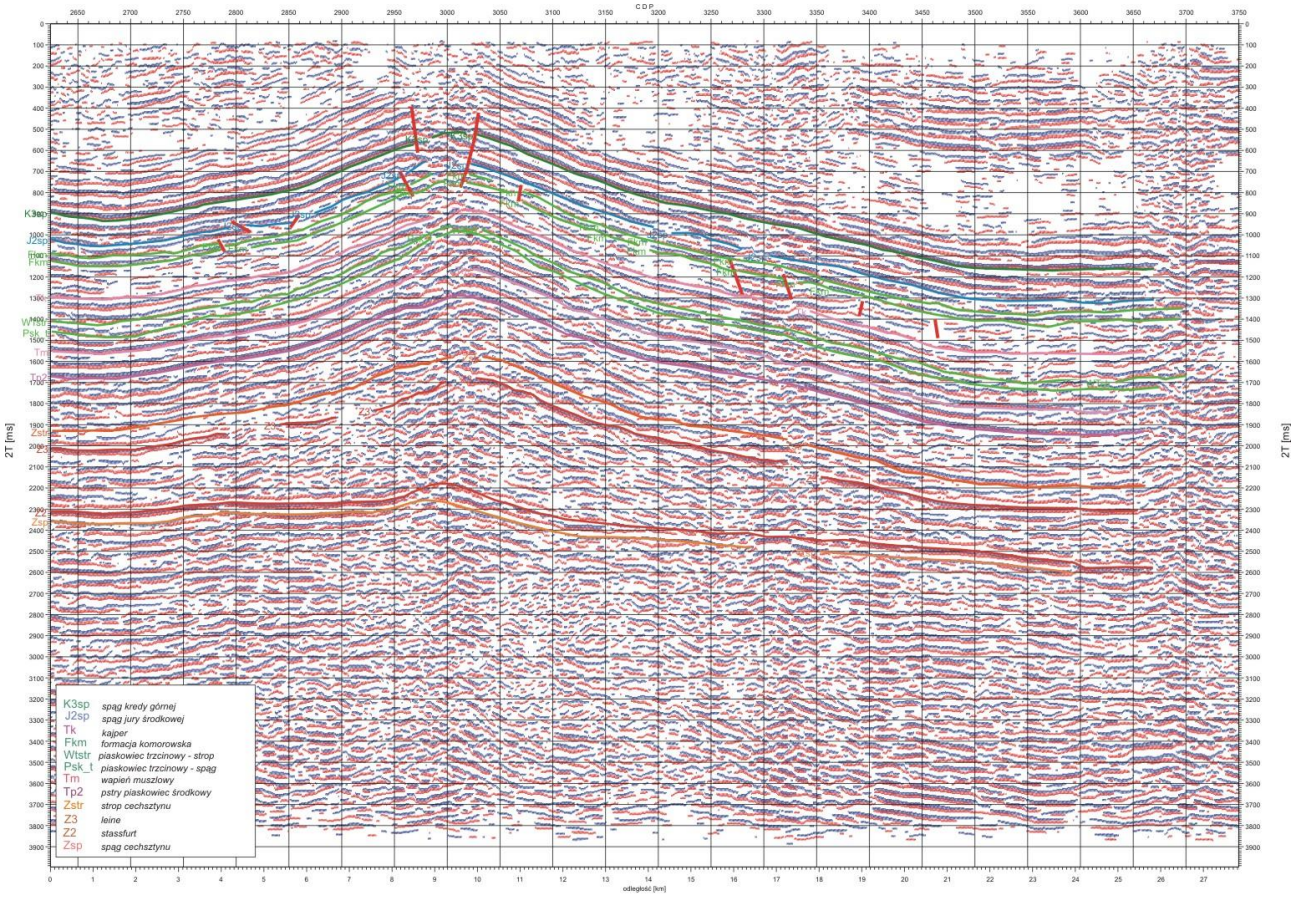


Fig. 23 Czasowy przekrój efektywnych współczynników odbicia - profil W0250386

Fig. 1.1.18_278 Czasowy przekrój efektywnych współczynników odbicia - profil W0250386

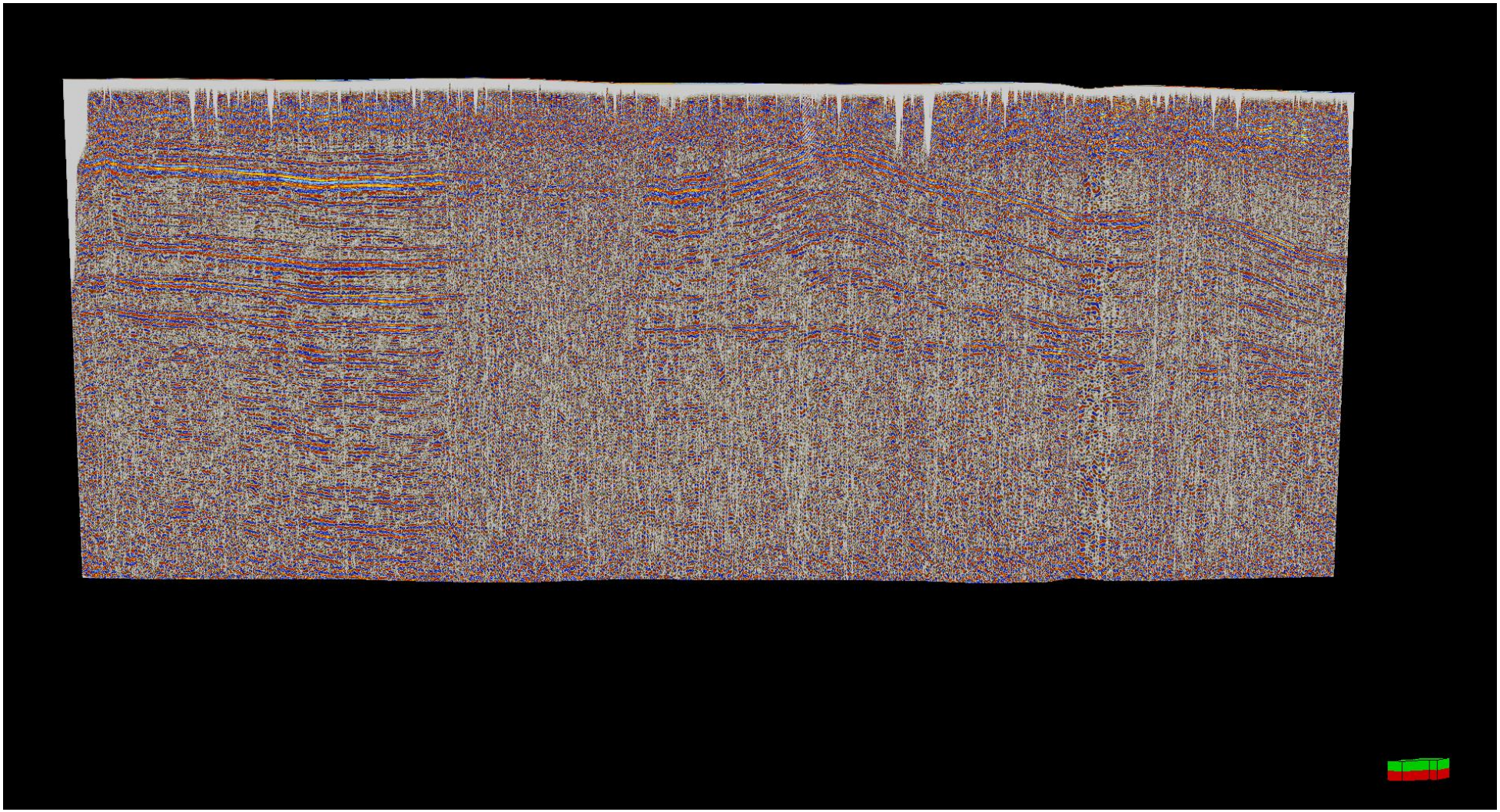


Fig. 1.1.18_279 Sekcja sejsmiczna (czasowa) dla profilu W0250386 (całego – na **Fig. 1.1.18_278** ucięta jest lewa, w tym przypadku NE część profilu)

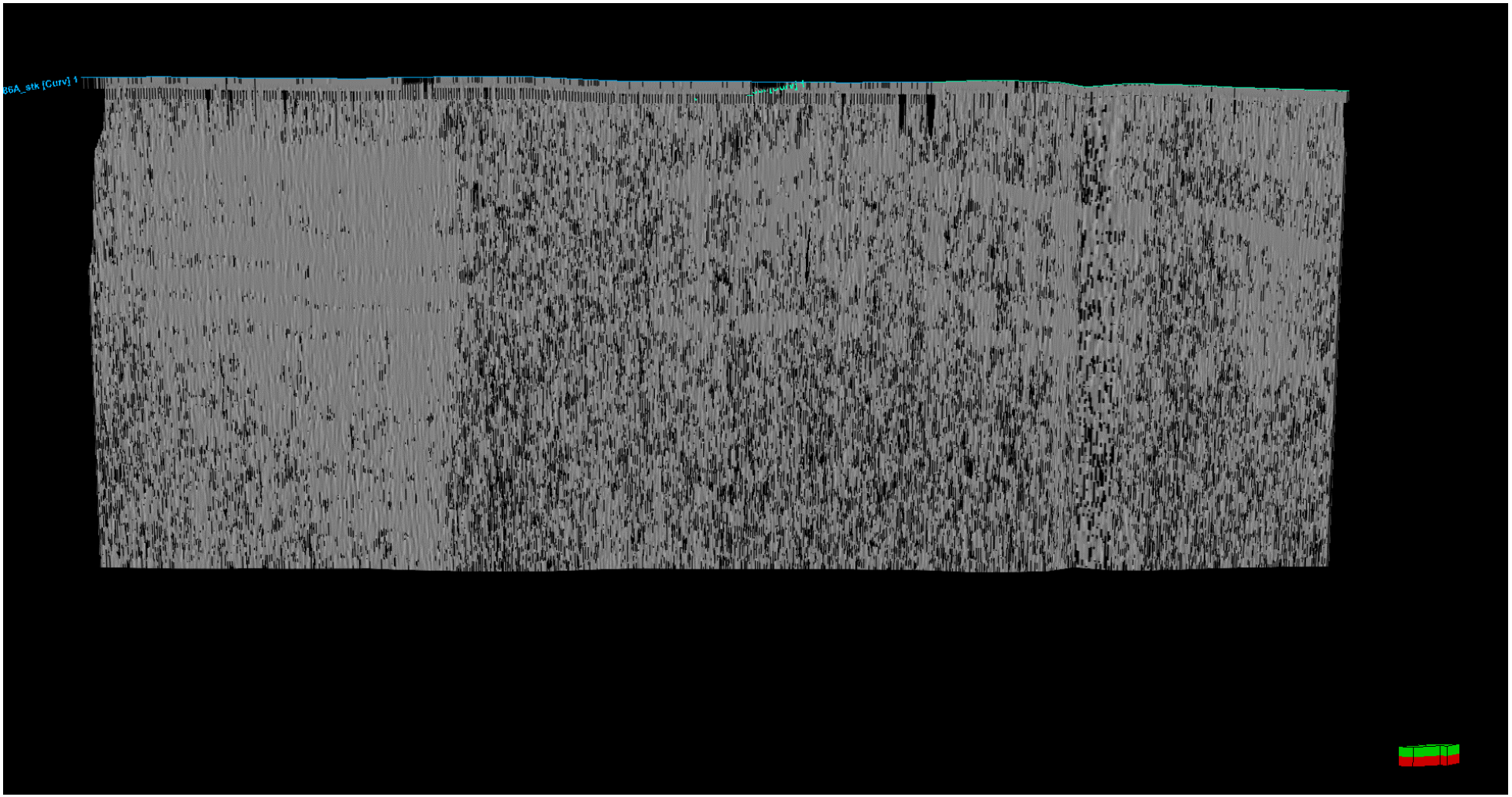


Fig. 1.1.18_280 Atrybut 3D curvature dla profilu W0250386

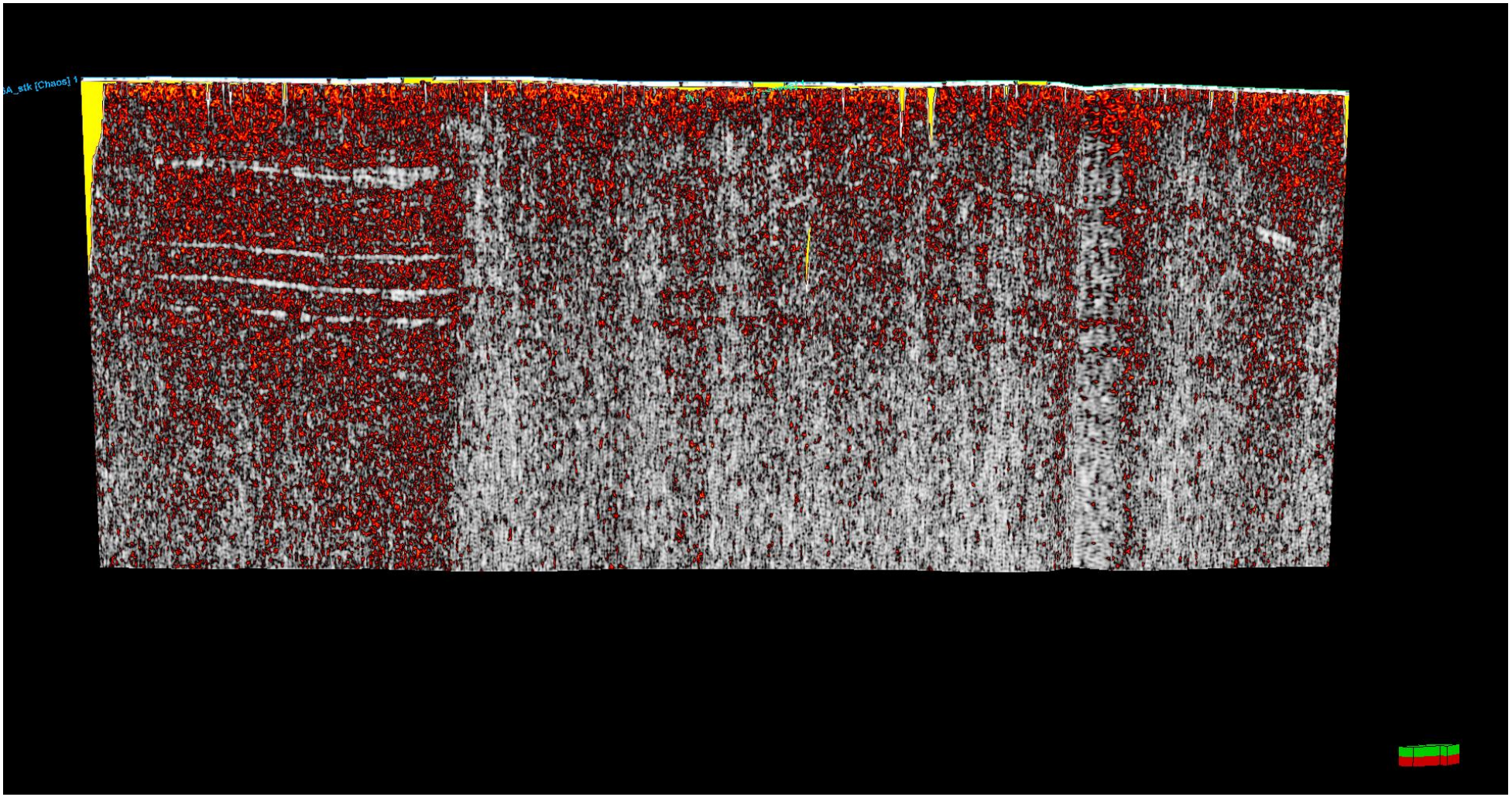


Fig. 1.1.18_281 Atrybut Chaos dla profilu W0250386

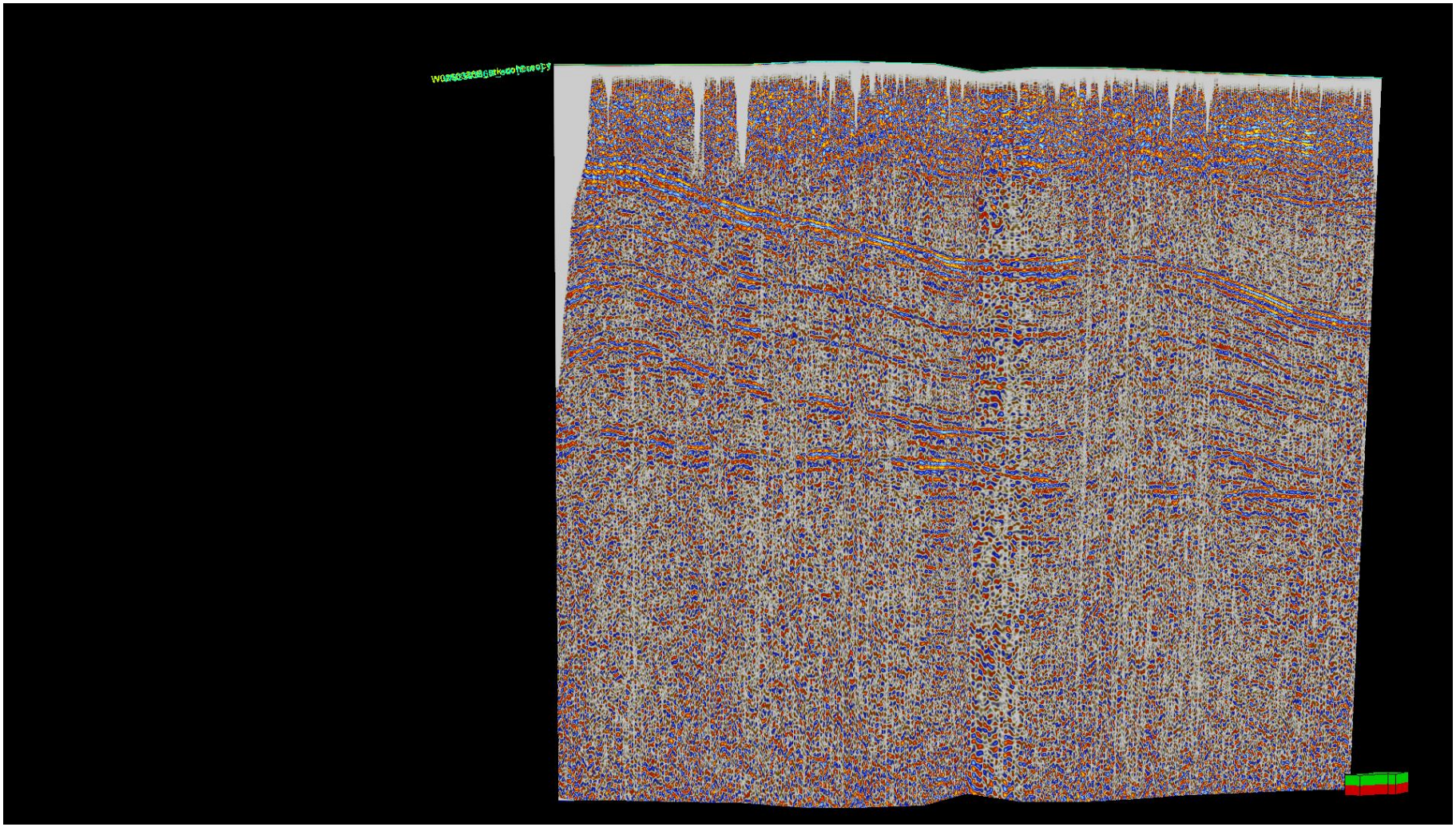


Fig. 1.1.18_282 Sekcja sejsmiczna (czasowa) dla SW fragmentu profilu W0250386 (szczyt struktury po lewej)

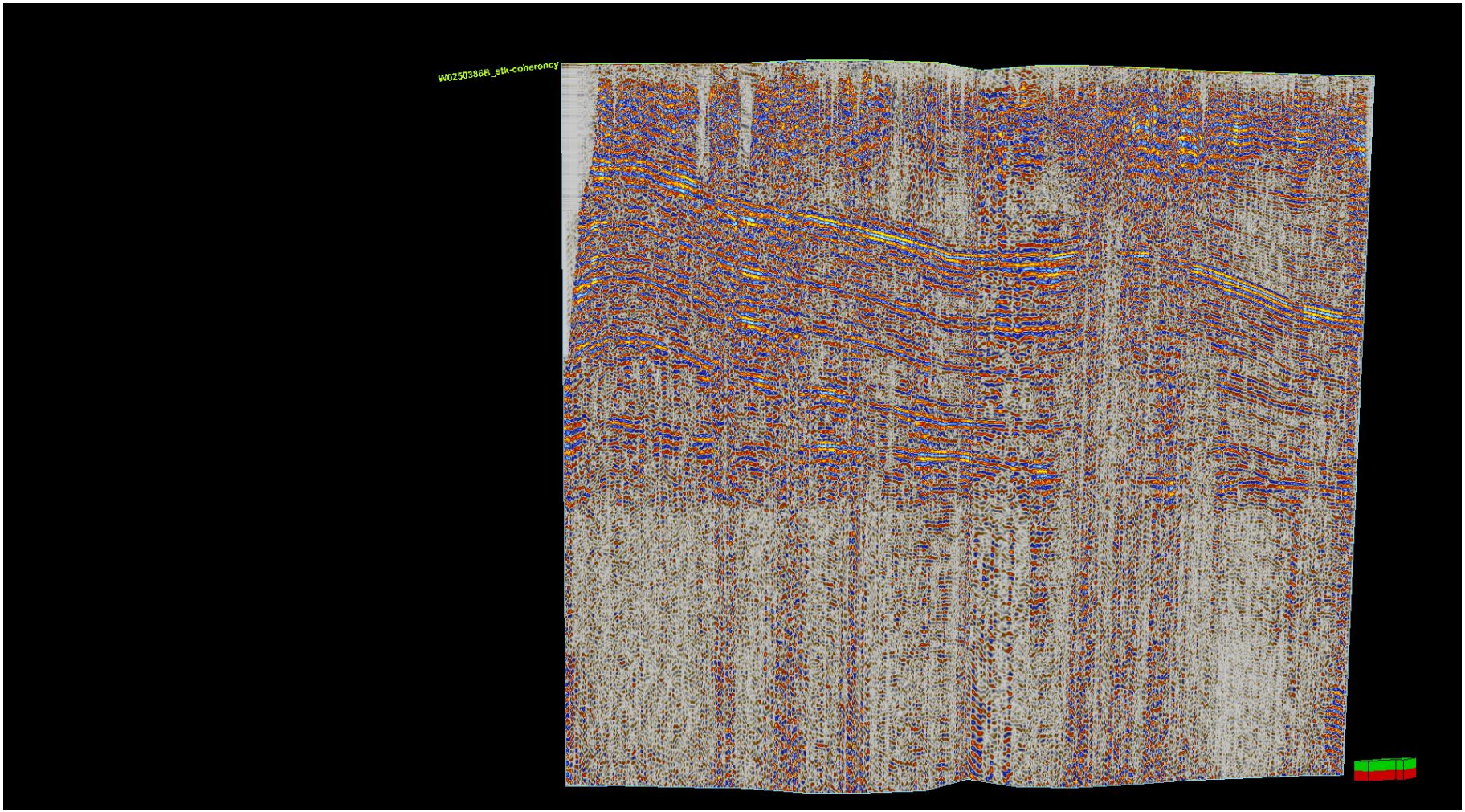


Fig. 1.1.18_283 Atrybut Coherency (Landmark) dla SW fragmentu profilu W0250386

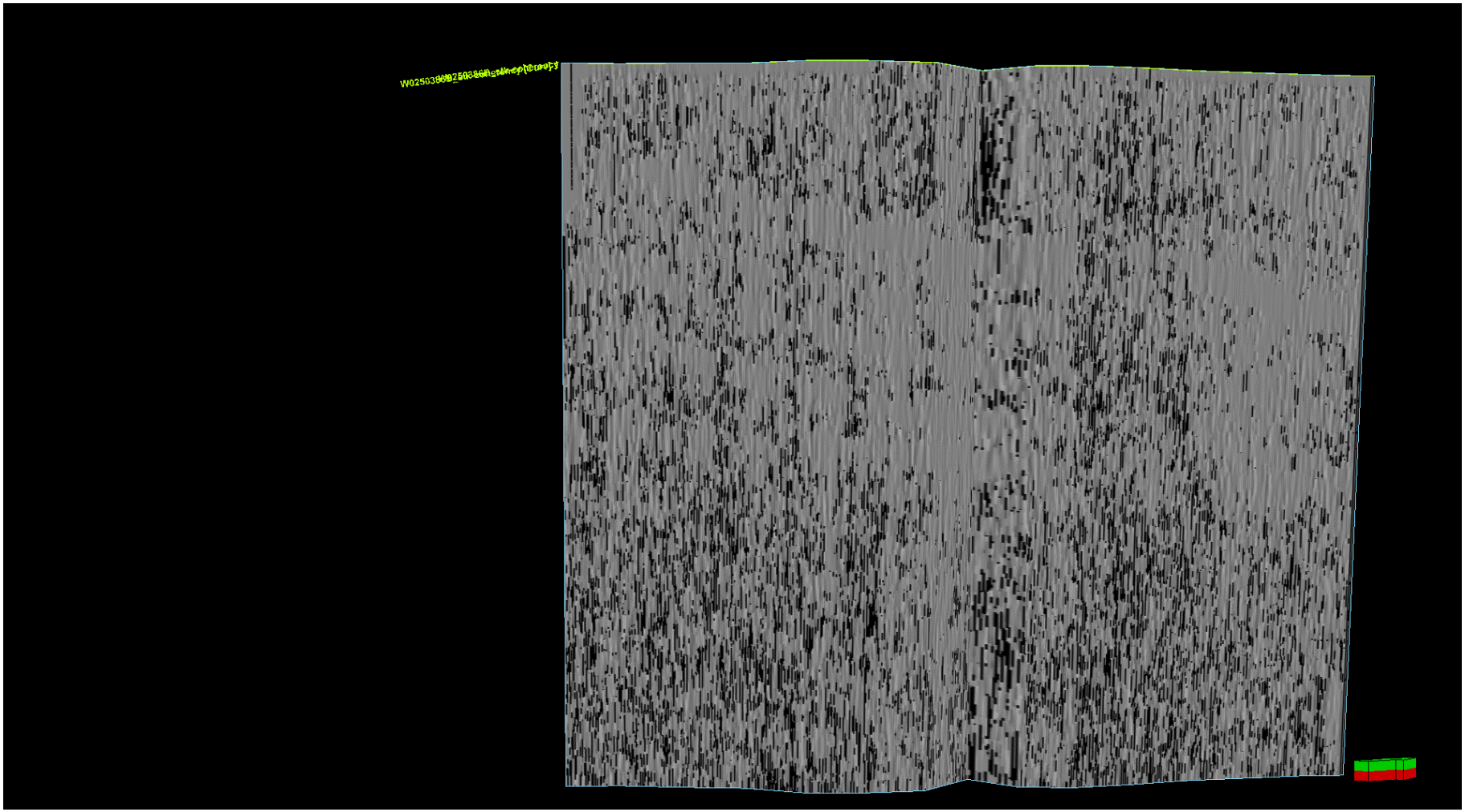


Fig. 1.1.18_283 Złożenie atrybutów - Coherency (Landmark) i Curvature 3D (Petrel) dla SW fragmentu profilu W0250386

Reasumując, w oparciu o podane wyżej dwa przykłady struktur solankowych, oraz inne materiały i wyniki II i I Segmentu, można ustosunkować do następujących kwestii:

1. Czy geologiczne składowanie CO2 jest możliwe i bezpieczne do realizacji na obszarze Polski?

   Nie jesteśmy w stanie jednoznacznie odpowiedzieć na to pytanie na obecnym stanie wiedzy w przypadku struktur solankowych (sprawa sczerpanych złóż węglowodorów nie budzi raczej wątpliwości, zaś pokłady węgla mają znaczenie marginalne) - wskazano i wstępnie scharakteryzowano formacje i struktury gdzie składowanie CO2 byłoby możliwe, pod warunkiem wykonania dalszych badań w ramach koncesji na rozpoznanie składowisk. Ponieważ nie mamy już (bądź jeszcze) w Polsce projektów demonstracyjnych CCS, wyniki prac niniejszego przedsięwzięcia będą przydatne do studiów CCS-ready, jakich wymaga Dyrektywa w sprawie geologicznego składowania dwutlenku węgla (wstępne studia wykonalności dla wychwytu, transportu i składowania CO2 – w ostatnim przypadku podaje się co najmniej dwa równoważne, wstępne scenariusze składowania oraz harmonogram rzeczowo-finansowy prac potrzebnych do dalszego rozpoznania i zagospodarowania potencjalnych składowisk) od firm starających się o pozwolenia na budowę nowych bloków energetycznych.

2. Czy np. dla struktur Budziszewice-Zaosie (B-Z) i Choszczno-Suliszewo (oraz innych struktur solankowych) obecny stan wiedzy pozwala na ich uznania za obiekty odpowiednie do realizacji efektywnego i bezpiecznego składowania CO2 na skalę demonstracyjną i/lub przemysłową?

   Nie jesteśmy w stanie jednoznacznie odpowiedzieć na to pytanie na obecnym stanie wiedzy w przypadku wspomnianych (oraz szeregu innych) struktur solankowych. Inwestycja polegająca na składowaniu CO2 w dużej skali (rzędu milionów ton CO2 rocznie) wymaga uprzedniego, wieloetapowego rozpoznania składowisk. To co wykonano dla obu struktur w ramach I i II Segmentu jest zaledwie wstępem do takiego rozpoznania, prowadzonego w ramach stosownej koncesji i obejmującego wykonanie prac polowych o coraz to większym stopniu szczegółowości i kosztach (jest tu pewna analogia do poszukiwań naftowych, gdzie od stwierdzenia możliwości występowania złoża do jego udokumentowania i zagospodarowania też mamy szereg etapów).

3. Czy stopień rozpoznania obydwu ww. struktur (modele statyczne/geologiczne) był wystarczająco dokładny do prowadzenia wielowariantowych modelowań zatłaczania CO2, jaka była wiarygodność informacji z tychże modelowań oraz jakie dały one wnioski merytoryczne istotne dla zatłaczania CO2?

   Modelowanie zatłaczania CO2 można prowadzić praktycznie dla każdego modelu geologicznego, dla którego są dostępne lub przyjęte informacje o jego budowie strukturalnej i parametrach, z tym że naturalnie stopień ich wiarygodności odpowiada stopniowi wiarygodności tegoż modelu. Samo modelowanie zatłaczania pozwala m.in. na udoskonalenie modelu geologicznego (np. dla struktury B-Z w ramach II Segmentu model uzupełniono o trzy profile RWE Dea, zreprocesowano też dwa stare profile, niewykorzystane wcześniej w modelu regionalnym, co pozwoliło m.in. na kontrolę zamknięcia struktury od SE i "przelewania się" CO2 w tej części struktury). Stopień rozpoznania struktury solankowej nigdy nie będzie wystarczająco dokładny do prowadzenia wiarygodnych, wielowariantowych symulacji zatłaczania przed rozpoczęciem samego zatłaczania, natomiast model

poprawiony o wyniki nowych prac polowych wykonanych dla dokładniejszego rozpoznania struktury będzie bardziej wiarygodny od zaprezentowanych w niniejszym opracowaniu, model poprawiony o wyniki nowych prac szczegółowych wykonanych dla określenia docelowej lokalizacji zatłaczania CO2 będzie jeszcze bardziej wiarygodny, jeszcze bardziej będzie wiarygodny model uwzględniający wyniki ewentualnego testowego/doświadczalnego zatłaczania (na małą skalę - do 100 kt/otwór), a najbardziej wiarygodne modelowania procesów zatłaczania CO2 mogą być prowadzone w oparciu o wyniki monitoringu zatłaczania dwutlenku węgla do składowiska. Istotne wnioski merytoryczne z modelowań to fakt że zarówno pojemność jak i bezpieczeństwo składowania CO2 w danej strukturze zależy znacząco od konfiguracji otworów zatłaczających (w tym usytuowania na strukturze i odległości pomiędzy iniektorami) i ilości CO2 jakie przyjmuje dany otwór globalnie i na jednostkę czasu (od tego zależy pole ciśnień w kolektorze i nadkładzie uszczelniającym, rozkład plamy CO2 w przestrzeni i czasie - w trakcie i po zakończeniu zatłaczania, od czego z kolei zależy intensywność innych mechanizmów wiązania CO2 - głównie rozpuszczania w solance oraz, w mniejszym stopniu, wiązania fizycznego i chemicznego z ziarnami skały).

4. Jakie jest merytoryczne uzasadnienie wykonywania tak licznych modelowań dla obu ww. struktur solankowych?

   Jeśli chodzi o merytoryczne uzasadnienie poszczególnych wariantów zatłaczania do wspomnianych struktur solankowych to zawierało się ono w przyjęciu rozmaitych scenariuszy zatłaczania, różniących się stopniem szczegółowości/obszarem modelu (a także metodyką jego konstrukcji), lokalizacją otworów iniekcyjnych, kolektorem, do którego zatłaczano CO2, ilością zatłaczanego CO2, czasem zatłaczania, okresem symulacji zachowania się CO2 po zakończeniu zatłaczania (a poza tym prowadzono modelowania reaktywności CO2-solanka-skała). Celem tych działań było "rozpoznanie bojem" możliwego zachowania się CO2 w obrębie rozpatrywanych formacji i struktur, w oparciu o dostępne dane. Karta informacyjna pracy geologicznej, określająca zakres przedsięwzięcia, faktycznie obejmuje liczne, wielowariantowe modelowania procesów zatłaczania CO2 do typowanych. formacji i struktur, co wynikało z faktu że był to pierwszy przypadek w naszym kraju, gdzie przeanalizowano z punktu widzenia wymogów (Aneksu nr 1) Dyrektywy w sprawie geologicznego składowania dwutlenku węgla szereg struktur – potencjalnych składowisk CO2. Jako pierwsza charakteryzowana była struktura B-Z i stąd dla niej i jej otoczenia wykonano najwięcej tego typu analiz.