

Spis treści

Spis treści.....	1
1.1.16 MODELOWANIA DYNAMICZNE PROCESÓW ZATŁACZANIA CO ₂ DO SKŁADOWISKA	4
Obiekt solankowy w rejonie Bełchatowa	4
Modelowania dynamiczne dla formacji jury dolnej (AGH; symulator GEM)	10
Modelowania dynamiczne dla formacji jury dolnej (GIG; PetraSim/TOUGH2)	22
Modelowania numeryczne i symulacje komputerowe	24
Modelowania dynamiczne dla formacji triasu dolnego (INiG; Petrel/Eclipse)	38
Symulacje procesu sekwestracji - wariant testowy	42
Wariant docelowy - odwierty B1, B2, B3, B4	48
Podsumowanie.....	56
Obiekt solankowy w rejonie GZW	58
Modelowania dynamiczne dla utworów miocenu dla rejonu Cieszyn-Skoczów-Czechowice (GIG; <i>PetraSim/TOUGH2</i> oraz PIG PIB).....	58
Parametry fizyczne modelu.....	61
Wyniki symulacji komputerowych	65
Podsumowanie.....	90
Modelowania dynamiczne dla rejonu Bielska Białej (AGH; <i>symulator GEM</i>)	91
Model złożowy statyczny dla rejonu Bielska	92
Własności PVT dla zatłaczanego CO ₂	97
Opis modelu zatłaczania.....	100
Wnioski.....	110
Trzeci obiekt solankowy	111
Modelowania dynamiczne dla formacji jury dolnej struktur Choszczna i Suliszewa (AGH; symulator GEM)	115
Model statyczny	115
Model dynamiczny	120
Warianty zatłaczania	122

Modelowania dynamiczne dla formacji jury dolnej struktury Pławno-Radęcin (AGH; symulator GEM)	135
Model statyczny	135
Model dynamiczny	139
Warianty zatłaczania	141
Modelowanie dynamiczne procesów zatłaczania CO ₂ do składowiska struktury Niecki Poznańskiej (INiG; Petrel/Eclipse)	150
Budowa modelu symulacyjnego utworów czerwonego spągowca w omawianym rejonie Niecki Poznańskiej.....	151
Weryfikacja modelu symulacyjnego struktury.....	158
Symulacje procesów sekwestracji CO ₂	195
Podsumowanie i wnioski.....	237
Modelowania dynamiczne procesów zatłaczania CO ₂ do poziomów solankowych w rejonie Choszczno-Suliszewo (GIG; Petrel/Eclipse)	238
Model statyczny	238
Model dynamiczny	242
Warianty zatłaczania	242
Wyniki symulacji numerycznych	245
Podsumowanie.....	265
Struktury naftowe.....	266
Modelowanie dynamiczne procesów zatłaczania CO ₂ do składowiska (złóże gazu Wilków) (AGH) ...	269
Ogólna charakterystyka złoża gazu ziemnego Wilków.....	269
Model numeryczny.....	270
Symulacja zatłaczania CO ₂	275
Wyniki symulacji.....	276
Modelowanie dynamiczne procesów zatłaczania CO ₂ do składowiska - Złóże ropy naftowej Nosówka (INiG)	285
Implementacja statycznego modelu geologicznego i konstrukcja złożowego modelu symulacyjnego	286
Założenia dla procesów sekwestracji i eksploatacji	308
Symulacje procesów wydobycia i sekwestracji CO ₂	310

Podsumowanie i wnioski.....	357
Obiekt w pokładach węgla	359
Modelowanie dynamiczne w pokładach węgla GZW w rejonie Pawłowice-Mizerów (GIG we współpracy z PIG-PIB).....	361
Budowa modeli numerycznych w pokładach węgla	364
Wyniki symulacji.....	369
Podsumowanie.....	383
Budowa modelu statycznego do alternatywnych wariantów zatłaczania CO2 do pokładów węgla dla wspomagania wydobycia metanu dla wytypowanej lokalizacji obejmującej dwa pokłady 405 i 510	384
Budowa modelu statycznego	384
Wykonanie alternatywnych wariantów modelowań dynamicznych zatłaczania CO2 do pokładów węgla dla wspomaganego wydobycia metanu, w wytypowanych lokalizacji w centralnej części GZW uwzględniając otwory poziome.....	402
Modelowanie dynamiczne	402
Warianty zatłaczania	408
Podsumowanie.....	426

1.1.16 MODELOWANIA DYNAMICZNE PROCESÓW ZATŁACZANIA CO₂ DO SKŁADOWISKA

Obiekt solankowy w rejonie Bełchatowa

(Adam Wójcicki, Grzegorz Wróbel, Sylwia Kijewska)

Prace rozpoczęto od przygotowania założeń dla 4 wariantów komputerowych modeli dynamicznych procesów zatłaczania dwutlenku węgla do składowiska z wykorzystaniem materiałów i modeli statycznych opracowanych w ramach zadań 1.1.14 i 1.1.15. Przyjęto po dwa warianty dla piaskowców jury dolnej i dwa warianty dla piaskowców triasu dolnego.

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

Drugi wariant dotyczył zatłaczania docelowego (demonstracyjnego). Według wstępnych analiz AGH wykonanych w ramach zadania 1.1.34 I Segmentu dla rejonu Bełchatowa (Wójcicki (red.), 2009) do zatłoczenia 2 milionów ton do struktury o takiej wielkości jak obiekt Budziszewice-Zaosie potrzeba do 4 otworów, rozmieszczonych w odległości kilku kilometrów (jeden od drugiego) wokół szczytowej partii struktury. Jeśli własności zbiornikowe kolektora są bardzo dobre to ilość otworów może być zmniejszona, ale w naszym przypadku, gdy w jurze dolnej preferowany jest bardziej poziomy zbiornikowy synemuru (hettangu) niż poziomy górnego pliensbachu (w szczytowej partii struktury występuje zbyt płytko, sięgając głębokości granicznej dla obszaru nadkrytycznego) to bezpieczniej jest przyjąć maksymalną ilość otworów odpowiednią dla przeciętnych (jura dolna) i słabych (trias dolny) własności zbiornikowych. Według najbardziej aktualnych informacji PGE EBSA (informacja ustna) docelowe zatłaczanie będzie obejmowało **1.8 mln ton CO₂** rocznie, co daje **0.45 mln ton** na otwór. Przy założeniu, że czas funkcjonowania instalacji demonstracyjnej CCS PGE EBSA w pełnej skali wyniesie 25 lat, daje to sumaryczną ilość dwutlenku węgla wynoszącą **45 mln ton**. Modelowania dynamiczne (symulacje zatłaczania CO₂ do potencjalnego składowiska) prowadzono dla okresu ponad 200 lat po zakończeniu zatłaczania.

Zarówno dla jury dolnej jak i triasu dolnego przyjęto analogiczną efektywność zatłaczania -po **0.45 mln ton** na otwór, w czterech otworach przez okres 25 lat. W obu przypadkach przyjęto najważniejszy parametr geomechaniczny decydujący o bezpieczeństwie składowania - ciśnienie progowe/kapilarne (ciśnienie krytyczne wywołane przez dwutlenek węgla znajdujący się w kolektorze, przy którym nadkrytyczny CO₂ "przebija się" przez kapilary nadległego uszczelnienia -tzw. *capillary entry pressure*) wynoszące około 2 MPa. Ciśnienie to jest funkcją ilorazu porowatości efektywnej i przepuszczalności - wymaga to względnej ciągłości nieprzepuszczalnych ($K < 0.0001$ mD) formacji w nadkładzie rozpatrywanego kolektora. Wartość określono na podstawie wyników badań petrofizycznych na próbkach skał i danych literaturowych.

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

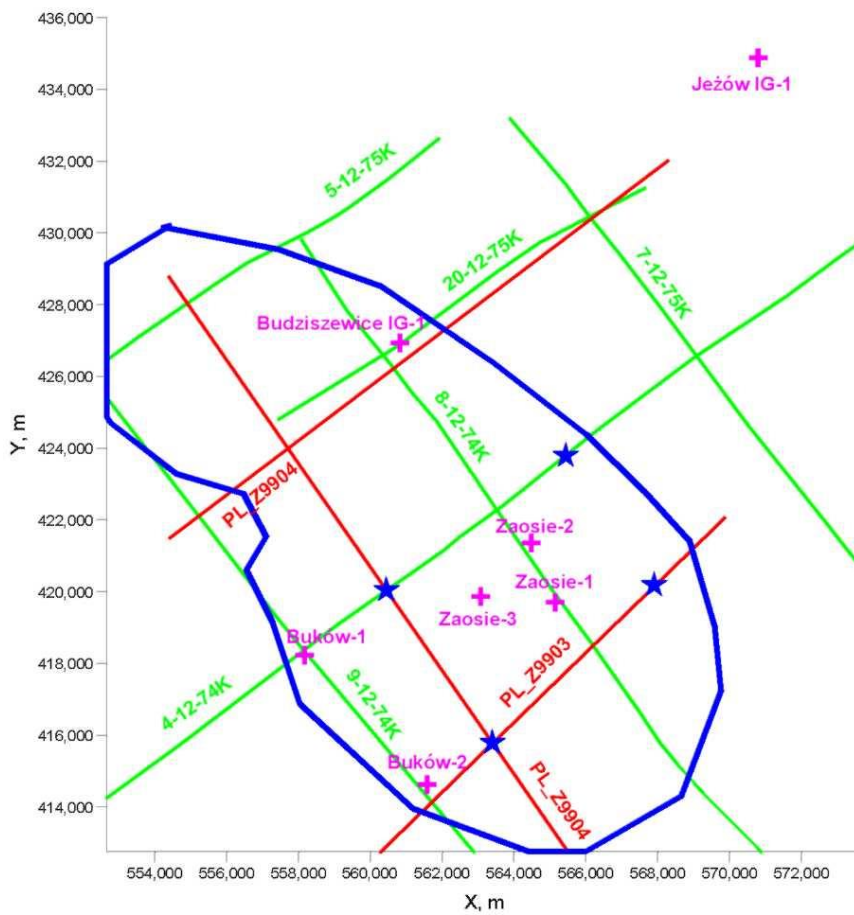


Fig.1.1.16_1 Lokalizacja symulacyjnych otworów zatłaczających (gwiazdki) dla struktury Budziszewice-Zaosie na tle profili sejsmicznych (starych i "nowych") i istniejących otworów

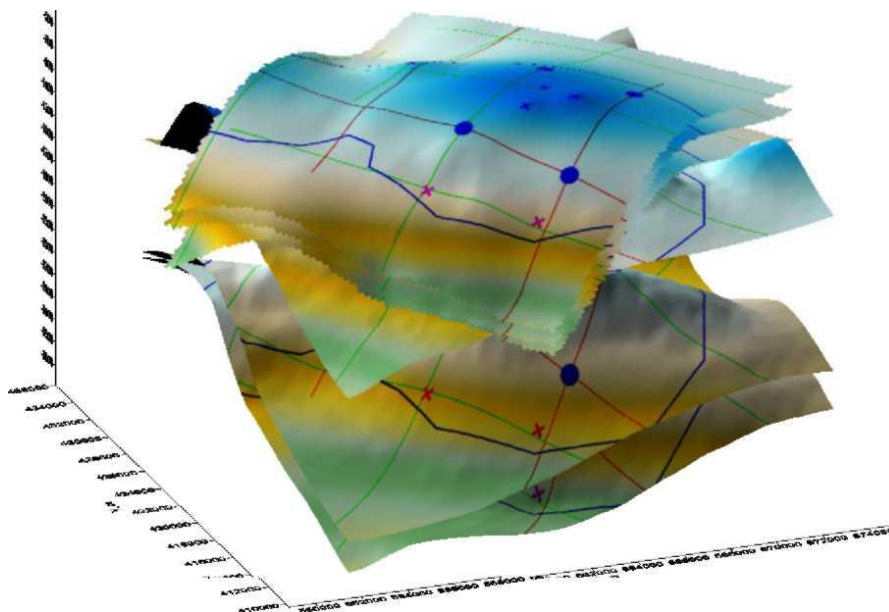
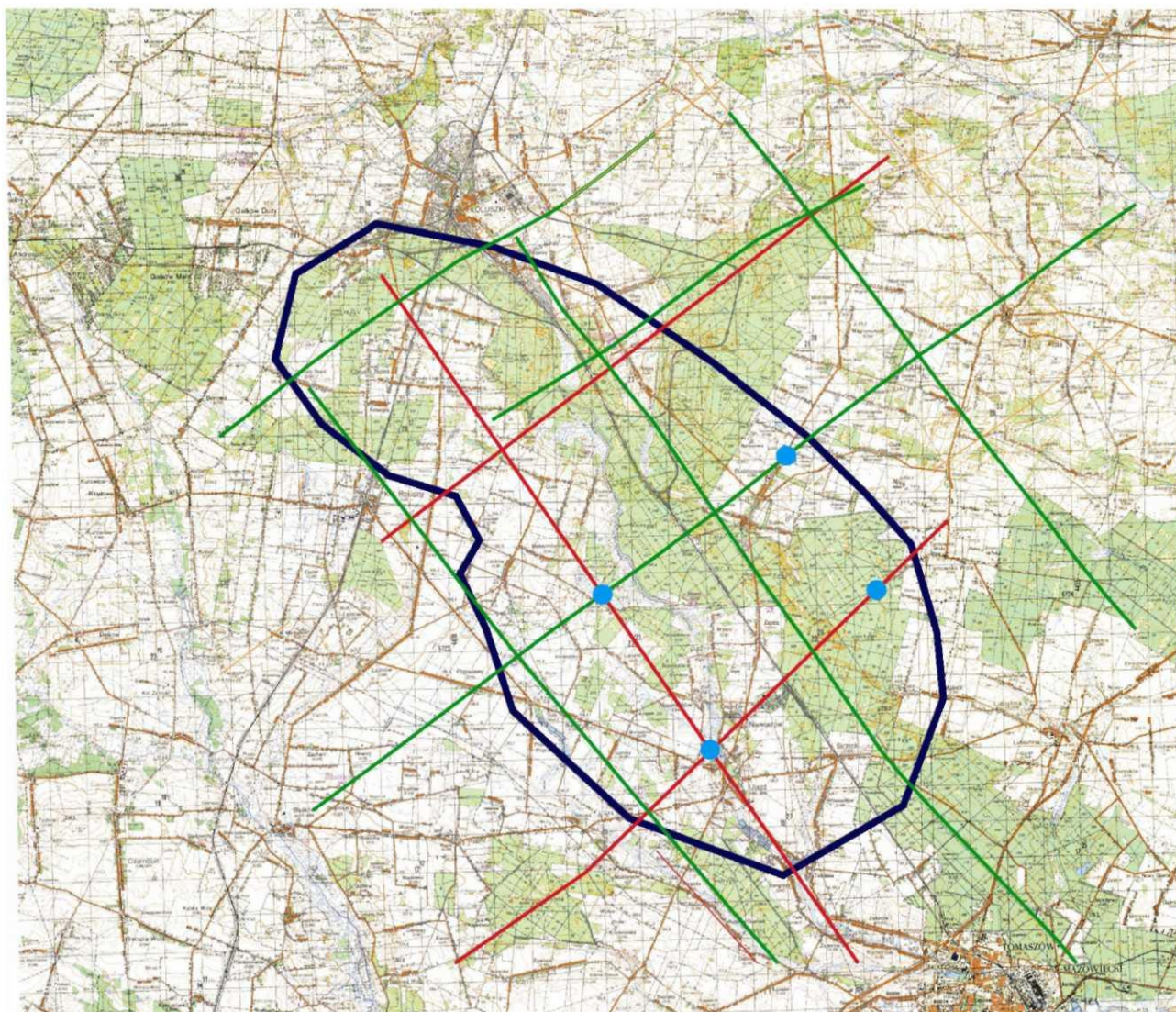


Fig.1.1.16_2 Przestrzenny model strukturalny Budziszewice-Zaosie (część centralna)

Jeśli chodzi o symulacje dla utworów jury w rejonie struktury Budziszewice-Zaosie to jak wspomniano wyżej realizowały je zespoły AGH i GIG. AGH wykonał symulacje zatłaczania dla jednego otworu poziomego, dwóch pionowych w pobliżu szczytu struktury i trzech pionowych z wykorzystaniem lokalizacji na **Fig. 1.1.16_1**. Natomiast GIG wykonał wariant pilotażowy dla jednego otworu spośród czterech zaznaczonych na **Fig. 1.1.16_1** oraz wariant pełnoskalowy dla czterech otworów przedstawionych na wspomnianych rysunku. Warianty – AGH dla trzech otworów pionowych i GIG dla czterech są więc najbardziej porównywalne. Według tabel (**1.1.16_1**) i wykresów (**1.1.16_6-8, 29**) dla obu symulacji dla 3 (AGH) lub 4 otworów pionowych (GIG) ciśnienia szybko się stabilizują, choć może nie zbliżają się tak szybko do ciśnienia pierwotnego jak w przypadku modelu regionalnego z rozdziału 1.1.9.

Lokalizację symulacyjnych otworów zatłaczających (**Fig.1.1.16_1 - 1.1.16_3**) wybrano na podstawie charakterystyki modelu strukturalnego opracowanego w poprzednim rozdziale. Otwory te zlokalizowano na skłonach struktury (patrz **Fig.1.1.16_2**), zgodnie z wytycznymi podręcznika najlepszych praktyk (Chadwick et al., 2008). Przy wyborze lokalizacji symulacyjnych otworów zatłaczających uwzględniono przebieg profili sejsmicznych, w tym w dwóch przypadkach ich punkty przecięcia (**Fig. 1.1.16_1**). Ponadto brano pod uwagę zagospodarowanie terenu i dostępność potencjalnych miejsc zatłaczania dwutlenku węgla (unikając m.in. obszarów zabudowanych - **Fig.1.1.16_3**). Dla wariantu testowego zatłaczania wybrano prowizorycznie symulacyjny odwiert położony w SW części rozpatrywanego obszaru, na przecięciu dwóch "nowych" profili sejsmicznych, w rejonie miejscowości Ujazd (**Fig. 1.1.16_3**).

Na potrzeby konstrukcji szczegółowego modelu dynamicznego (symulacji zatłaczania dwutlenku węgla) konieczne było uszczegółowienie kompleksu dolnej jury (**Fig. 1.1.16_2**) w oparciu o wynik interpretacji geologicznej profili sejsmicznych. W zadaniu **1.1.15** nie było jeszcze możliwa wykorzystanie najnowszych profili sejsmicznych z tego rejonu. Profile te zostały wykonane w latach 1999-2000 (akwizycja i processing) przez "Geofizykę" Toruń sp. z o.o. dla firmy RWE Dea Polska sp. z o.o., w ramach tematu "Polska centralna" (koncesja na poszukiwanie węglowodorów) Wykorzystano trzy profile przecinające strukturę, udostępnione przez RWE Dea na potrzeby niniejszego tematu: PL_Z9903, PL_Z9904 i PL_Z9905 (**Fig. 1.1.16_4**). w oparciu o wynik interpretacji geologicznej dla tych trzech "nowych" i sześciu starych (scharakteryzowanych w raporcie z I segmentu: Wójcicki (red), 2009) profili sejsmicznych skonstruowano mapy czasowe strukturalne horyzontów odpowiadających stropowi horyzontu uszczelniającego dolnego toarku stropowi kolektora górnego pliensbachu i stropowi kolektora synemuru (patrz **Fig.1.1.16_2**) a także dwóch horyzontów triasowych: wewnątrzkałprowego (spąg piaskowca trzcinowego) i wapienia muszlowego. Model prędkości oparto na danych prędkości średnich z 6 otworów z rejonu Budziszewice-Zaosie. Obraz sejsmiczny kompleksu dolnojurajskiego na sekcjach sejsmicznych dla "nowych" profili jest nieco lepszy niż w przypadku starych (rozdział 1.1.3 raportu z I segmentu) ale różnica ta nie jest drastyczna co wynika z faktu że celem badań RWE Dea był cechsztyn a nie jura. Jak widać na profilu PLZ9903 (**Fig.1.1.16_4**), walna strefa uskokowa w rejonie otworu Buków-2 (**Fig.1.1.16_2**) występuje w utworach triasu i nie ma kontynuacji w jurze dolnej.







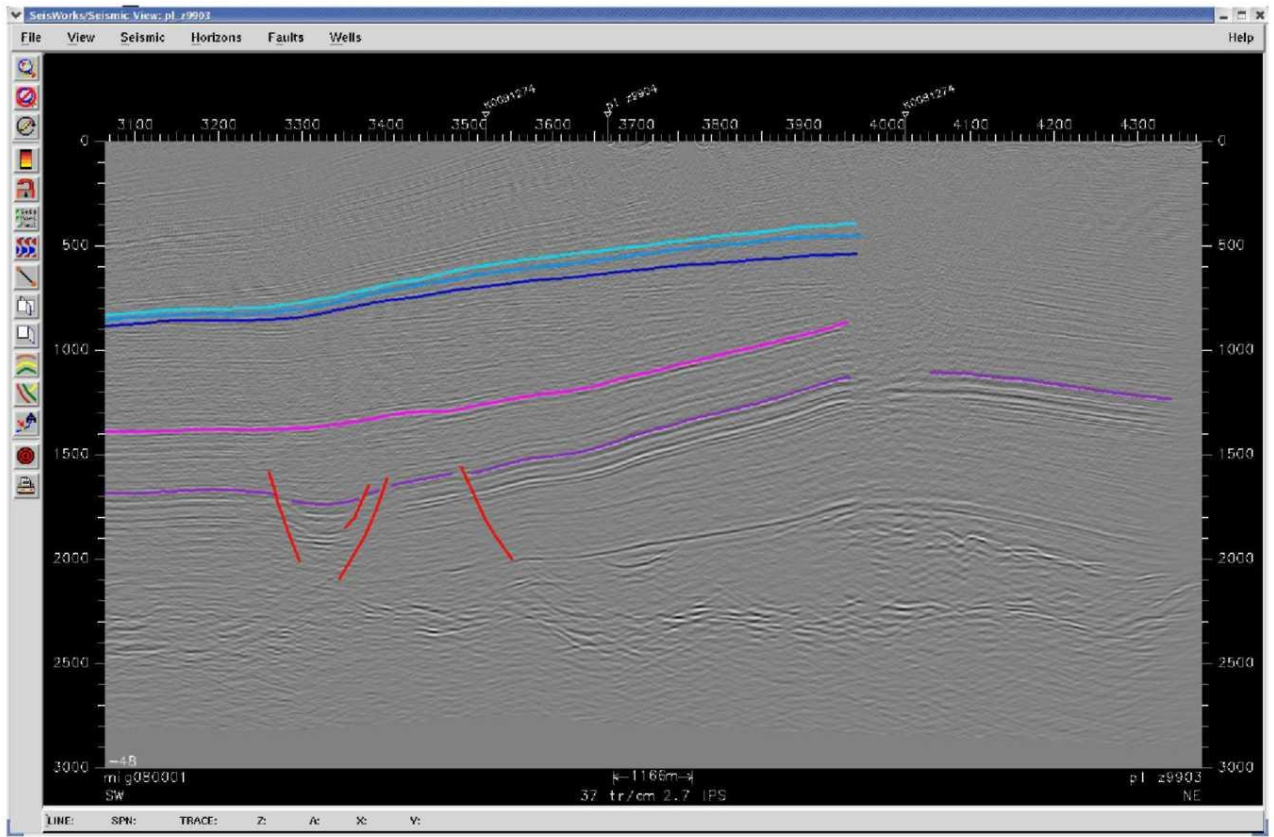
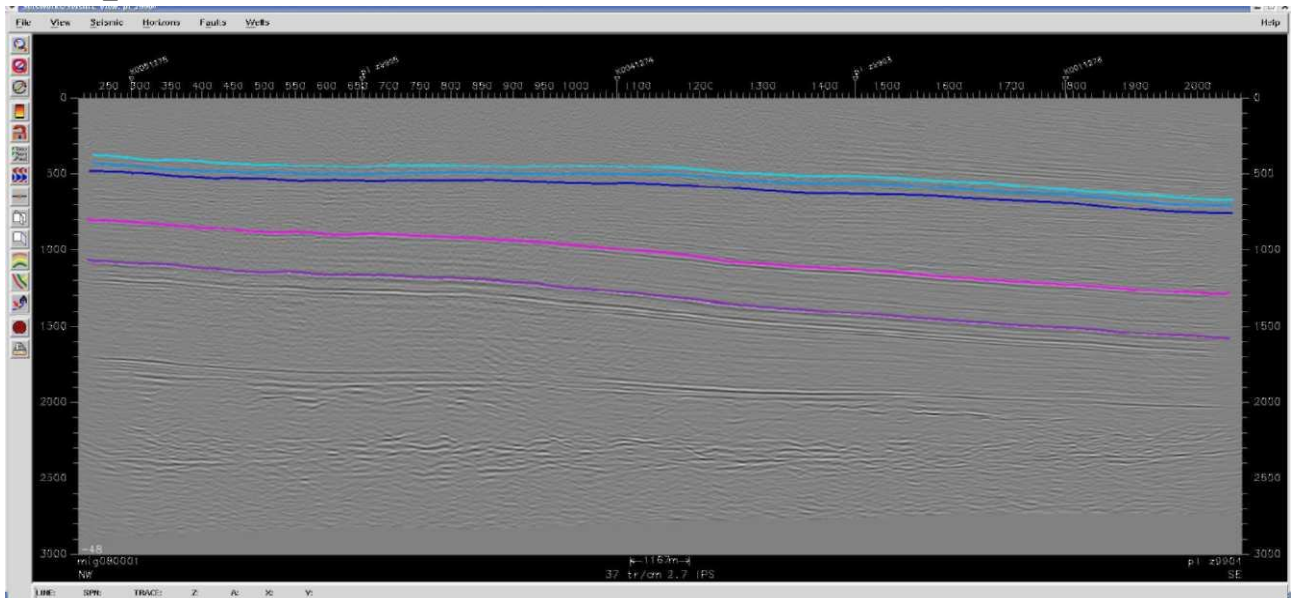
LEGENDA  zarys struktury (w dolnej jurze)  otwory do zatlaczania (dla modelowań)
  profile sejsmiczne z lat 1970-tych (wybrane)  nowe profile sejsmiczne (RWE DEA)

Fig. 1.1.16_3 Lokalizacja symulacyjnych otworów zatlaczających (gwiazdki) dla struktury Budziszewice-Zaoscie

Profil PL_Z9903



Profil PL_Z9904



Profil PL_Z9905

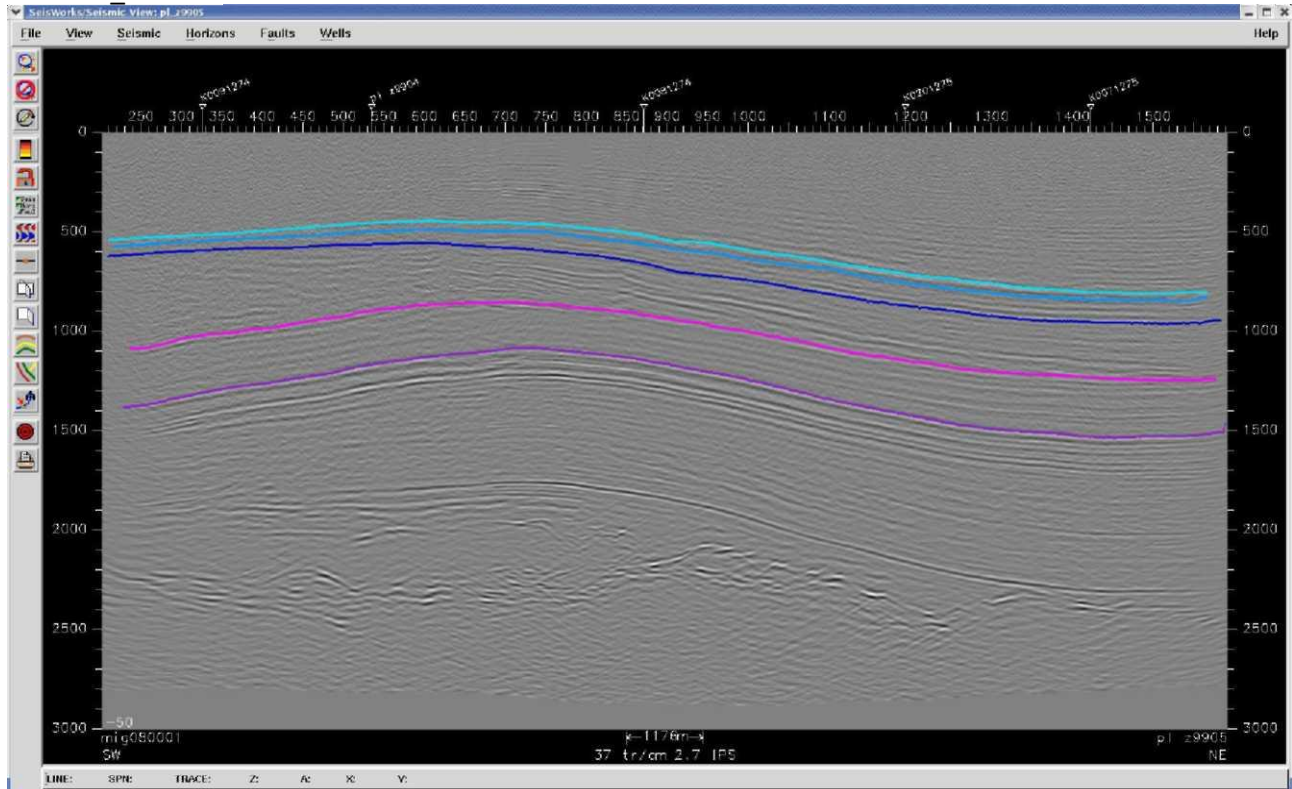


Fig.1.1.16_4 Interpretacja geologiczna sekcji sejsmicznych dla profili RWE Dea: PLZ9903, PLZ9904 i PLZ9905.

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 (wewnątrz kajprowy i wapienia muszlowego)

Modelowania dynamiczne dla formacji jury dolnej (AGH; symulator GEM)

(Jakub Siemek, Stanisław Nagy, Łukasz Klimkowski, Rafał Sedlaczek, Rafał Smulski)

AGH wykonało modelowania dynamiczne dodatkowo dla różnych wariantów technologicznych (czy zatłaczanie pionowe czy poziome).

Pierwszy wariant (**Fig.1.1.16_1-11**) obejmował trzy otwory pionowe (a nie cztery jak u pozostałych wykonawców). W tabeli **1.1.16_1** podano założenia dla tego modelu.

Tabela 1.1.16_1 Zestawienie podstawowych parametrów zatłaczania dla poszczególnych odwiertów

Data	Wydajność zatłaczania [t/d]	Całkowita masa CO2 [10 ⁶ t]	Ciśnienie denne [MPa]
ZI-1I			
2011-12-01	0	0	9.892
2017-01-01	1290	2.256	11.35
2022-01-01	1293	4.623	11.2
2032-01-01	1310	9.383	11.27
2042-01-01	1304	14_160	11.32
2092-01-01	0	14_160	10.15
2142-01-01	0	14_160	10.01
2292-01-01	0	14_160	9.923
2442-01-01	0	14_160	9.907
2742-01-01	0	14_160	9.903
3010-01-01	0	14_160	9.903
ZI-2I			
2011-12-01	0	0	9.574
2017-01-01	1616	2.685	11.28
2022-01-01	1674	5.693	11.12
2032-01-01	1708	11.880	11.12

2042-01-01	1722	18_150	11.14
2092-01-01	0	18_150	9.82
2142-01-01	0	18_150	9.687
2292-01-01	0	18_150	9.604
2442-01-01	0	18_150	9.589
2742-01-01	0	18_150	9.586
3010-01-01	0	18_150	9.585
ZI-3I			
2011-12-01	0	0	8.125
2017-01-01	2059	3.731	10.57
2022-01-01	1997	7.420	10.32
2032-01-01	1946	14_600	10.25
2042-01-01	1937	21.690	10.18
2092-01-01	0	21.690	8.321
2142-01-01	0	21.690	8.239
2292-01-01	0	21.690	8.153
2442-01-01	0	21.690	8.14
2742-01-01	0	21.690	8.136
3010-01-01	0	21.690	8.136

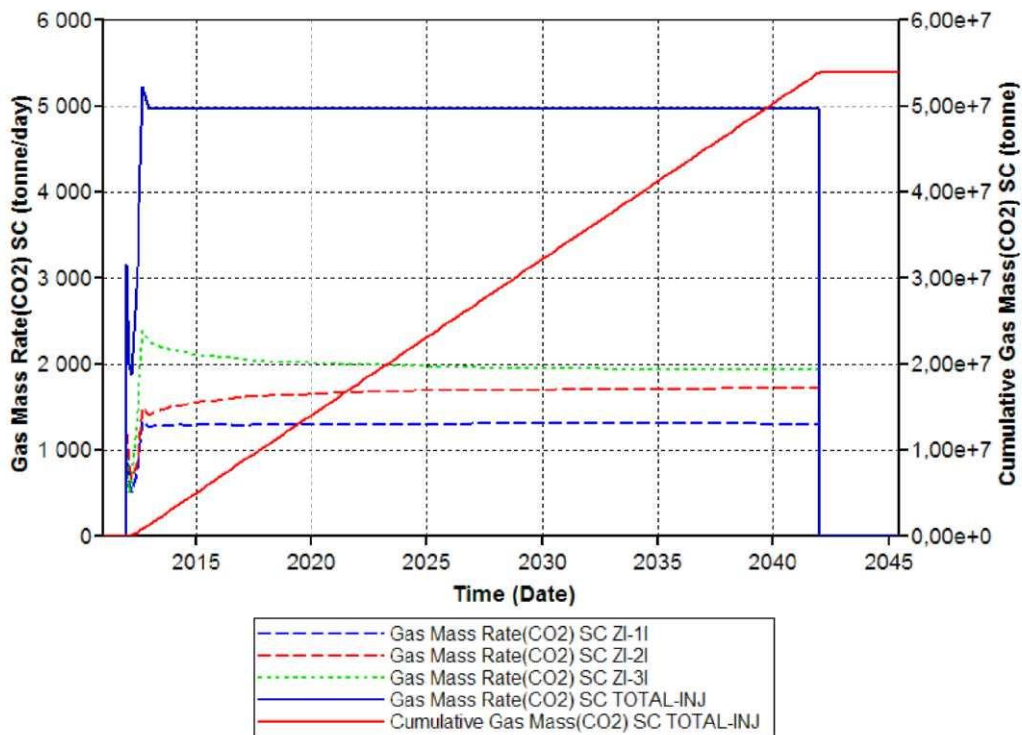


Fig.1.1.16_5 Masowa wydajność zatłaczania CO₂ dla poszczególnych odwiertów i całej instalacji oraz sumaryczna masa zatłoczonego dwutlenku węgla (3 otwory pionowe)

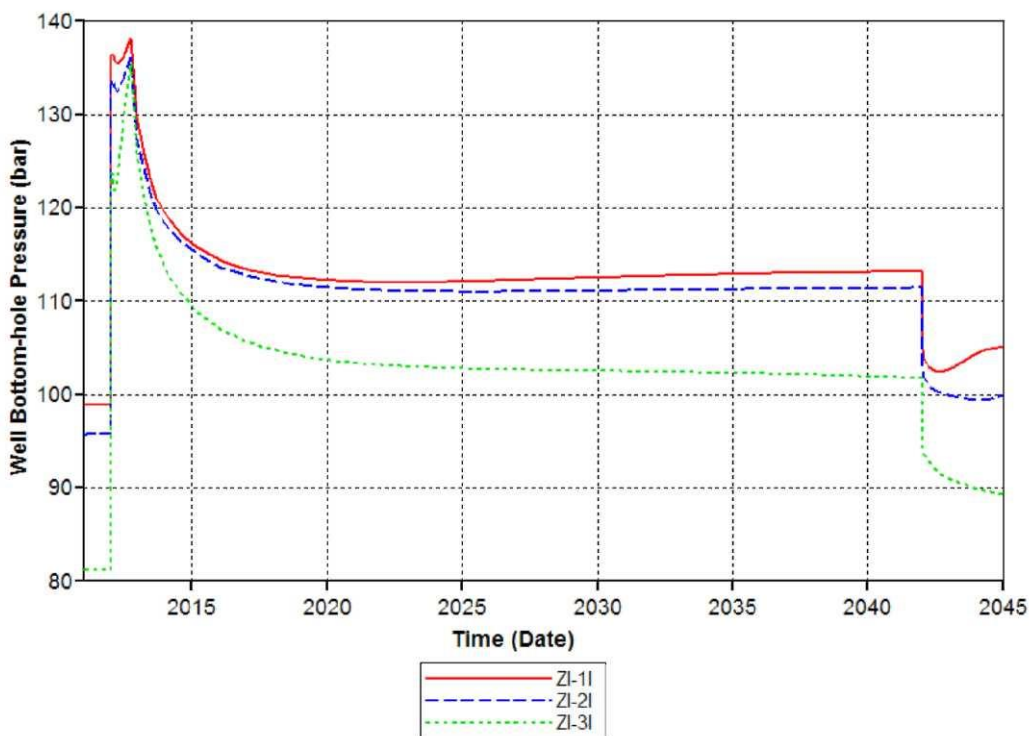


Fig.1.1.16_6 Ciśnienie denne w odwiertach w trakcie zatłaczania

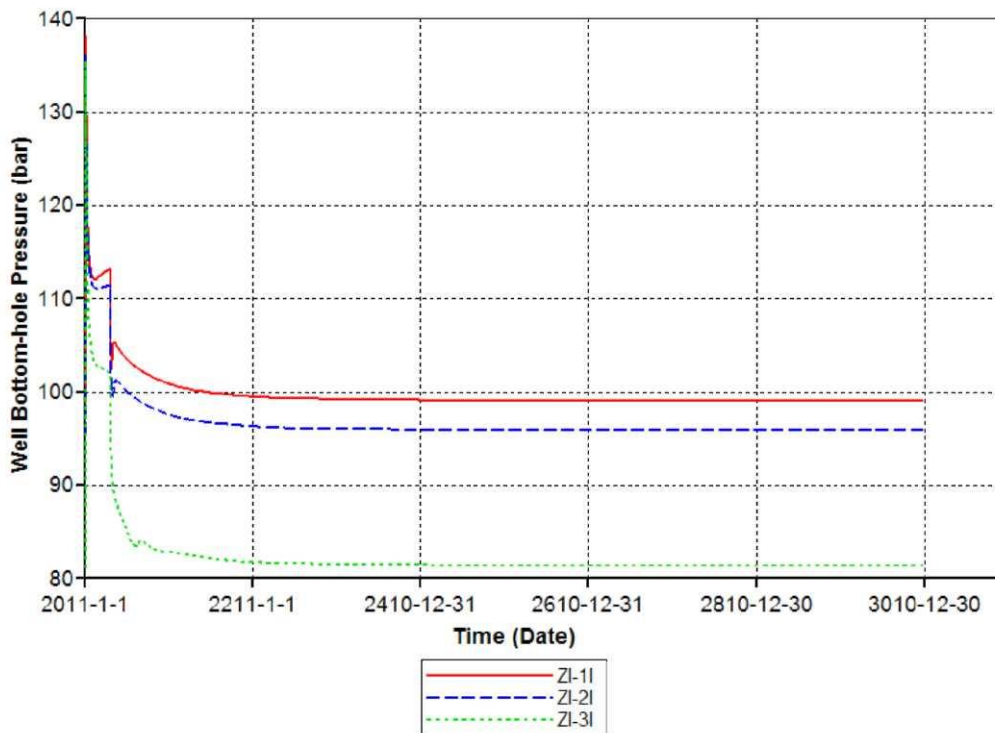


Fig.1.1.16_7 Ciśnienie denne w odwiertach w trakcie zatłaczania oraz po jego zakończeniu

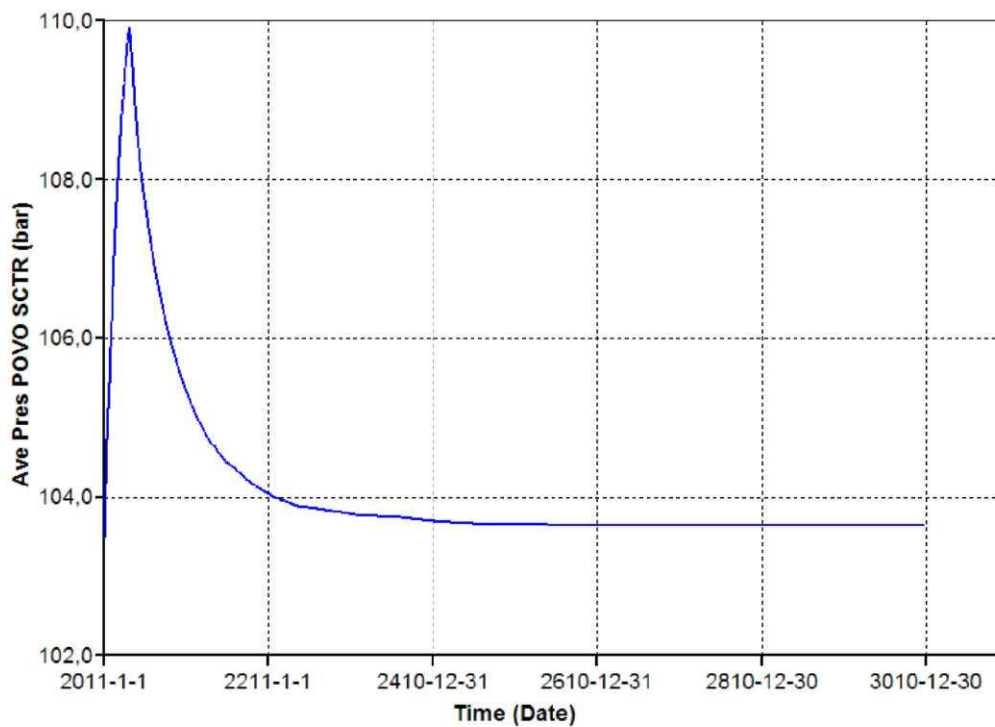


Fig.1.1.16_8 Zmiana ciśnienia średniego w strefie zatłaczania CO₂.
(stabilizacja ciśnienia)

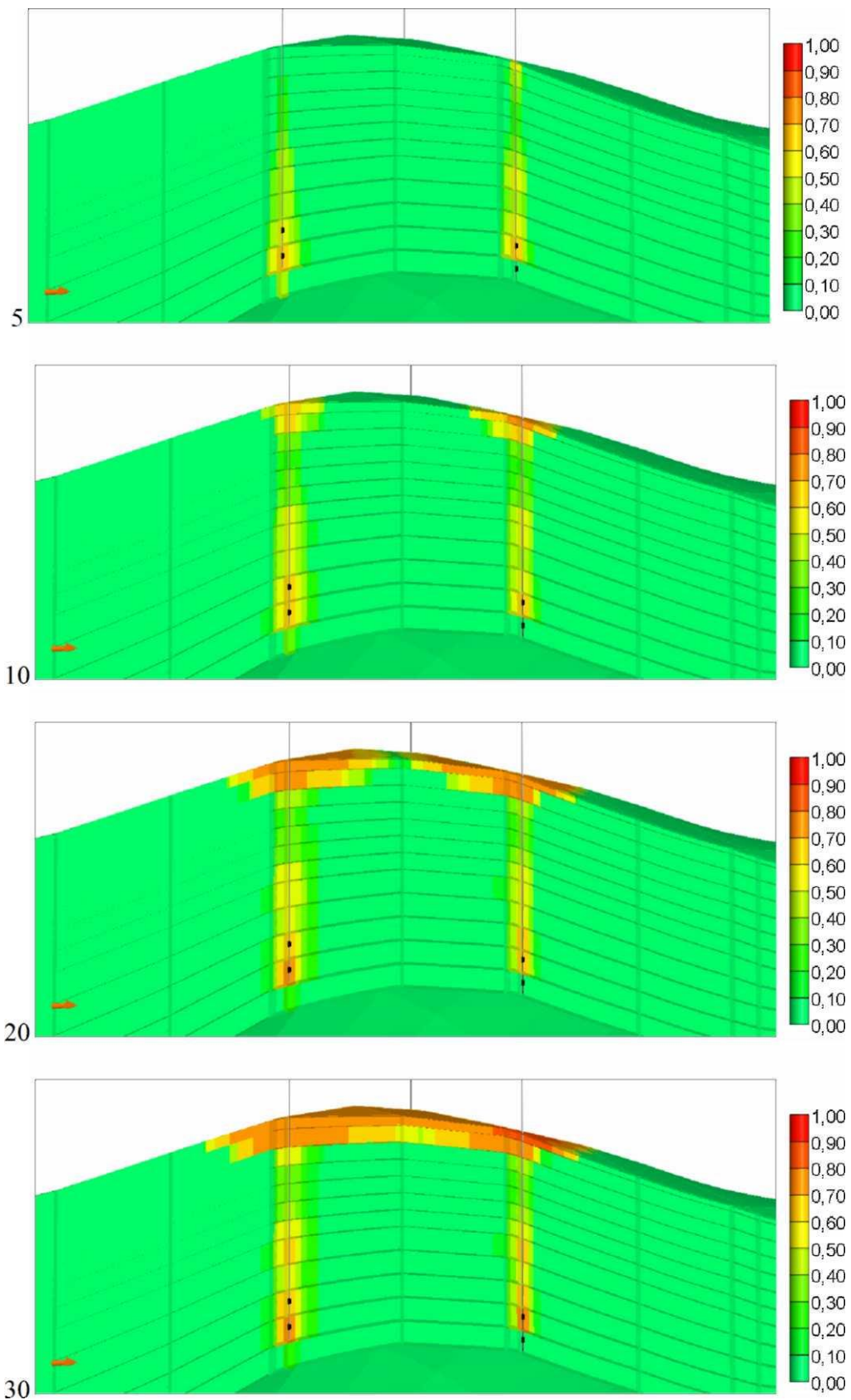


Fig.1.1.16_9 Stężenie CO₂ w przekroju zatłaczania po 5, 10, 20 i 30 latach od momentu rozpoczęcia zatłaczania

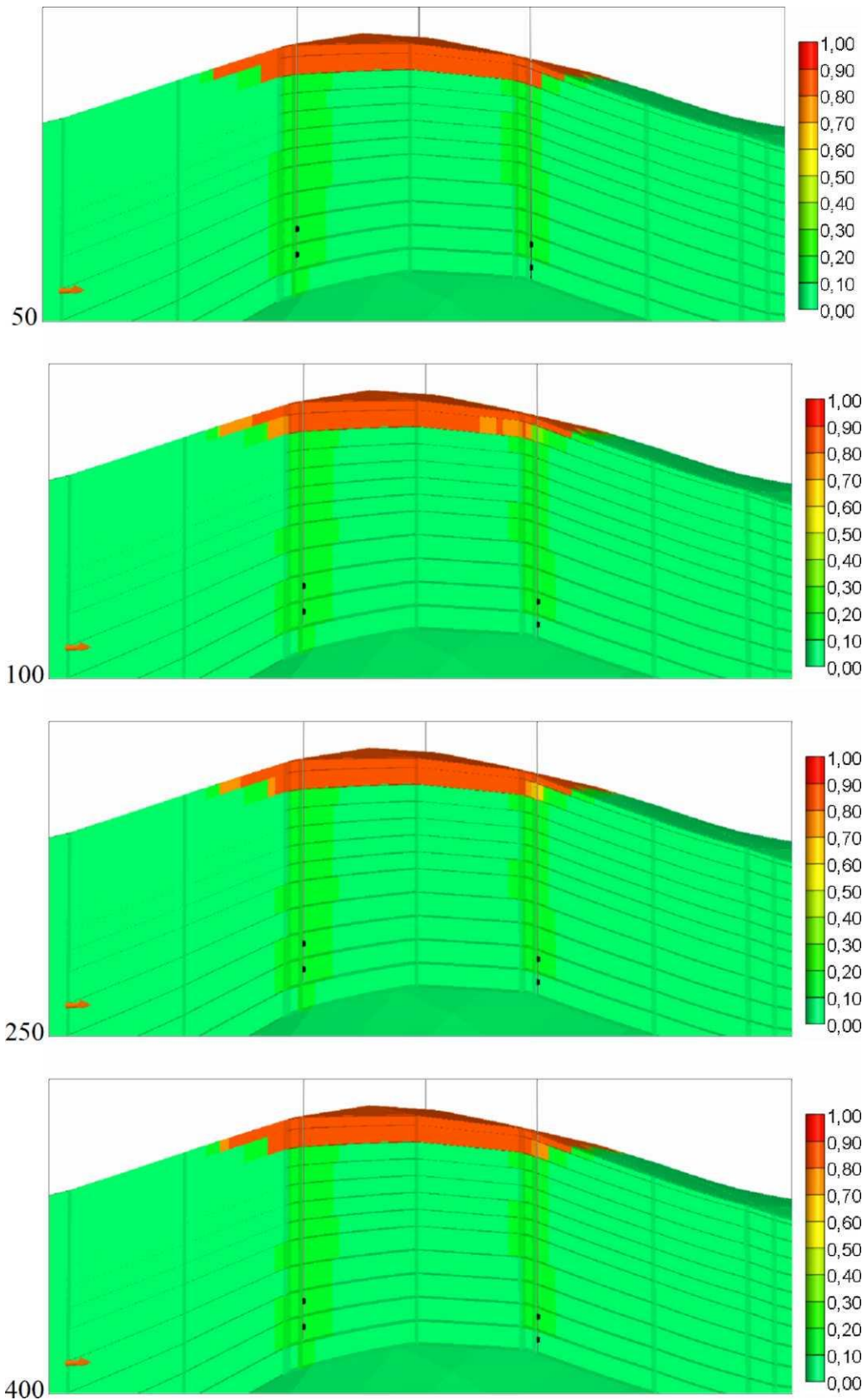


Fig.1.1.16_10 Stężenie CO₂ w przekroju zatłaczania po 50, 100, 250 i 400 latach od momentu rozpoczęcia zatłaczania

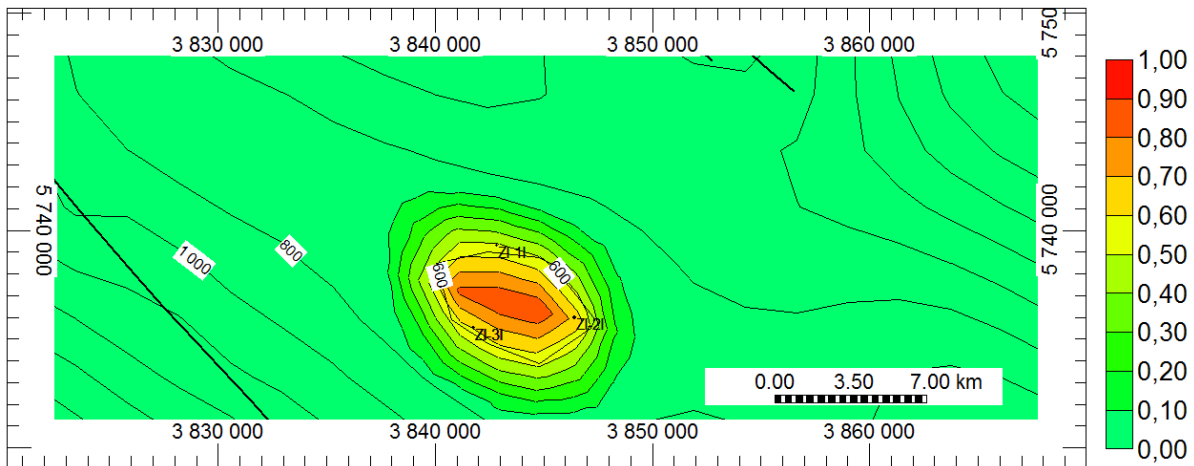


Fig.1.1.16_11 Zasięg strefy nasycenia CO₂ w stropie pliensbachu około 400-1000 lat od zakończenia zatłaczania (stabilizacja)

Otwory symulacyjne "nawiercają" górny pliensbach na głębokości 900-1000 metrów p.p.t. Należy przy tym zauważyć, że kolektor synemuru (i hettangu) posiada lokalnie łączność z nadległym kolektorem górnego pliensbachu, to znaczy że uszczelnienie dolnego pliensbachu lokalnie traci dobre własności, w szczególności w szczytowej partii struktury, w rejonie otworu Zaosie-2, a na pozostałym obszarze nie zawsze jest dobrą barierą (nie są to w przeważającej części iltowce tylko inne facje o mniejszym zaileniu, stąd ciśnienie progowe/kapilarne wywołane oddziaływaniem dwutlenku węgla w kolektorze poniżej wystarcza do penetracji utworów dolnego pliensbachu).

Drugi wariant dotyczył zatłaczania pojedynczym otworem horyzontalnym (wydajność zatłaczania zbliżona do sumarycznej dla trzech otworów pionowych). W tabeli **1.1.16_2** podano założenia dla tego modelu.

Tab.1.1.16_2 Zestawienie podstawowych parametrów zatłaczania dla odwiertu poziomego

Data	Wydajność zatłaczania [t/d]	Całkowita masa CO ₂ [10 ⁶ t]	Ciśnienie denne [MPa]	Ciśnienie średnie w strefie zatłaczania [MPa]
2011-12-01	0	0	8.066	10.35
2017-01-01	5156	5.939	14.34	10.53
2022-01-01	5515	15_98	13.35	10.71
2032-01-01	5515	36.12	12.49	10.93
2042-01-01	5515	56.27	12.17	11.05
2092-01-01	0	56.27	8.26	10.61
2142-01-01	0	56.27	8.11	10.47
2292-01-01	0	56.27	8.091	10.38
2442-01-01	0	56.27	8.081	10.37
2742-01-01	0	56.27	8.08	10.37
3010-01-01	0	56.27	8.079	10.37

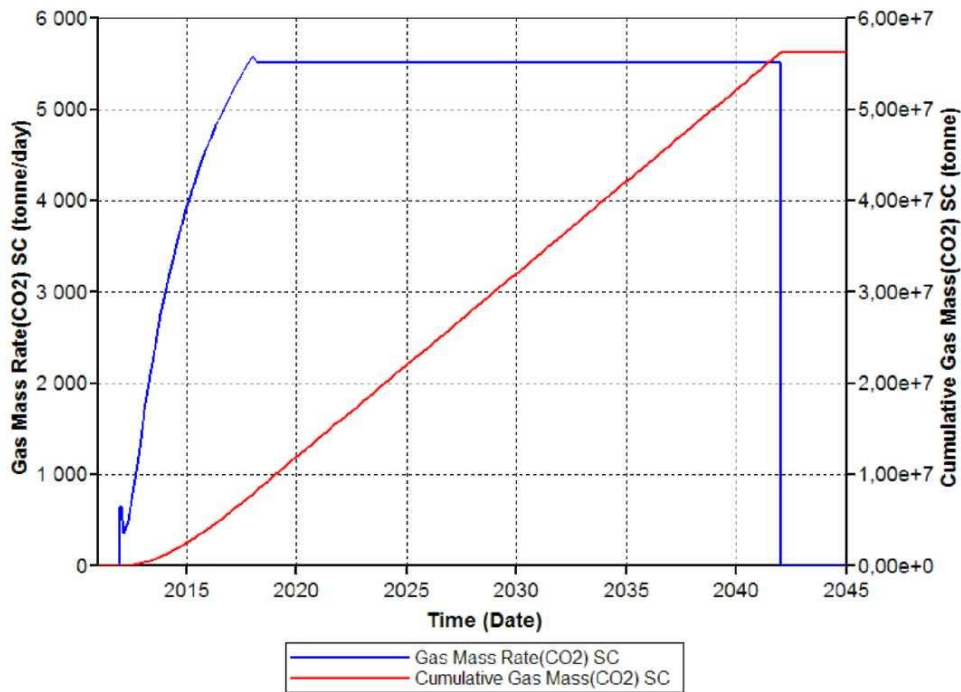


Fig.1.1.16_12 Masowa wydajność zatłaczania CO₂ oraz sumaryczna ilość zatłoczonego dwutlenku węgla

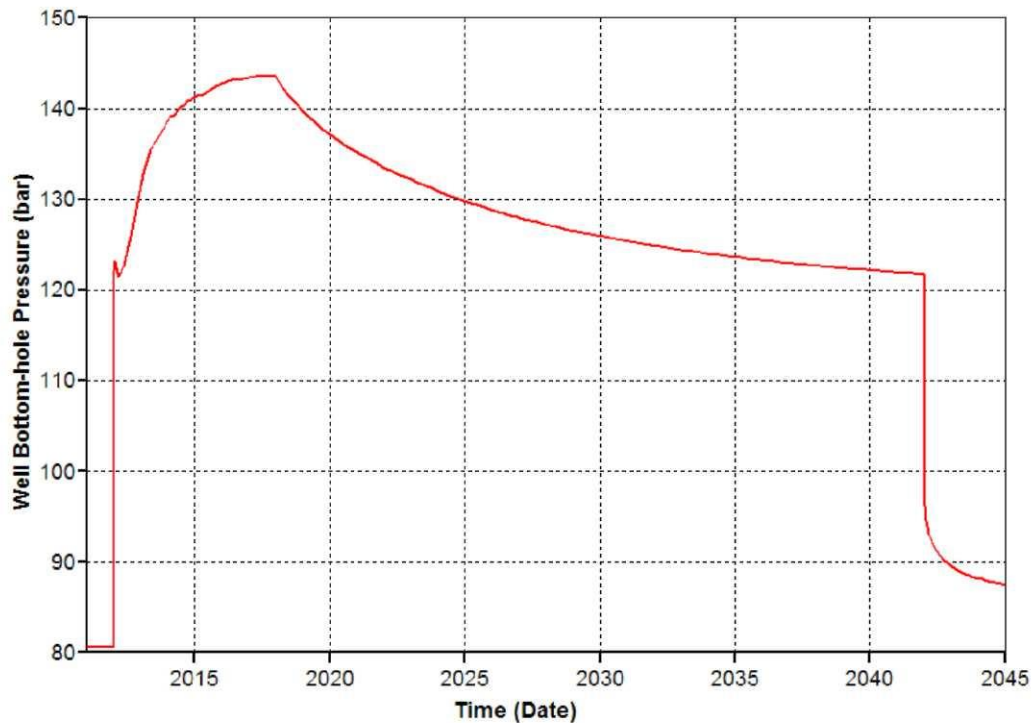


Fig.1.1.16_13 Ciśnienie denne w odwiercie w trakcie zatłaczania

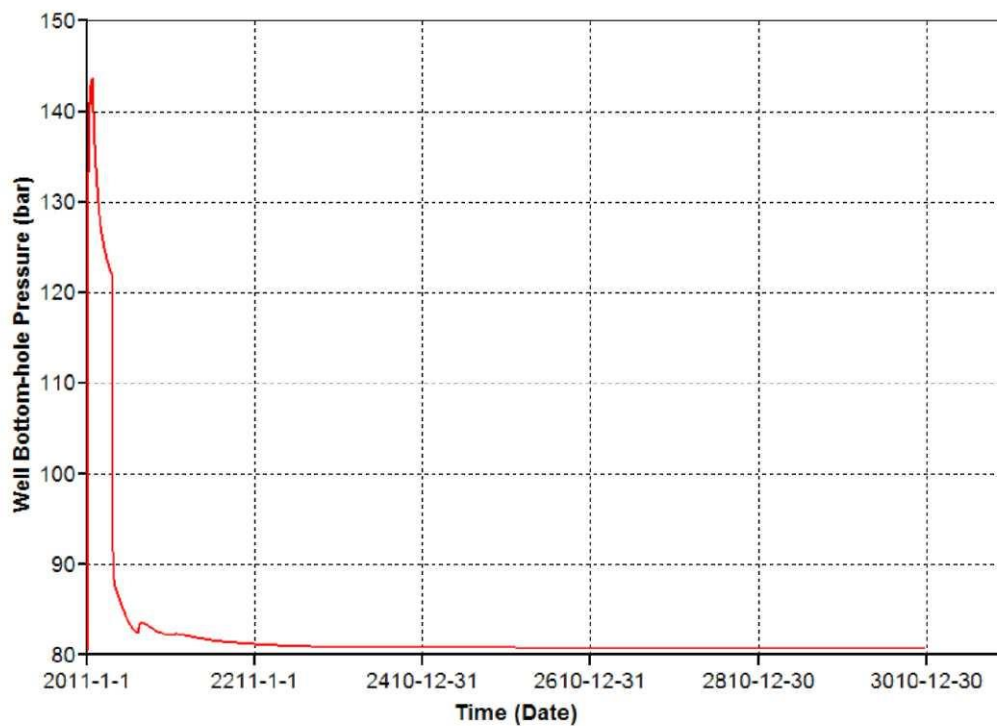


Fig.1.1.16_14 Ciśnienie denne w odwiercie w trakcie zatłaczania oraz po jego zakończeniu

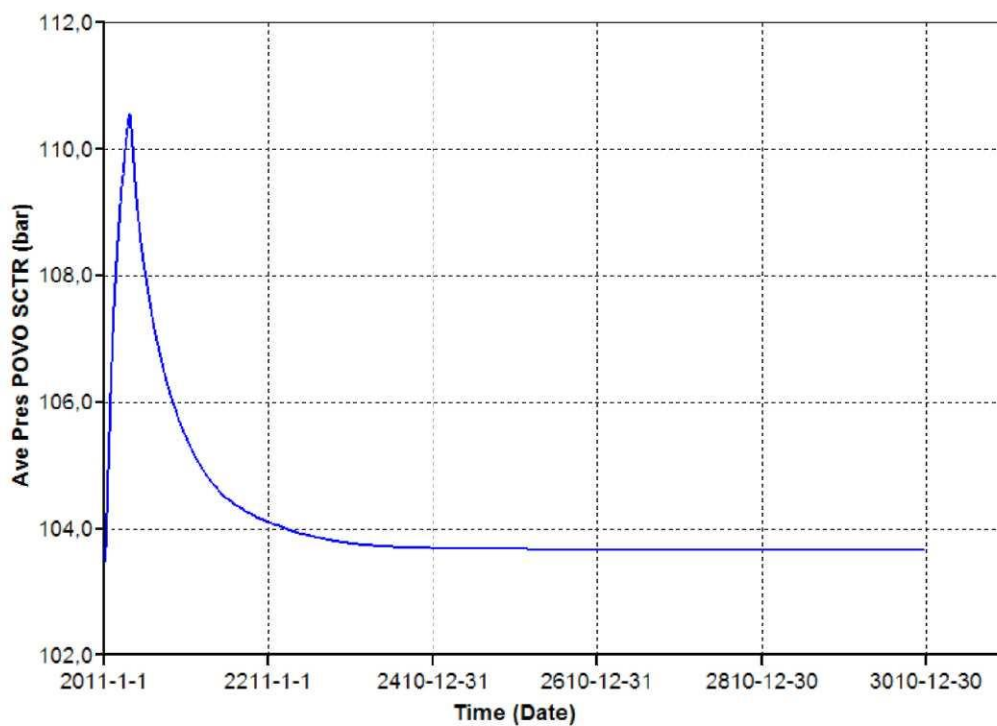


Fig.1.1.16_15 Zmiana ciśnienia średniego w strefie zatłaczania CO₂.
(stabilizacja ciśnienia)

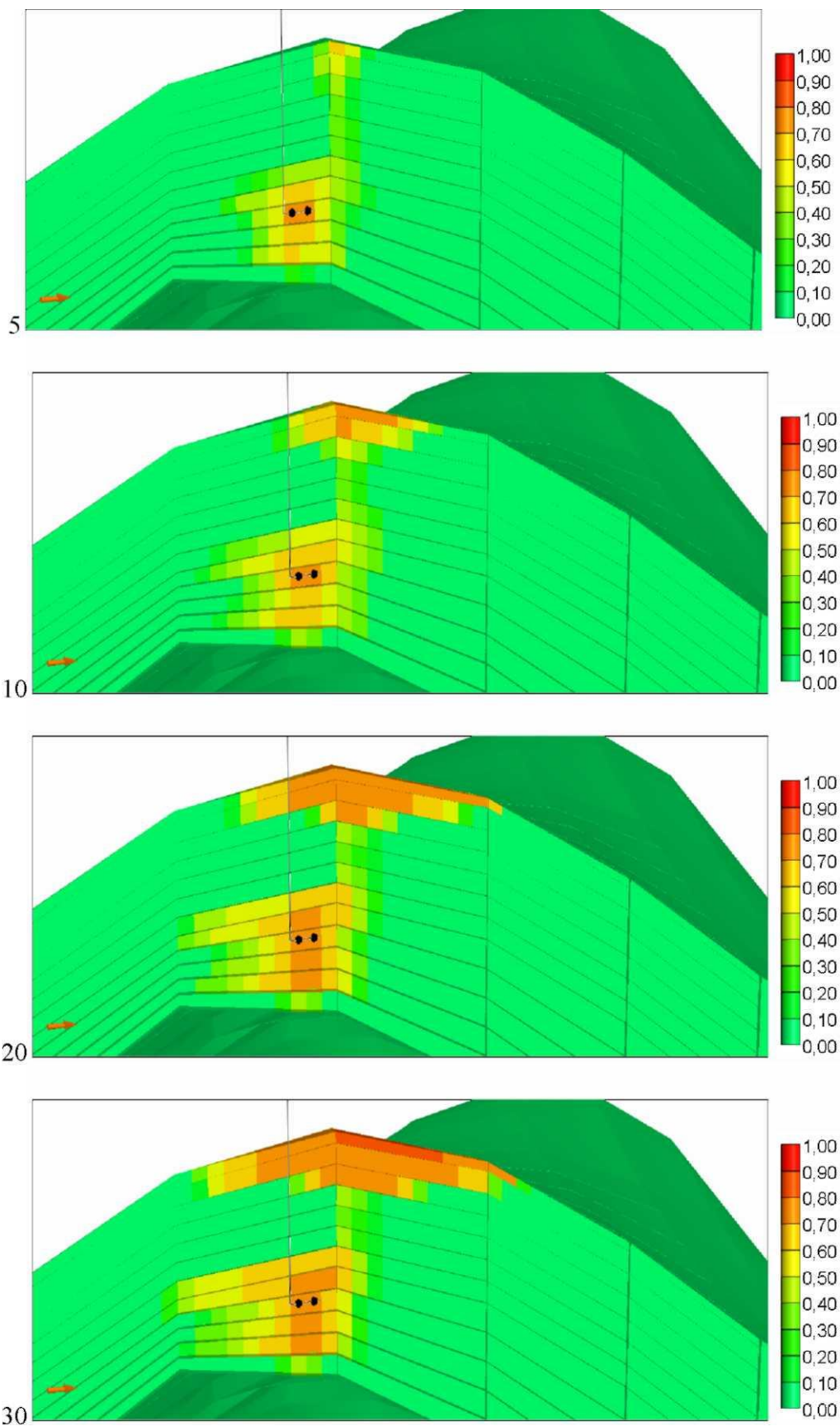
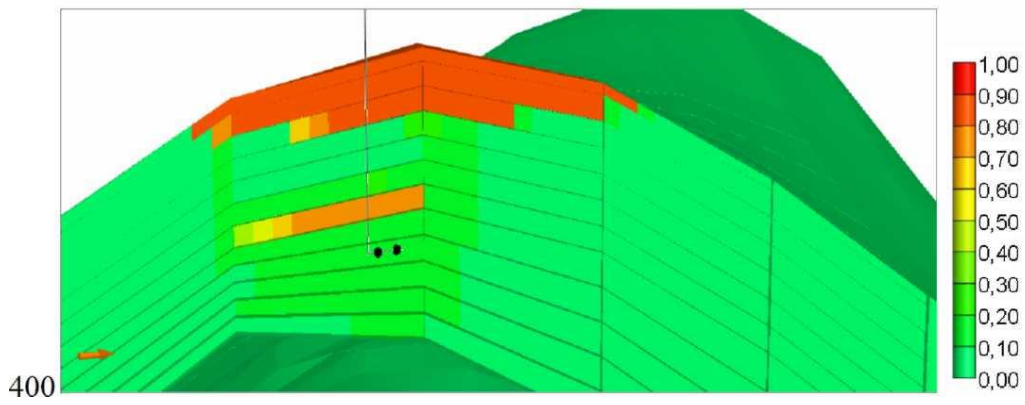
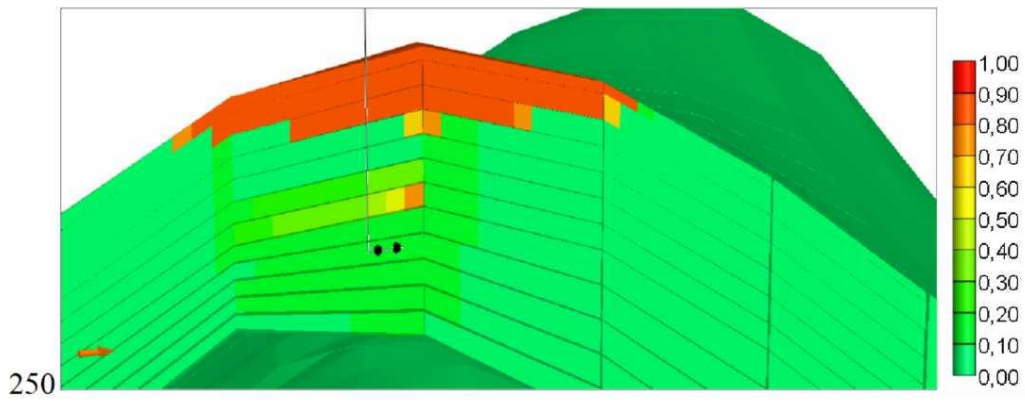
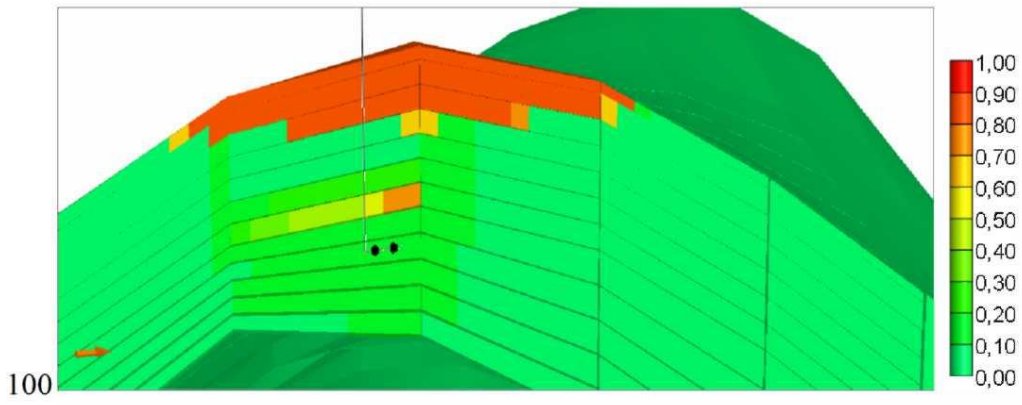
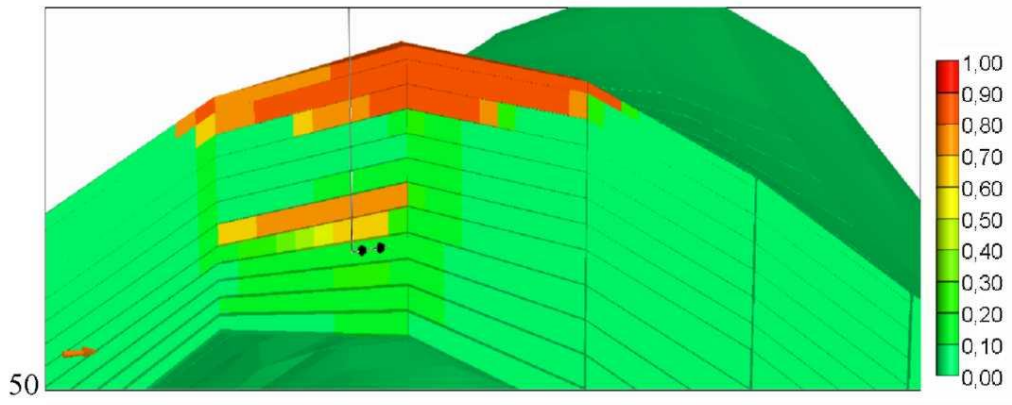


Fig.1.1.16_16 Stężenie CO₂ w przekroju zatłaczania po 5, 10, 20 i 30 latach od momentu rozpoczęcia zatłaczania



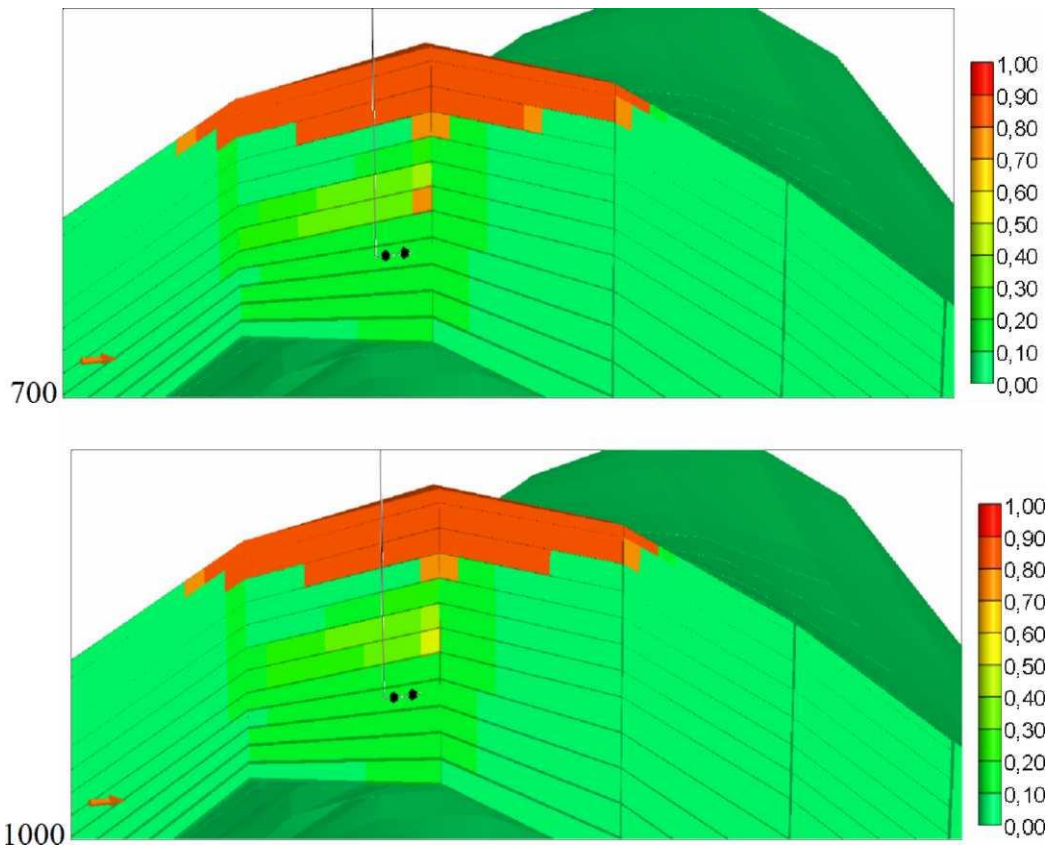


Fig.1.1.16_17 Stężenie CO₂ w przekroju zatłaczania po 50, 100, 250, 400, 700 i około 1000 latach od momentu rozpoczęcia zatłaczania

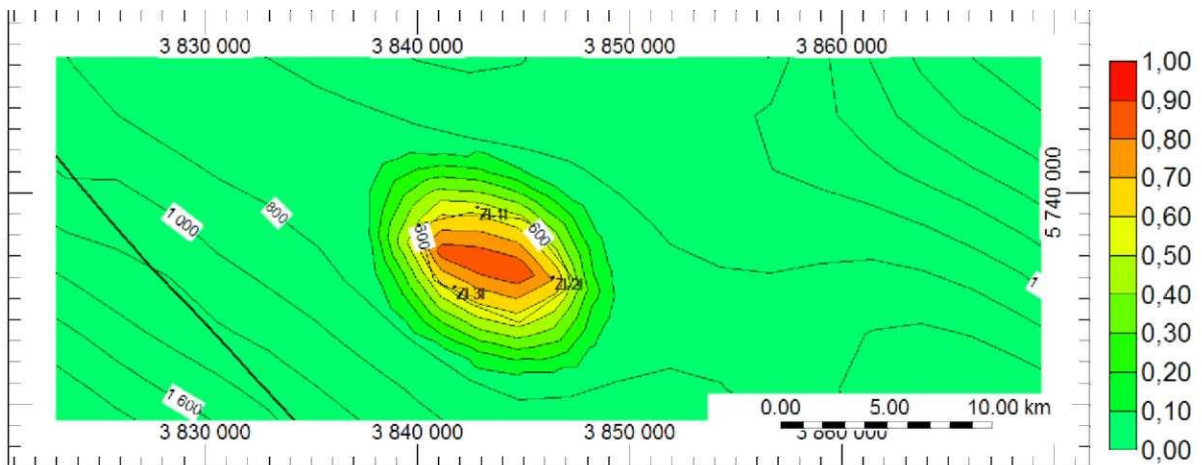


Fig.1.1.16_18 Zasięg strefy nasycenia CO₂ w stropie piensbachu około 1000 lat od zakończenia zatłaczania (stabilizacja)

Zatłaczanie jednym otworem poziomym jest oczywiście bardziej ekonomiczne niż w trzech pionowych, ale wyższe ciśnienie w odwiercie może mieć wpływ na bezpieczeństwo składowania.

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

(Jarosław Chećko, Tomasz Urych, Jan Wachowicz)

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

Z uwagi na posiadane oprogramowanie PetraSim (TOUGH) v2.0, niekompatybilne z Petrelem czy GOCADem nie można było bezpośrednio zaimportować modelu statycznego. I dlatego też mozolną pracą w trakcie tego zadania było zbudowanie modelu w PetraSim-ie w taki sposób, aby odzwierciedlał strukturę geologiczną (antykliny Budziszewic).

Właściwości dwutlenku węgla

Możliwości podziemnego unieszkodliwiania (sekwestracji) czy magazynowania dwutlenku węgla zależą m.in. od właściwości fizykochemicznych tego gazu. Podstawowe właściwości przedstawiono w Tabeli 1.1.16_3.

Tab.1.1.16_3 Właściwości fizyczne dwutlenku węgla

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

Dwutlenek węgla w zależności od panującego ciśnienia i temperatury, może występować w jednym z trzech stanów skupienia a mianowicie:

1. gazowym,
2. stałym,
3. ciekłym

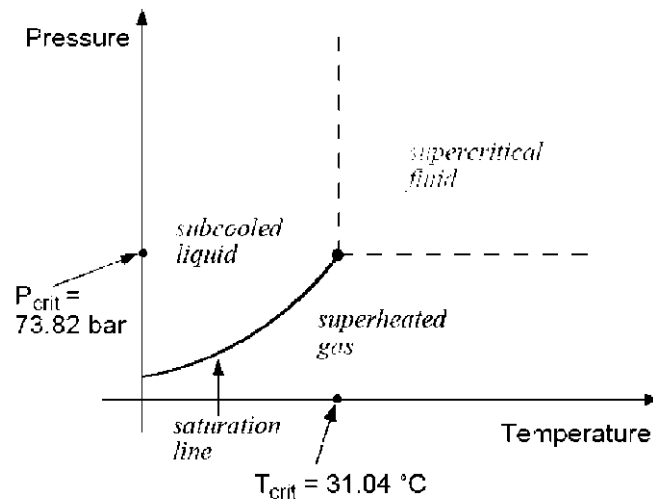


Fig. 1.1.16_19 Przemiany fazowe CO₂

Linia równowagi pomiędzy fazami rozróżnia stan skupienia która przedstawiono na **Fig.1.1.16_19** linią równowagi pomiędzy fazą ciekłą i gazową. Wzrost ciśnienia przy stałej temperaturze może powodować przejście do fazy ciekłej. Obszar nadkrytyczny ma właściwości gazu o dużej gęstości w zależności od ciśnienia i temperatury.

Dla określonej temperatury, rozpuszczalność CO₂ rośnie wraz ze wzrostem ciśnienia oraz maleje ze wzrostem temperatury (przy ciśnieniach poniżej 10 MPa, bowiem dla ciśnień wyższych powyżej 10 MPa rozpuszczalność powoli rośnie).

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

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

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

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

Na efektywność zatłaczania dwutlenku węgla będą miały wpływ głównie porowatość i przepuszczalność skał zbiornikowych. Wszystkie są funkcją wielkości porów istniejących w skałach zbiornikowych, przy czym w skałach węglanowych istotnym elementem oceny serii zbiornikowych jest ich szczelinowatość.

Wprowadzeniu gazu do ośrodka skalnego (porowego) towarzyszy zjawisko adsorpcji, czyli zwiększenia stężenia gazu na powierzchni ciała stałego. Zjawisko to jest częścią procesów w modelowaniu numerycznym. Parametrem wyznaczanym w trakcie badań jest chłonność adsorbcyjna, czyli maksymalna ilość substancji, jaka może zostać zasorbowana w jednostki masy danego ciała w danych warunkach

temperatury i ciśnienia. Drugim parametrem jest gazopojemność skał - ilość gazu znajdującej się w jednostce masy, na którą składa się suma gazu wolnego i zasorbowanego.

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

Podczas zatłaczania dwutlenku węgla do warstwy wodonośnej należy liczyć się z procesem rozpuszczania gazu w cieczy. Podczas procesu zatłaczania, CO₂ do podziemnych struktur skalnych mogą również zachodzić różne procesy zmiany stanu skupienia tego gazu, a zwłaszcza możliwe jest skraplanie się w otworze zatłaczającym. Dwutlenek węgla może stosunkowo łatwo skraplać się (łatwiej niż metan) bo już w temperaturze od 0°C do 30°C i przy ciśnieniu od 3 do 7 MPa (Wichert, Royan, 1996).

Modelowania numeryczne i symulacje komputerowe

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

TOUGH2 jest symulatorem przepływu płynów jedno i wielofazowych izo- i nieizotermicznych znajdującym szerokie zastosowanie w inżynierii złożowej naftowej, geotermii a ostatnio w sekwestracji CO₂ - w szczególności określenia i modelowania kontaminacji czy prognozowania depozycji odpadów nuklearnych (Pruess, 1987; Pruess 1991, Pruess et al. 1996b).

Badania naukowe będące podstawą budowy symulatora zostały wykonane w Laboratorium Lawrence Berkely (USA) w ostatnich dwudziestu latach, w związku z potrzebą oceny wpływu deponowania odpadów nuklearnych i płynnych zanieczyszczeń w warstwach porowatych wgłębnym a w ostatnich latach deponowania CO₂ w warstwach wodonośnych.

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

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

EOS1 - woda, woda ze znacznikiem,

EOS2 - woda, dwutlenek węgla,

EOS3 - woda, powietrze,

EOS4 - woda, powietrze z efektami kapilarnymi,

EOS5 - woda, wodór,

EOS7 - woda, solanka, powietrze,

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

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

EOS9 - izotermiczny strumień masy w skałach o różnym nasyceniu,

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

EGEL- przepływ dwufazowy m.in. z płynem żelującym,

EOSNN - przyptyw 3 fazowy wody, gazu niekondensującego i płynów newtonowskich i nienewtonowskich,

ECO2N - woda, NaCl, dwutlenek węgla.

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

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

Do dalszych rozważań wykorzystano równania stanu ECO2N. Modelowanie procesu zatłaczania CO₂ w struktury geologiczne jest skomplikowane z uwagi na właściwości fizyko-chemiczne tego gazu o których już pokrótce wspomniano wyżej. W związku z powyższym należy skrótowo wyjaśnić pewne procesy wykorzystane w module ECO2N. Iniekcja CO₂ do słonych warstw wodonośnych może wywoływać przepływ wielofazowy, wymianę ciepła oraz reakcje chemiczne. W laboratorium Berkeley opracowano symulatory dla (czy) moduły tych procesów. Jednym z modułów dla symulatora TOUGH 2 jest moduł ECO2N, który jest przeznaczony dla tego rodzaju procesów, choć można również wykorzystać moduł EWASG (Pruess i in. 1999, Pruess, 2004). Moduł ECO2N składa się z dwóch faz: woda- przepływ fazowy fazy ciekłej oraz fazę gazową CO₂, faza stała reprezentowana jako NaCl może również być użyta w tym module. Reakcje chemiczne prezentowane w module ECO2N obejmują etap równowagi pomiędzy wodą i dwutlenkiem węgla między fazą ciekłą i gazową. Pomiędzy H₂O i CO₂ między fazą gazową a ciekłą przedstawiona jest w module jako funkcja temperatury, ciśnienia i zasolenia, wykorzystując korelację wg. Spychera i Pruess (2005). Rozpad i rozpuszczalność soli potraktowany w module ECO2N za pomocą lokalnej równowagi rozpuszczalności. Uwzględniając zmiany w porowatości i przepuszczalności ośrodka. Wszystkie fazy, tj. gazowa, ciekła i stała mogą pojawić się, lub zaniknąć w siatce rozpatrywanego bloku podczas rozpoczęcia symulacji numerycznej.

Termodynamiczne warunki objęty warunki temperaturowe z otoczenia rozpatrywanego bloku to znaczy do temperatury około 100°C i ciśnienia do 60 MPa oraz zasolenie od 0 do pełnego nasycenia. Te parametry powinny być wystarczające do większości przypadków dotyczących sekwestracji CO₂ do słonych warstw wodonośnych.

W dwuskładnikowym systemie woda - CO₂, przy temperaturach powyżej 0°C, rozpatruje się trzy fazy, które mogą być obecne w fazie ciekłej woda może zawierać rozpuszczony CO₂, może również występować woda i ciekły CO₂, w fazie gazowej oprócz CO₂ może występować para wodna. W procesie tym może występować 7 połączeń fazowych przedstawionych na **Fig.1.1.16_20**. Ciekły i gazowy CO₂ może współistnieć wzdłuż krzywej nasycenia, ciśnienie CO₂ który kończy się w punkcie krytycznym, który określony jest temperatura i ciśnieniem (T_{kryt}, P_{kryt}) = (31.04°C, 7.4 MPa) (Vargaftik, 1975).

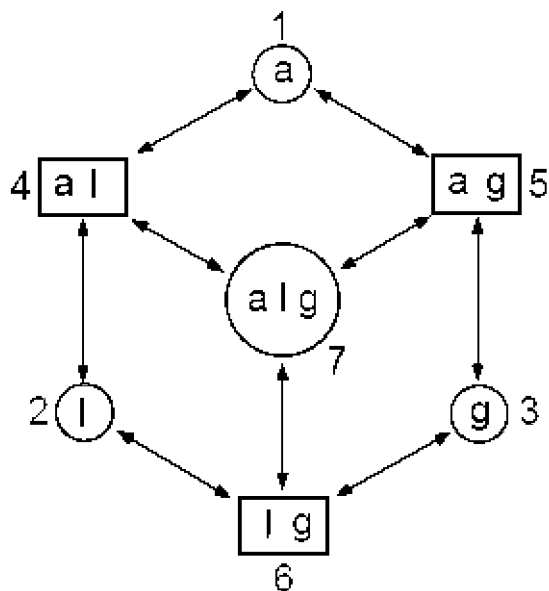


Fig.1.1.16_20 Możliwe połączenia faz w systemie woda - CO₂. Oznaczenia faz: a - ciekły, l - płynny CO₂, g - gazowy CO₂

Z siedmiu połączeń przedstawionych na **Fig.1.1.1.6.20**, ECO2N może reprezentować ponumerowaną fazę 1 (jedna faza wody z rozpuszczonym CO₂ i NaCl), 2,3 jedna faza CO₂, który może być faza ciekła i gazowa CO₂ i rozpuszczoną parą wodną), 4,5 (dwufazowe warunki składają się z wodny i CO₂) i 7 (trójfazowy).

Budowa modeli numerycznych

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

Granicę modelu przyjęto tak, aby obejmował swym zasięgiem całą strukturę. Stanowiący prostopadłościan o wymiarach 21 km x 21 km, którego powierzchnia dolna odpowiada rzędnej -1600 m n.p.m a górna - 500 m n.p.m. stanowiąca szczyt struktury. Tak wyznaczony model, poddano dyskretyzacji przestrzenną siatką ortogonalną, w układzie pionowym wyznaczono przedział 100 m, tak aby zobrazować strukturę antyklinalną

w modelu (Fig.1.1.16_21). Parametry modelu przedstawiono poniżej celem zobrazowania założeń modelowych.

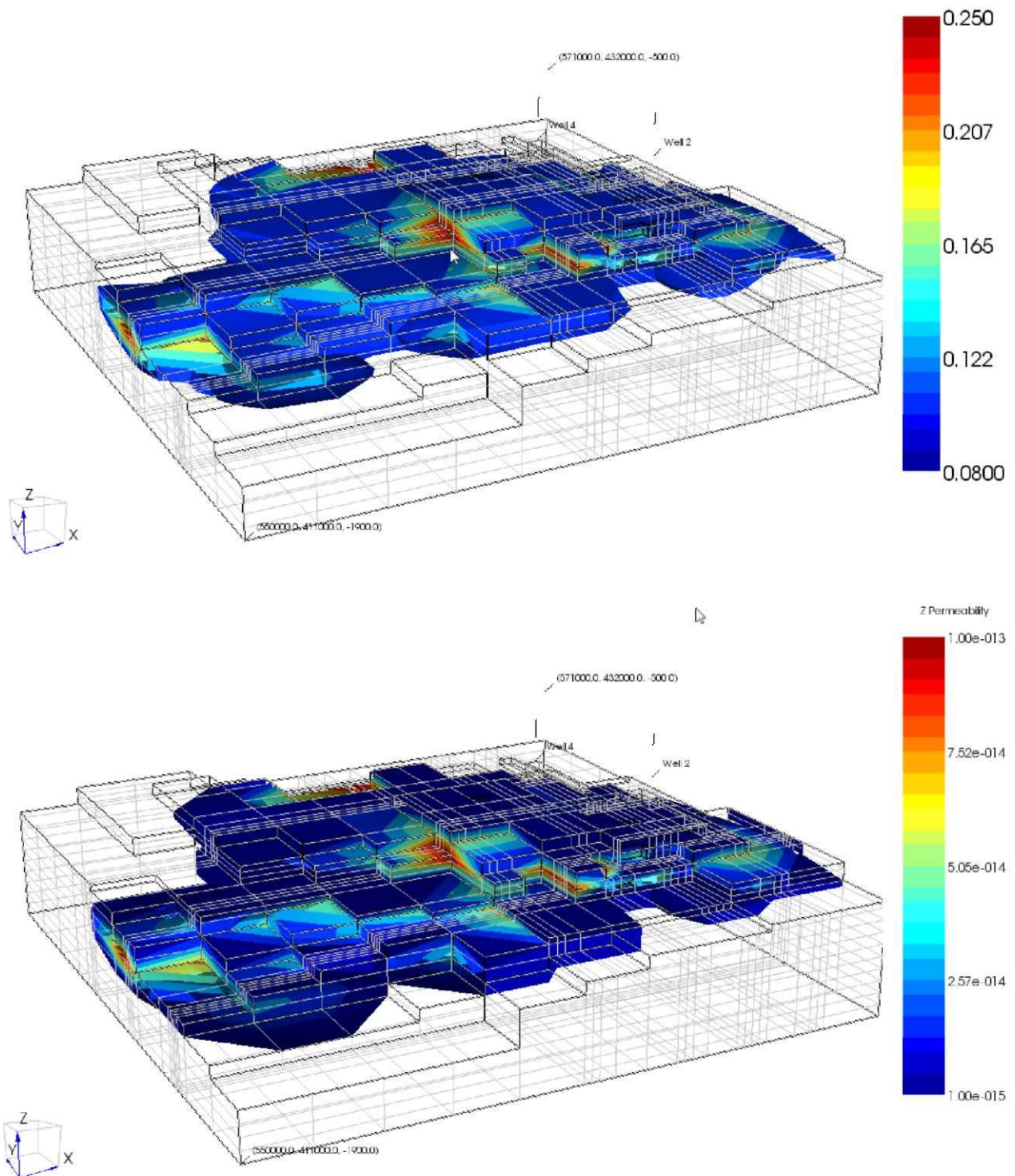


Fig.1.1.16_21 Rozkład porowatości (górn) i przepuszczalności modelu (dół; jednostki SI)

Warunki zatłaczania

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

Przyjęto zatłaczanie czterema otworami iniekcyjnymi o lokalizacji przedstawionej na **Fig.1.1.16_1-3**. Założono, że modelowanie będzie wykonane dwuwariantowo tj. zatłaczanie testowe i docelowe.

Zatłaczanie testowe dokonano jednym otworem nr 1 (SW), w ilości 20 000 ton przez rok. Natomiast docelowe odbywać się będzie czterema otworami po 450 000 ton CO₂/rok przez okres 25 lat, czas symulacji do 200 lat po zakończeniu zatłaczania.

Przyjęto, represje ciśnienia dynamicznego do 2MPa tzn. $\Delta p=2$ MPa w odniesieniu do ciśnienia hydrostatycznego.

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

Własności modelu przepuszczalności względnych k_{rg} i k_{rw} określono dla piaskowców dolnojurajskich (**Fig.1.1.16_22**).

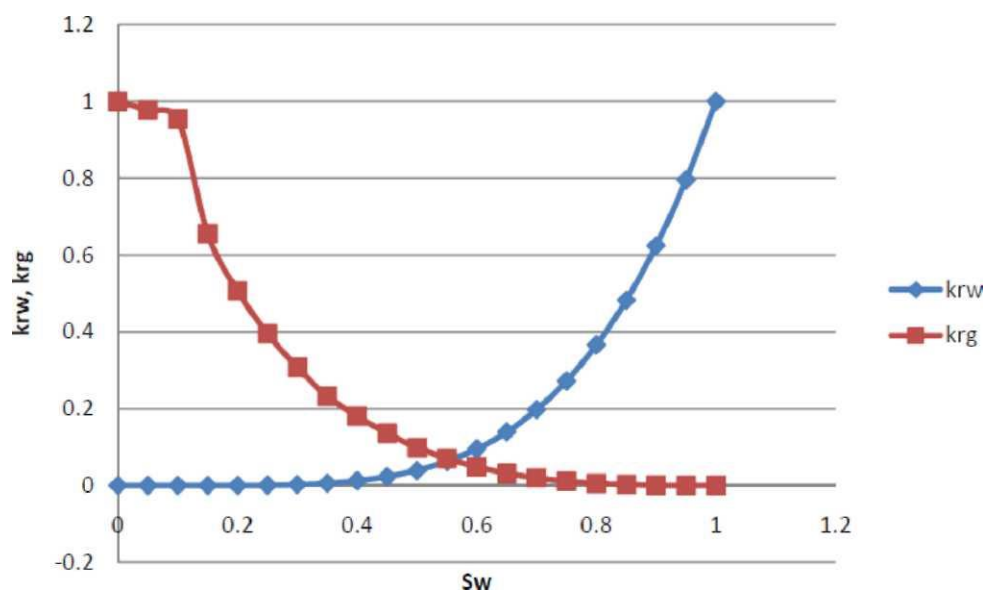


Fig.1.1.16_22 Zależność przepuszczalności względnych od nasycenia wodą wykorzystana w modelu

Przyjęto ciśnienie złożowe na poziomie 1000 m ppm równe ciśnieniu hydrostatycznemu. Z uwagi na ograniczenia numeryczne przyjęto temperaturę 40°C jako temperaturę minimalną w warstwie zbiornika.

Założono na podstawie modeli dynamicznych o zasięgu regionalnym że występuje minimalny wpływ przepływu wód dolnojurajskich na proces zatłaczania i dla omawianego wariantu modelowego nie wprowadzono istotnego ruchu wód przyjmując 0 m/rok.

Wyniki symulacji

Przeprowadzono dwa warianty symulacji. Dla zatłaczania jednym otworem iniekcyjnym (well01) w ilości 20 000 ton CO₂ przez jeden rok wyniki symulacji przedstawiają **Fig.1.1.16_23-28**.

Drugi wariant obejmował zatłaczanie 4 otworami (well01, well2, well3, well4) w ilości 450 000 ton/rok dla każdego otworu przez okres 25 lat wyniki przedstawiają **Fig.1.1.16_29-38**.

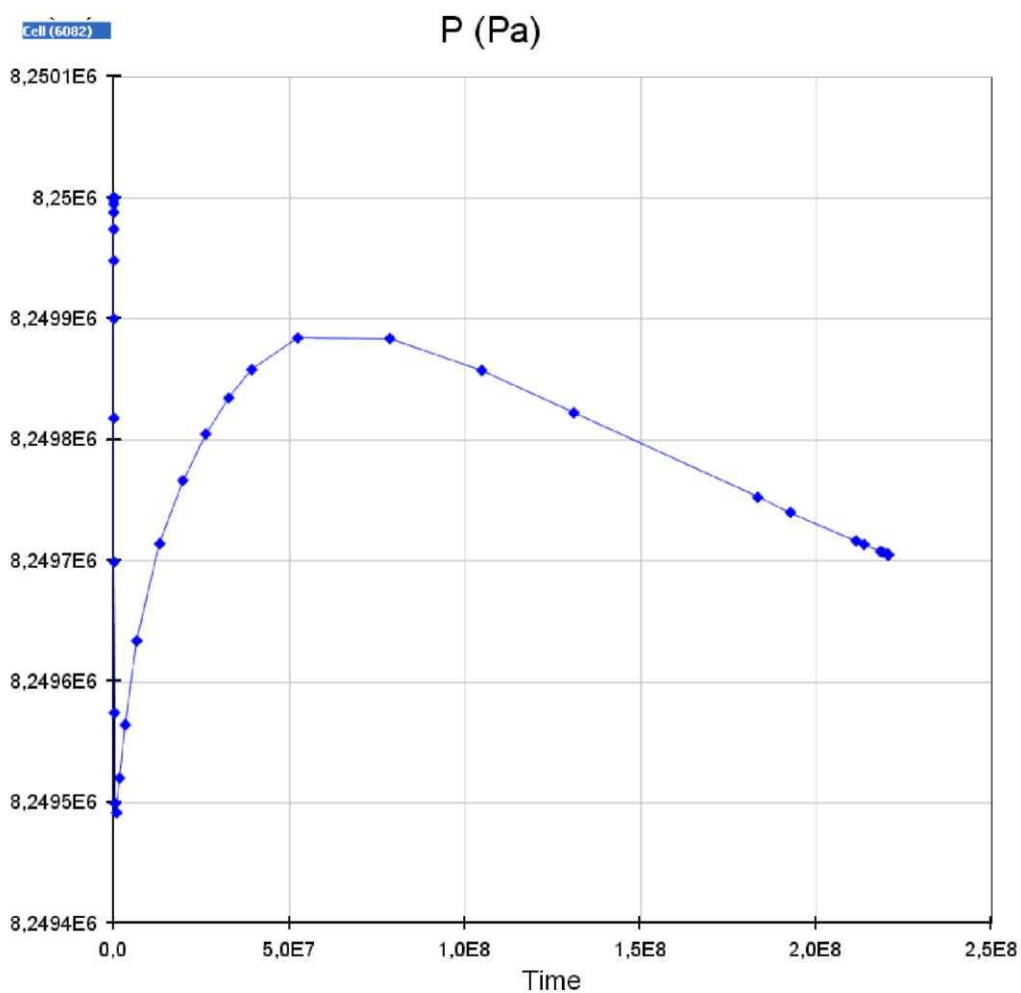


Fig.1.1.16_23 Przebieg zmian ciśnienia dennego w otworze iniekcyjnym (Well01)

WARIANT I

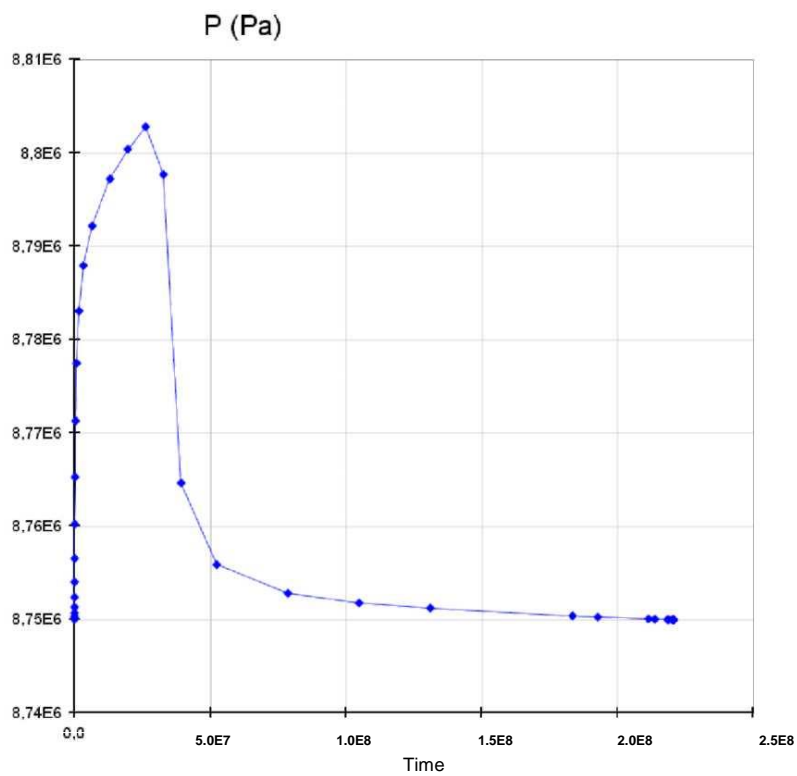


Fig.1.1.16_24 Przebieg zmian ciśnienia dennego w komórce oddalonej o 100 m od otworu iniekcynego (Well01)

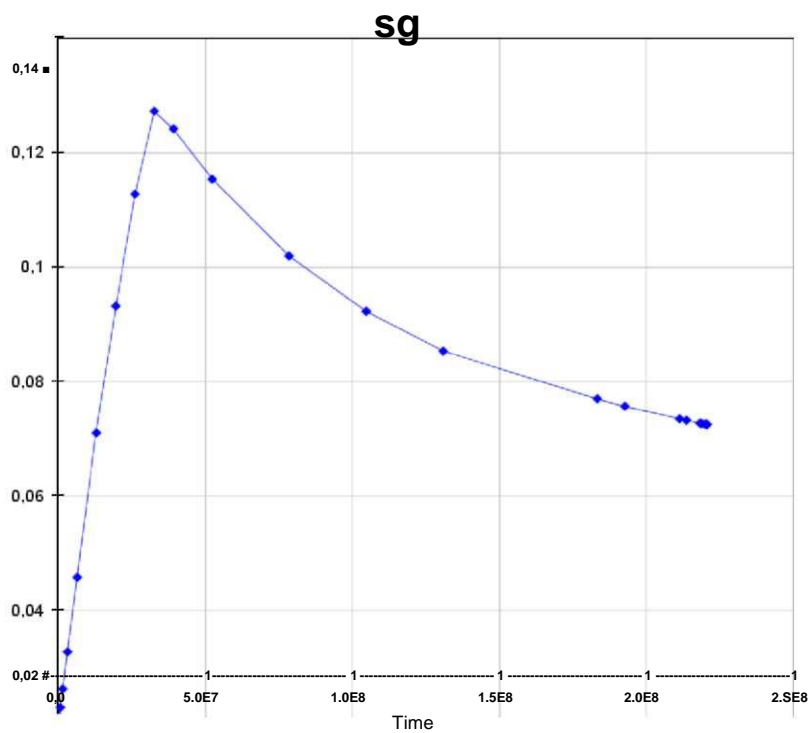


Fig.1.1.16_25 Przebieg zmian nasycenia CO_2 w miejscu iniekcji w czasie 20 lat

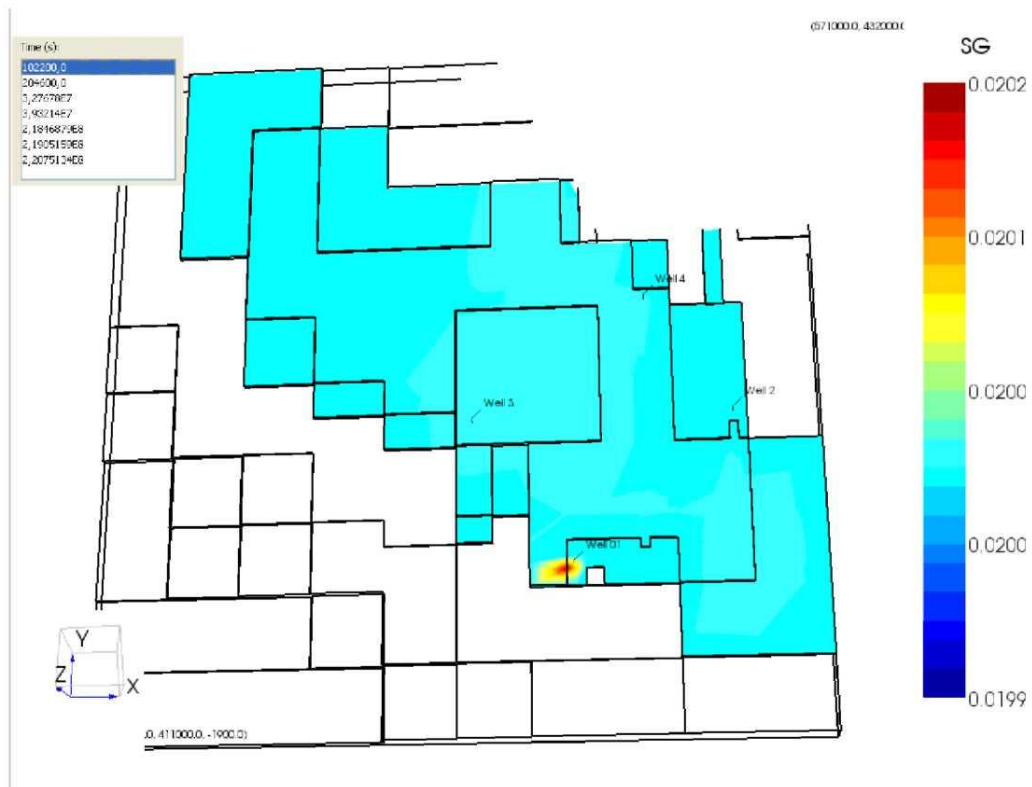


Fig.1.1.16_26 Nasylenie gazem warstwie na głębokości 800m po kilku godzinach iniekcji CO₂

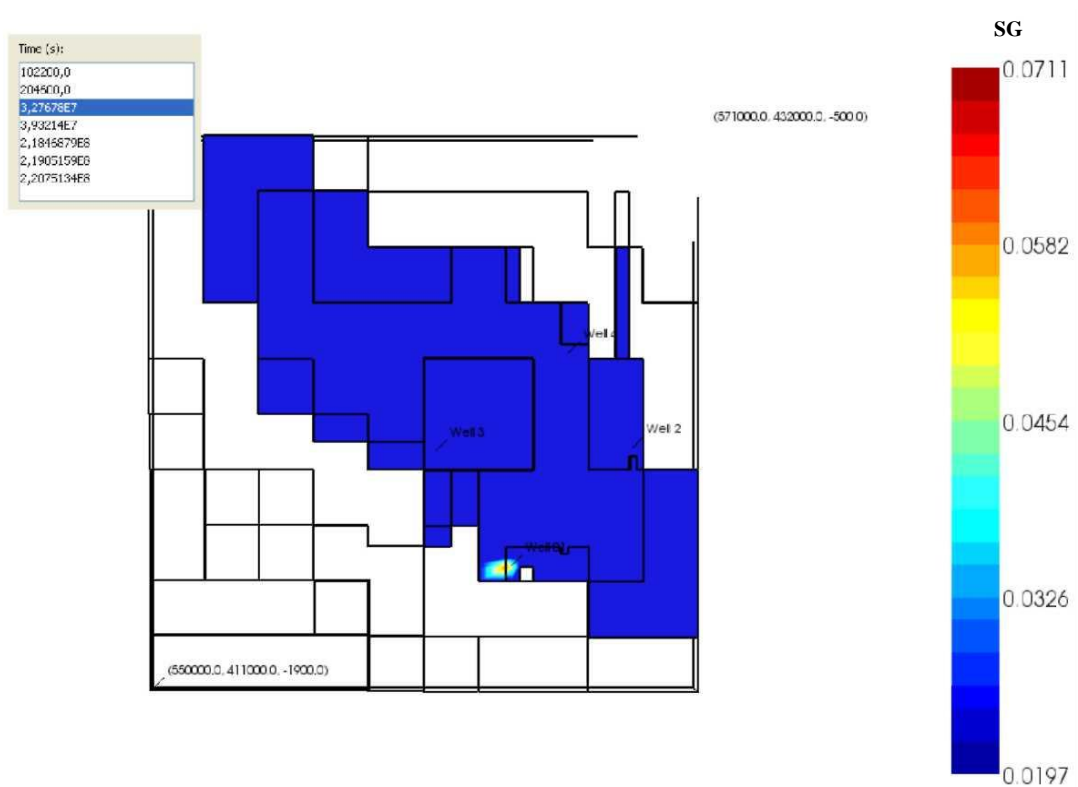
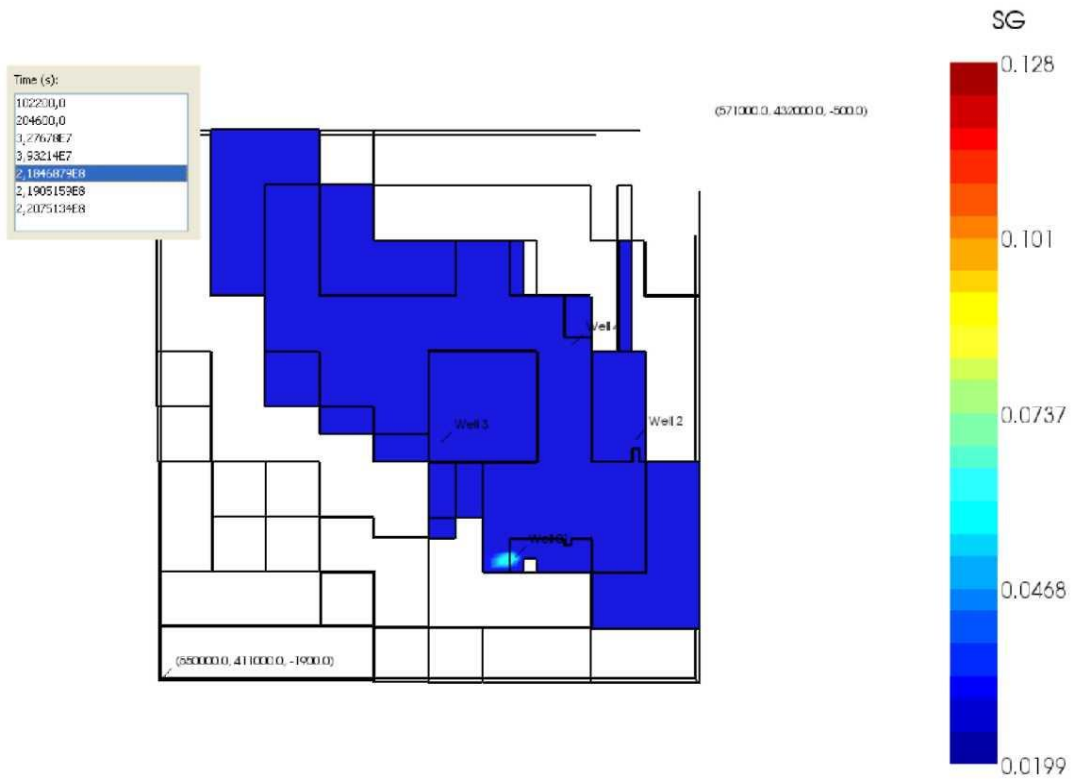


Fig.1.1.16_27 Nasylenie gazem warstwie na głębokości 800m po roku iniekcji CO₂



✓

Fig.1.1.16_28 Nasylenie gazem warstwie na głębokości 800m po 10 latach iniekcji CO₂

WARIANT II

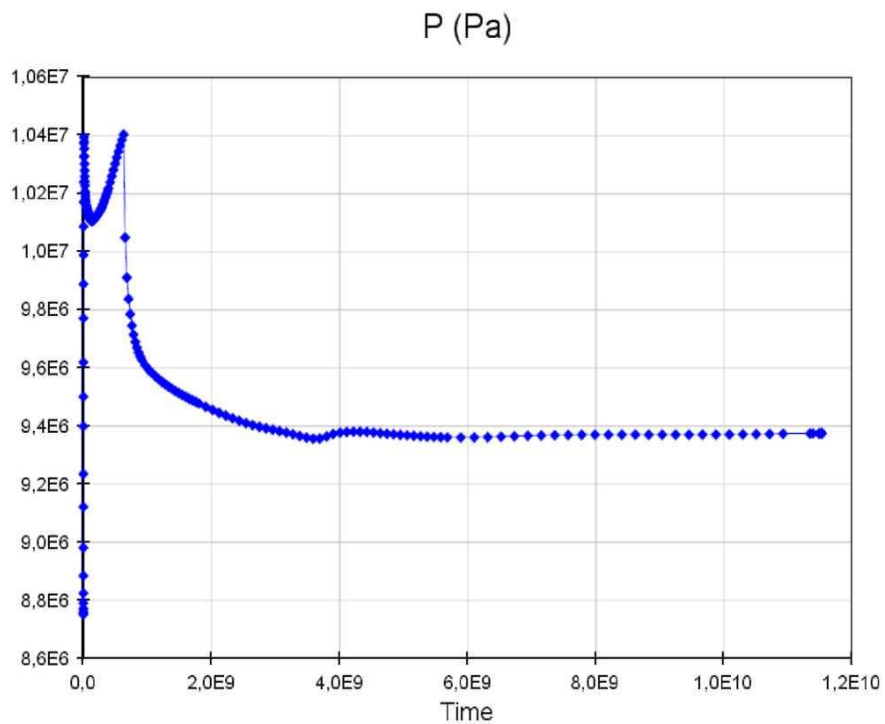


Fig.1.1.16_29 Przebieg zmian ciśnienia dennego w otworze iniekcyjnym 2

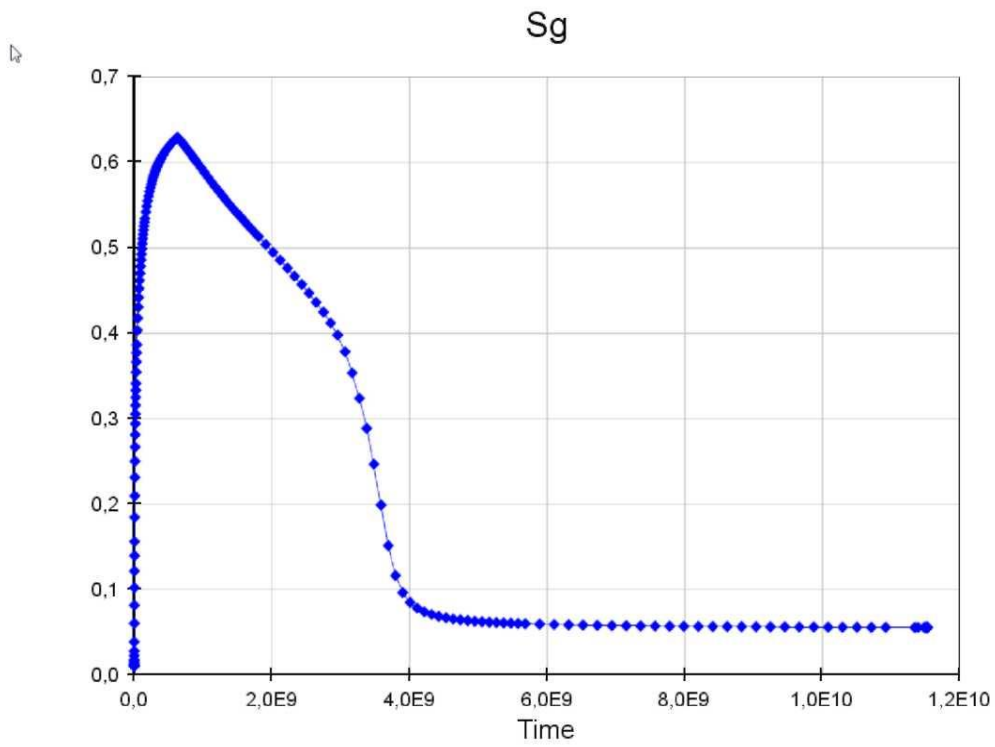


Fig.1.1.16_30 Przebieg zmian nasycenia CO₂ w miejscu iniekcji (otw. nr 2)

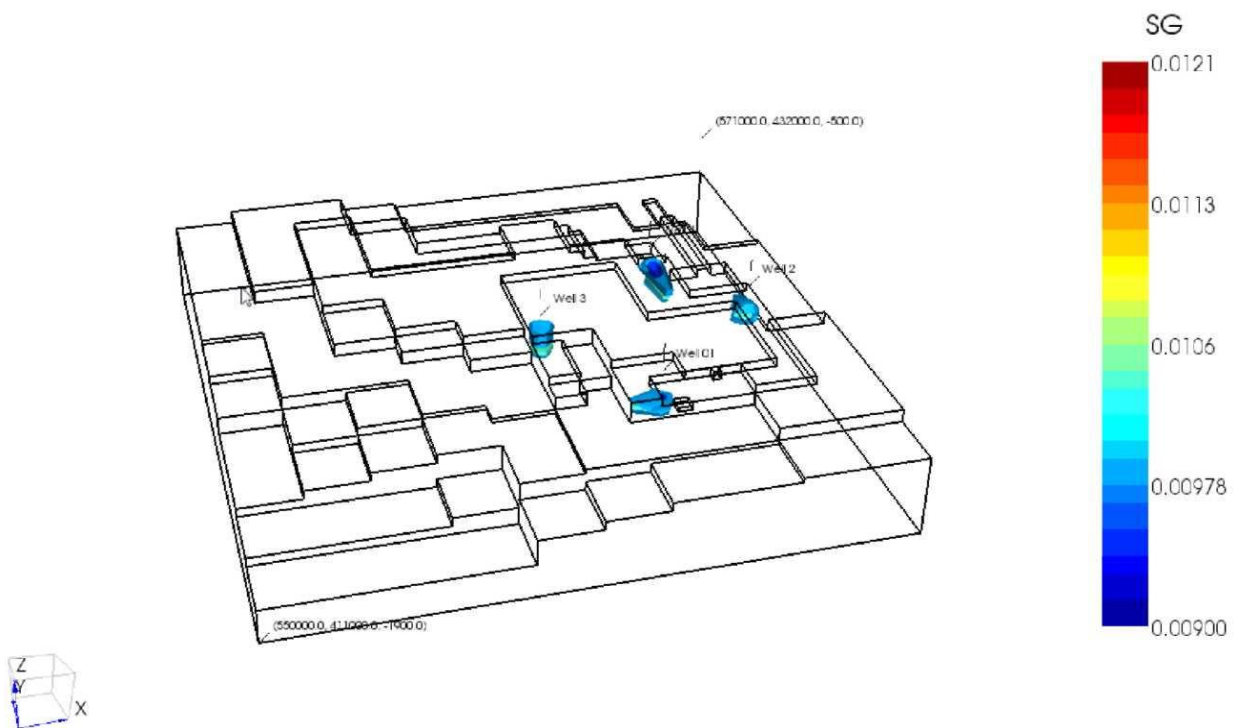


Fig.1.1.16_31 Rozkład nasycenia gazem w modelu po kilku godzinach iniekcji

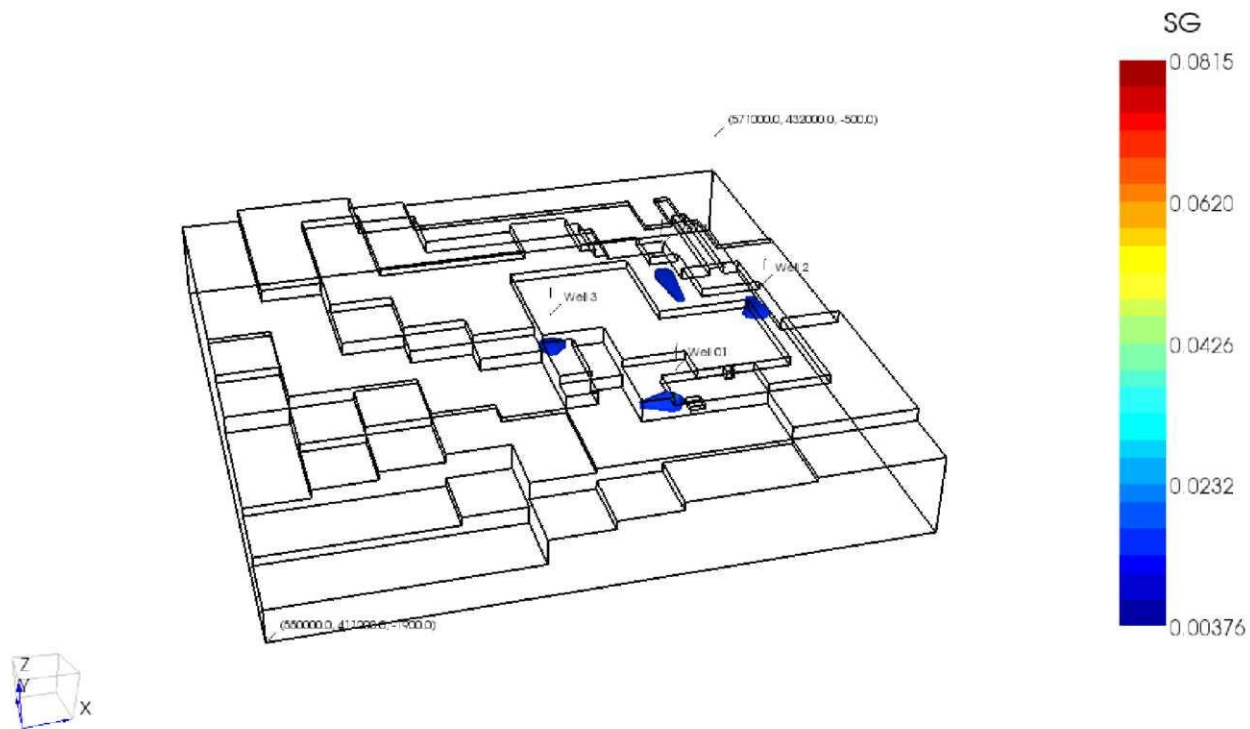


Fig.1.1.16_32 Rozkład nasycenia gazem w modelu po 60 dniach

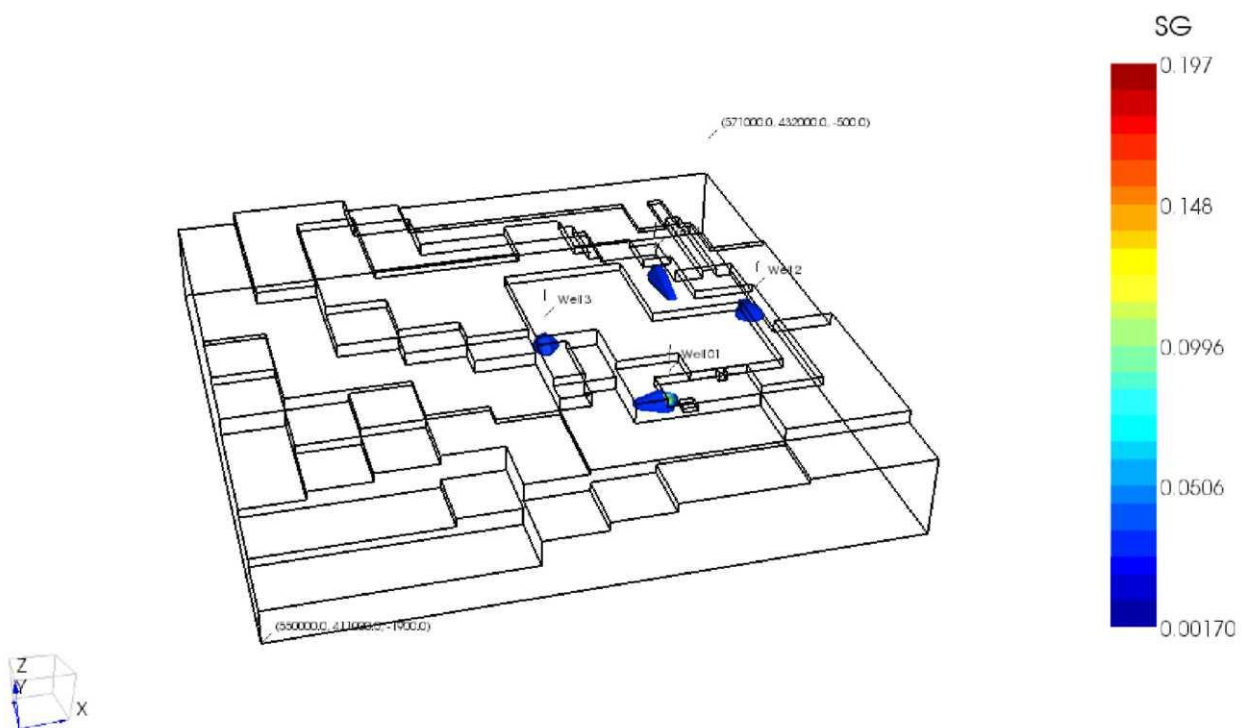


Fig.1.1.16_33 Rozkład nasycenia gazem w modelu po 1 roku

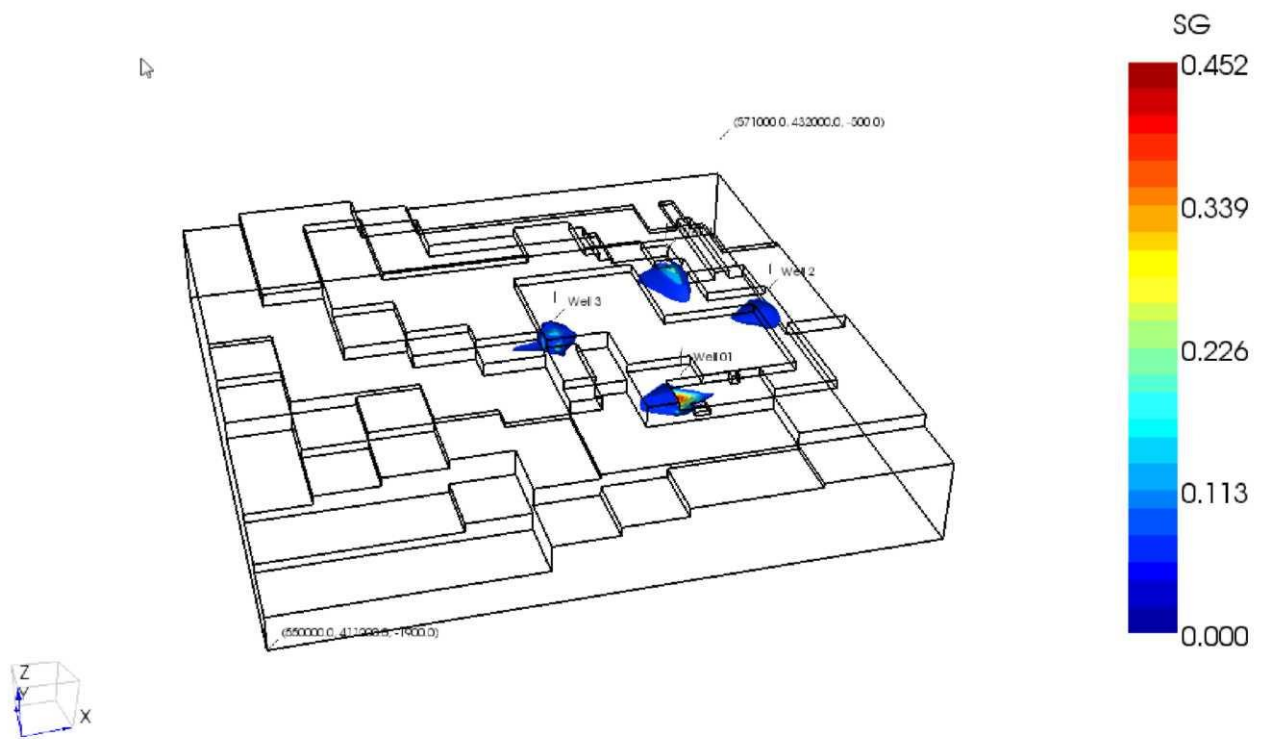


Fig.1.1.16_34 Rozkład nasycenia gazem w modelu po 5 latach

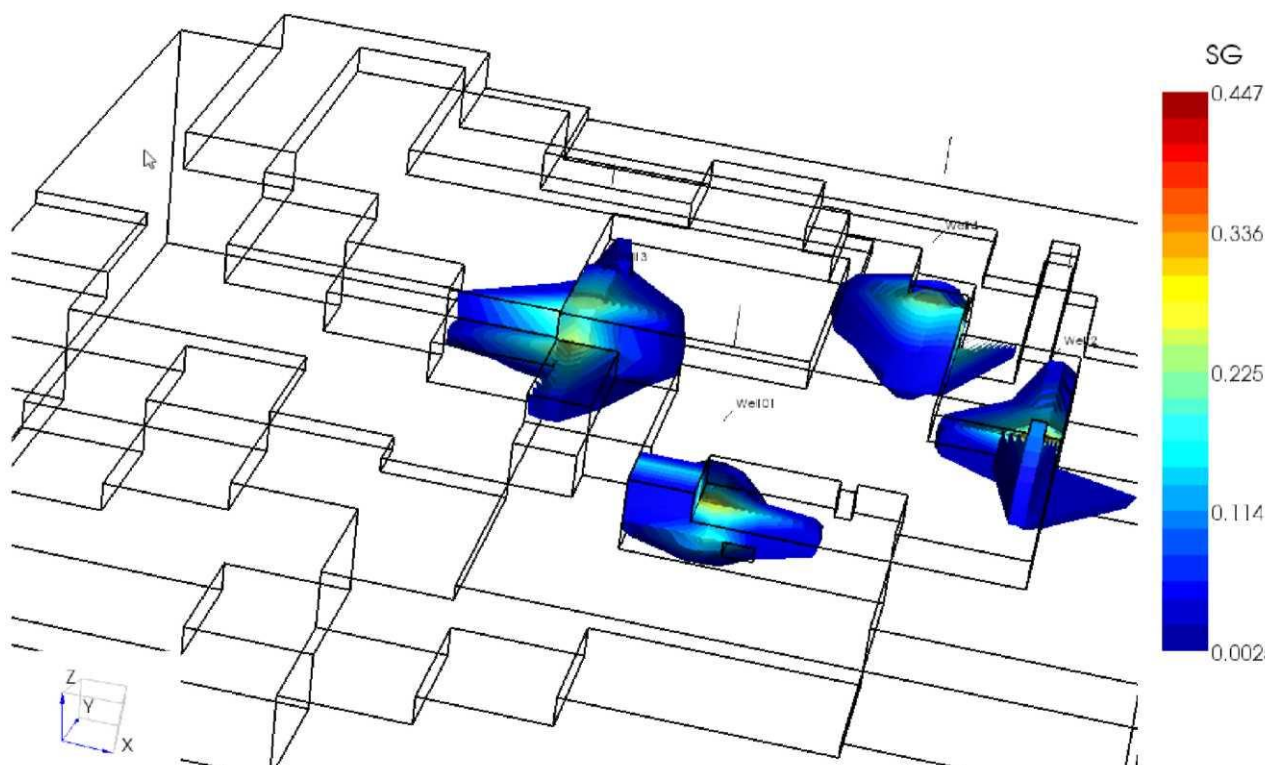


Fig. 1.1.16_35 Rozkład nasycenia gazem w modelu po 10 latach

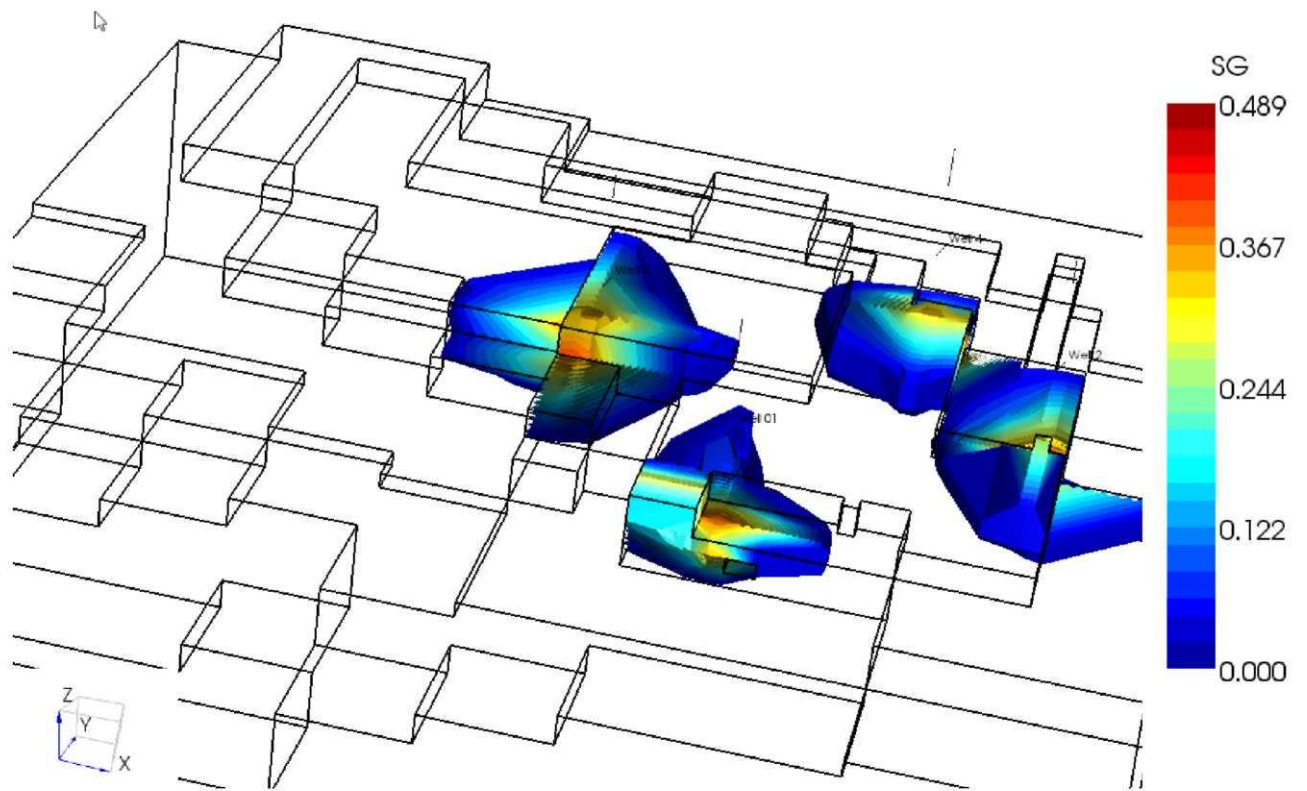


Fig.1.1.16_36 Rozkład nasycenia gazem w modelu po 20 latach

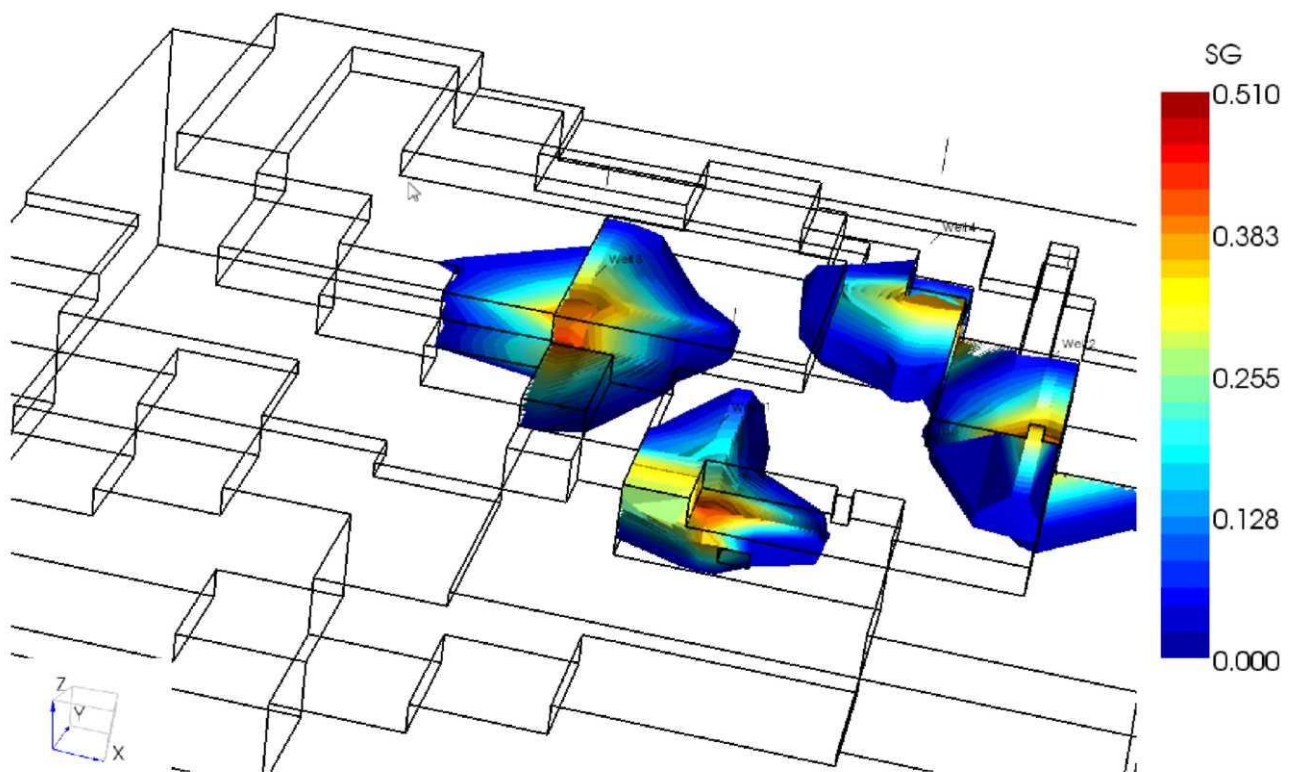


Fig.1.1.16_37 Rozkład nasycenia gazem w modelu po 50 latach

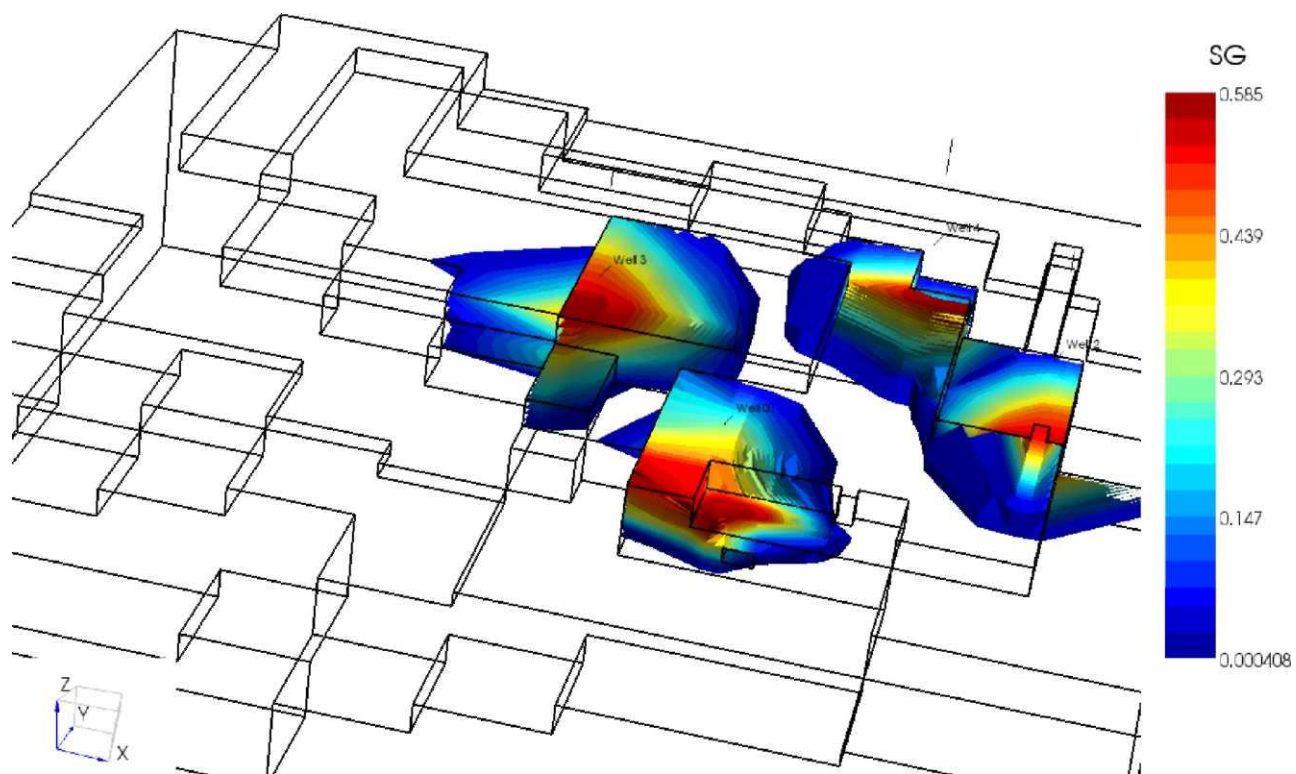


Fig.1.1.16_38 Rozkład nasycenia gazem w modelu po 100 latach

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

(Wiesław Szott, Piotr Łętkowski, Andrzej Gołąbek, Krzysztof Miłek, Andrzej Rychlicki)

W ramach prac **INiG** dokonano implementacji statycznego (geologicznego) modelu struktury i konstrukcji pełnoskalowego, trójwymiarowego modelu złożowego struktury Budziszewice-Zaosie (w utworach triasu dolnego) uzupełnionego o elementy (własności transportowe w układzie skała-płynny złożowe, termodynamiczne własności płynów złożowych i ich wzajemne oddziaływanie) niezbędne do przeprowadzenia wielowariantowych i długoczasowych symulacji procesów sekwestracji dwutlenku węgla w badanej strukturze.

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

1. wariant testowy: zatłaczanie CO₂ pojedynczym odwiertem nr 1 (B-1) w ilości 20 tys. ton/rok przez 1 rok,
2. wariant docelowy: zatłaczania 4 odwiertami (B-1, 2, 3, 4) w ilości 450 tys. ton/rok każdy przez 25 lat.

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

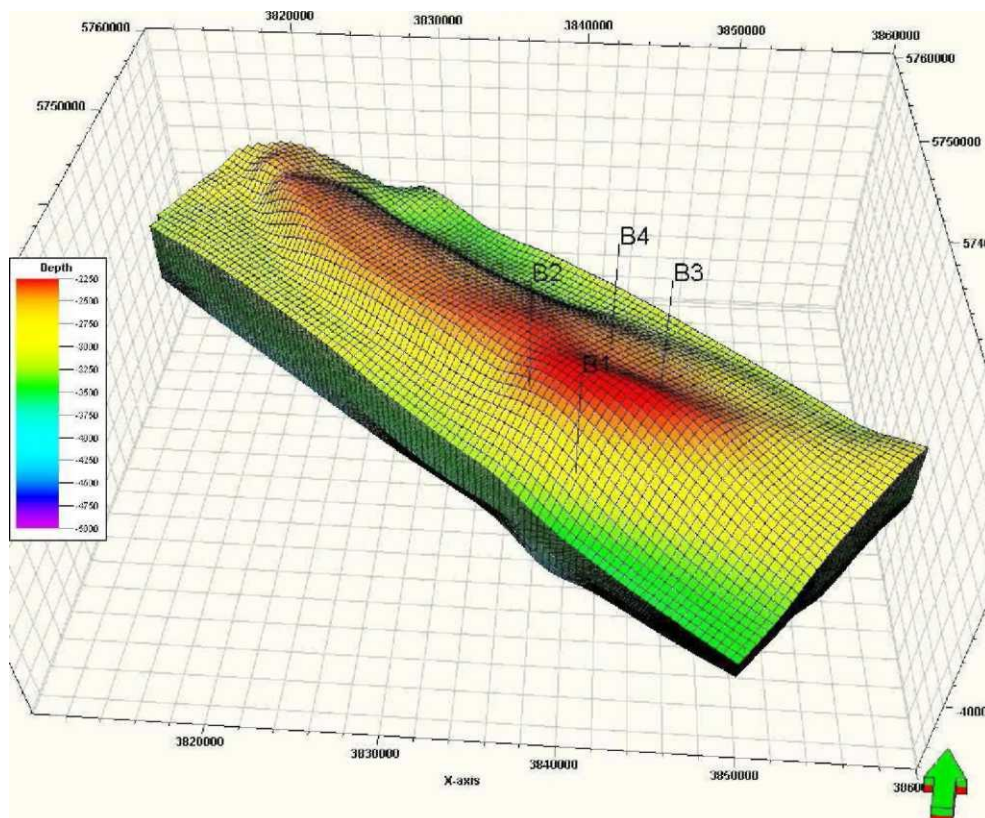


Fig.1.1.16 39 Widok przestrzenny modelu symulacyjnego z lokalizacją odwiertów

Do konstrukcji dynamicznego modelu symulacyjnego struktury w warstwach triasu dolnego wykorzystano statyczny model geologiczny struktury skonstruowany w ramach zadania 1.1.15 (Szott i in., 2009). Wyjściowy model symulacyjny składał się z 15 warstw obejmujących Tp2 i 10 warstw obejmujących Tp1. Użyto dla niego metody up-scalingu otrzymując 50 warstw modelu geologicznego o miąższościach w przedziale 17-70 m. Jako obszar sekwestracji określono rejon obejmujący zamkniętą izobatę -2550 m ppm analizowanej antykliny. Obszar ten o kształcie prostokąta posiada przybliżone wymiary 50 x17 km. Model dynamiczny skonstruowano na bazie regularnej siatki 34x103 bloków o wymiarach powierzchniowych 500x500 m. Orientacja siatki odpowiada osiom głównym struktury w kierunku NW-SE i prostopadłym. Przestrzenny widok modelu od południa pokazano na Fig.1.1.16_39.

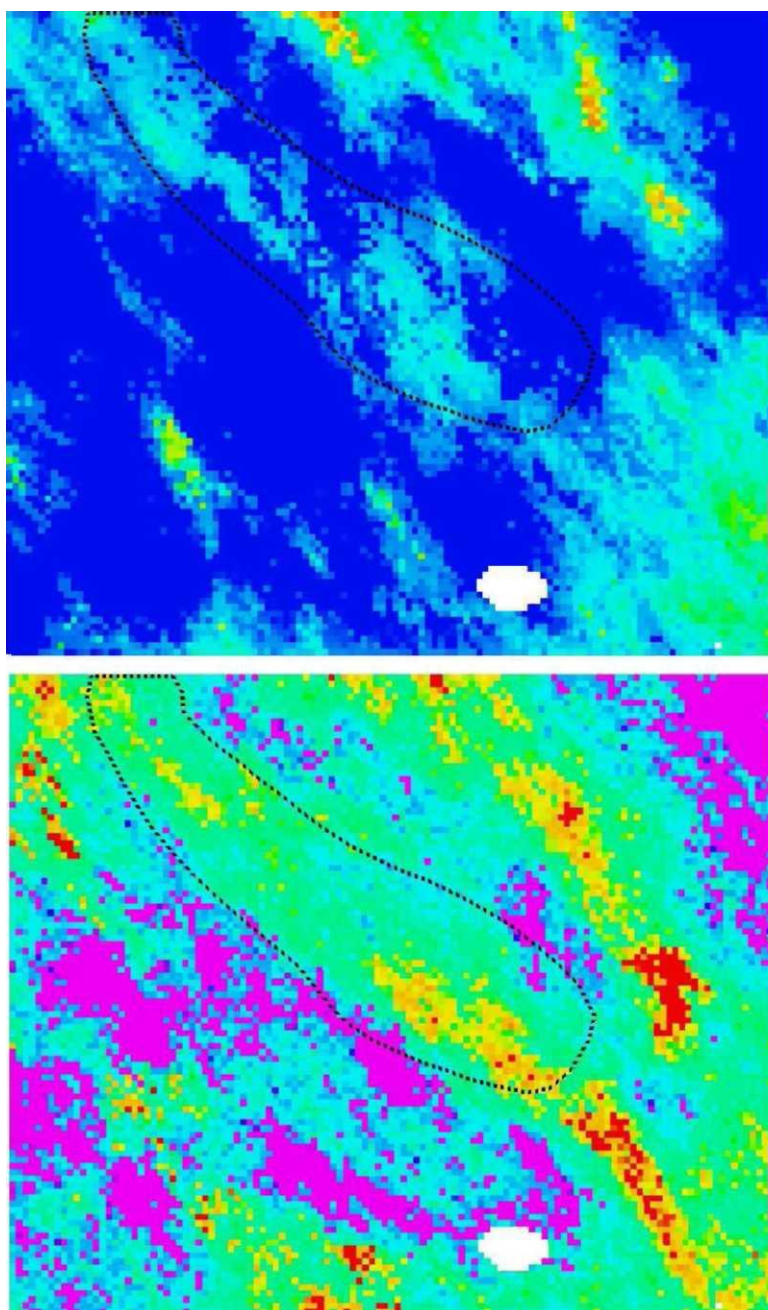


Fig.1.1.16_40 Rozkłady średniej porowatości i przepuszczalności dla Tp2, Realizacja I

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

Uzyskane w ten sposób warianty geologiczne oznaczono jako:

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

Odpowiadały one następującymi średnimi wartościami (w Tp2):

$$P_V = 154 \text{ vs } 132 \text{ tys. m}^3$$

$$k = 17_{.84} \text{ vs } 17_{.28} \text{ mD}$$

$$\text{NTG} = 0.305 \text{ vs } 0.251$$

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

Ponieważ struktura Budziszewice-Zaosie (w dolnym triasie) nie wykazuje ograniczenia powierzchniowego dlatego warstwy wodonośne okalające obszar struktury objęty modelem numerycznym symulowano przy pomocy pół-analitycznych modeli akiferów (o wymiarach 3 i 10-krotnie przewyższających wymiary obszaru modelowanego numerycznie oraz nieskończonego akifera okalającego; za Carter & Tracy, 1960). Jako szczegółowe własności (ϕ , k, h) powyższych akiferów przyjęto wielkości średnie z obszaru modelowanego numerycznie. Jako warunki początkowe panujące w strukturze przyjęto: ciśnienie: 23,1 MPa na głębokości odniesienia -2185 m ppm, temperaturę (stałą): 100°C.

Właściwości i modele płynów złożowych

Do symulacji procesów sekwestracji CO₂ w strukturze Budziszewice użyto kompozycyjnej wersji symulatora Eclipse z opcją CO₂SOL uwzględniającą rozpuszczalność CO₂ w wodzie.

W opcji tej własności termodynamiczne i transportowe CO₂ są wyznaczone z równania stanu. Na podstawie wcześniejszych doświadczeń, jako optymalne zastosowano 3-parametrowe równanie stanu Penga-Robinsona z poprawką Peneloux. Do określenia lepkości CO₂ użyto korelacji Lorentza-Braya-Clarka (1964) ze standardowymi parametrami.

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

Wyznaczono i/lub zaimportowano następujące wielkości: gęstość solanki martwej, ρ_w , mineralizacja solanki, Sw, ściśliwość, Cw, rozpuszczalność CO₂ w solance, RscO₂, lepkość solanki σ_w .

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

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

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

Ścisłość izotermiczna solanki, c_w .

Rozpuszczalność CO₂ w solance - użyto ogólnie przyjętych korelacji (MIDCARB Sequestration Calculator) dla rozpuszczalności CO₂ w solance, R_{CO_2} w zależności od temperatury, T, ciśnienia, p i zasolenia, S_w . Uwzględniono wynik pomiarów (Warnecki i in., 2009) dla rozpuszczalności CO₂ w solance dla struktury Budziszewice poprzez czynnik korekcyjny wprowadzony do powyższych zależności.

Lepkość solanki, jako funkcję temperatury, T, ciśnienia, p, i zasolenia, S_w wyznaczono przy pomocy następujących korelacji: zależność od T i S wg I. Ershaghi et al. (1983); zależność od p wg D. Numbere et al. (1977). Pominięto zależność μ_w od zawartości rozpuszczonego CO₂ zgodnie z Seyegh & Najman (1987).

Założenia eksploatacyjne procesu sekwestracji

Przyjęto dwa scenariusze zatłaczania CO₂ do struktury Budziszewice-Zaosie (poziom: trias dolny):

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

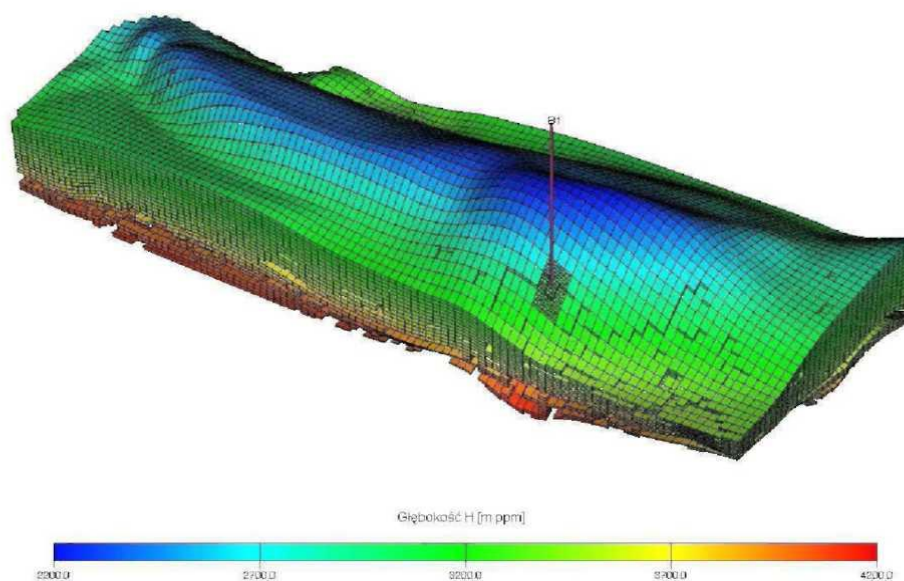


Fig.1.1.16_41 Model struktury z zaznaczonym obszarem odwiertu B-1

Odwierty, zgodnie z otrzymanymi założeniami, są typu pionowego. Położenie odwiertów pokazano na **Fig.1.1.16_39** na tle przestrzennej struktury modelu symulacyjnego. Wszystkie 4 odwierty udostępniają 15 górnych warstw w utworach średniego pstrego piaskowca (Tp2) o wyraźnie lepszych właściwościach od niżej leżących warstw dolnego pstrego piaskowca (Tp1). Symulacje procesów migracji prowadzono przez 200/1000 lat po zakończeniu zatłaczania (tzw. okres relaksacji). Dla każdego z powyższych scenariuszy rozpatrzono po dwa warianty o zróżnicowanej geologii (Realizacja I i II) i po 3 warianty z różnym stopniem otwartości hydrodynamicznej.

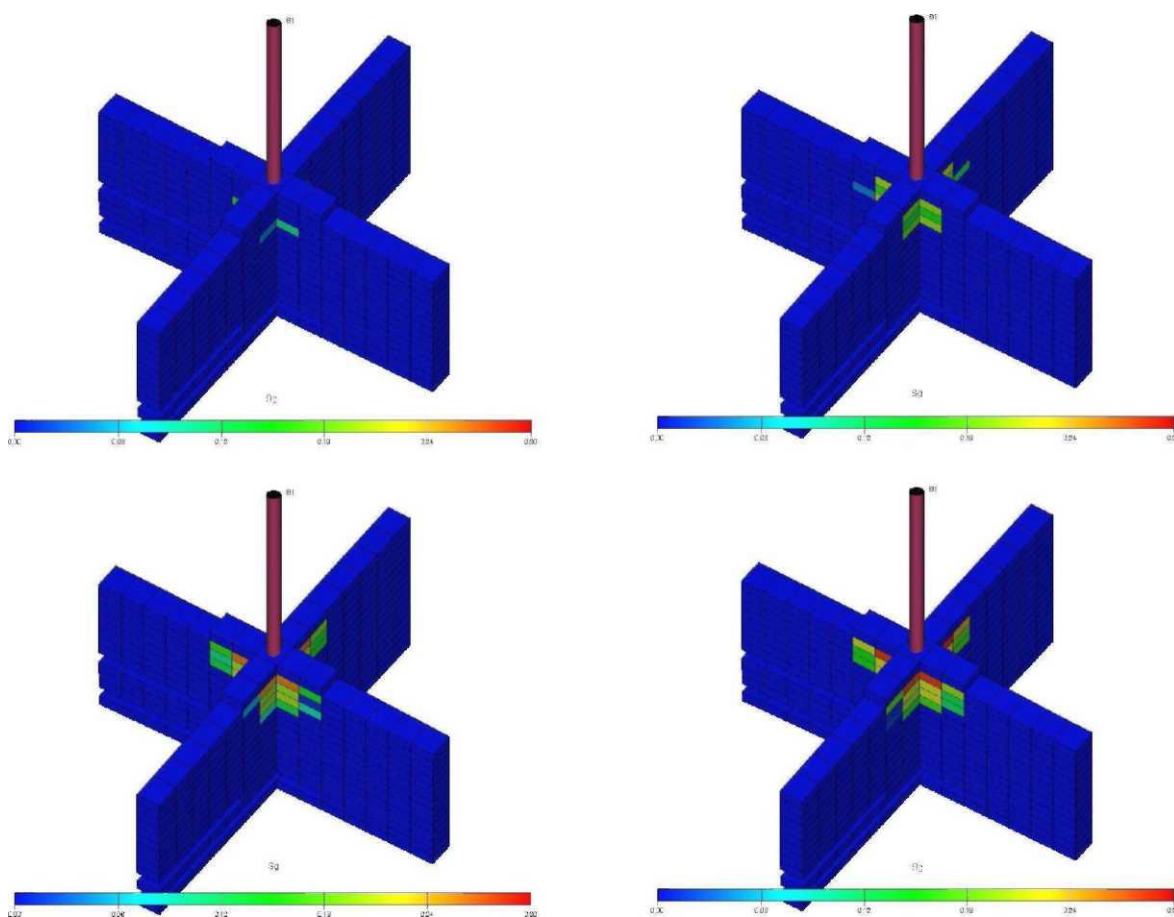


Fig.1.1.16_42 Rozkład nasycień swobodnego CO₂ na przekrojach wokół otworu B-1 po 3 miesiącach od rozpoczęcia zatłaczania (lewy, góra), 6 miesiącach (prawy, góra), 9 miesiącach (lewy, dół) i 12 miesiącach (prawy, dół; koniec zatłaczania)

Symulacje procesu sekwestracji - wariant testowy

W wariantcie tym utrzymano stałą dobową wydajność zatłaczania CO₂, $q_{inj} = 27719 \text{ Nm}^3/\text{d}$ odwiertem B-1 odpowiadającą sumarycznemu zatłoczeniu: $G_{inj} = 10117 \text{ tys. Nm}^3$. Poniższe wyniki odnoszą się do Realizacji I oraz do nieskończonego systemu hydrodynamicznego (akifera) otaczającego analizowaną strukturę.

W wyniku zatłaczania CO₂ w strukturze obserwuje się powstanie i ewolucję strefy czystego CO₂ wokół odwiertu. Ze względu na właściwości poszczególnych warstw w Tp2 oraz dominujące znaczenie sił wyporu, CO₂ koncentruje się w górnych warstwach.

Rozkłady nasycień CO₂ w 2 wzajemnie prostopadłych przekrojach pionowych przechodzących przez odwiert B-1 (patrz **Fig.1.1.16_41**) pokazano na **Fig.1.1.16_42** po 3, 6, 9 i 12 miesiącach od rozpoczęcia zatłaczania. Figury te obrazują rozwój strefy wolnego CO₂ w całym okresie zatłaczania.

W trakcie zatłaczania CO₂ do strefy zachodzi proces jego rozpuszczania się w solance. Obszar intensywnego rozpuszczania pokrywa się z obszarem nasyconym swobodnym CO₂. Rozkłady ilości rozpuszczonego CO₂ w postaci ułamka molowego przedstawiono dla podanych powyżej chwil czasowych na **Fig.1.1.16_43**.

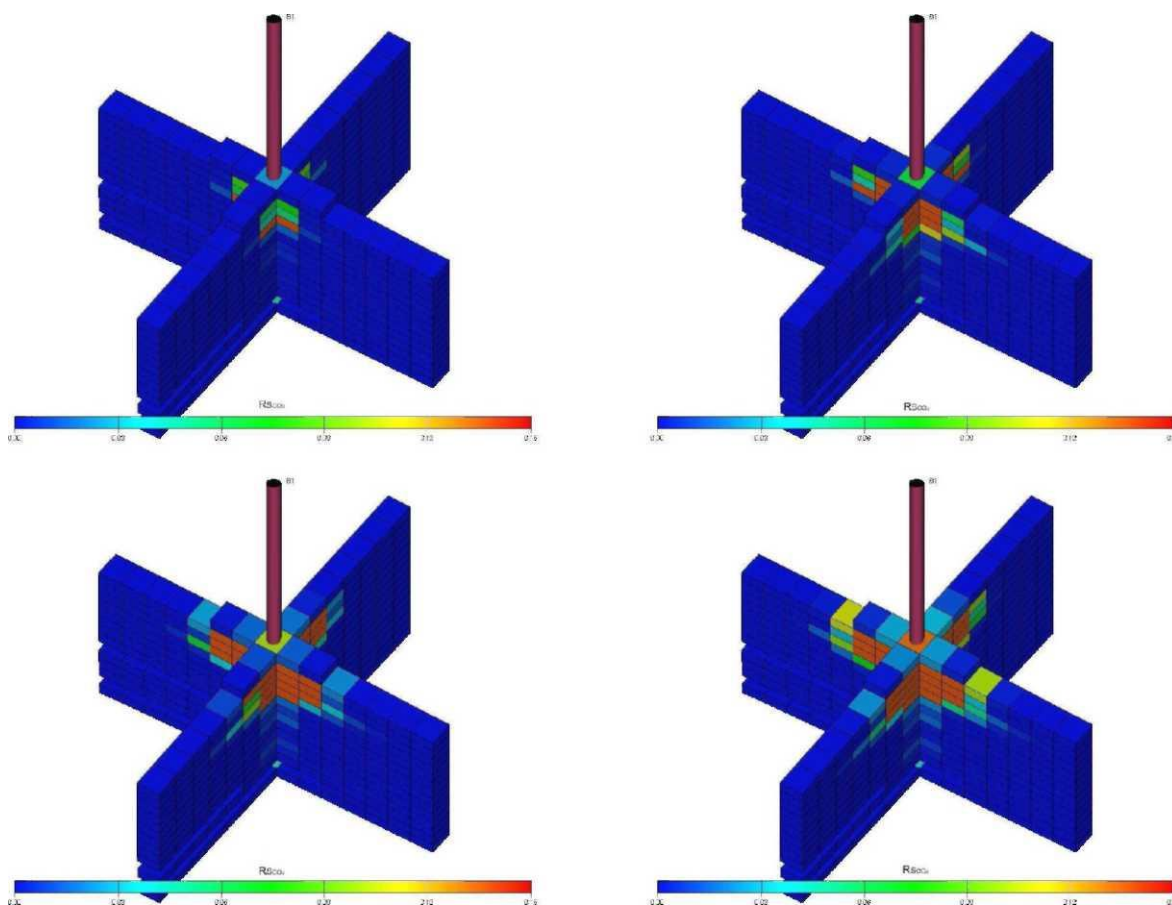


Fig.1.1.16_43 Rozkład CO₂ rozpuszczonego w solance (R_{scO_2} - ułamek molowy) na przekrojach wokół otworu B-1 po 3 miesiącach od rozpoczęcia zatłaczania (lewy, góra), 6 miesiącach (prawy, góra), 9 miesiącach (lewy, dół) i 12 miesiącach (prawy, dół; koniec zatłaczania)

Celem zbadania długoczasowych procesów, którym poddany jest CO₂ zatłaczany do analizowanej struktury w wariancie testowym przeprowadzono symulacje przez kolejne 200 lat po zakończeniu zatłaczania. Pozwoliły one wykazać istotne zmiany w sekwestracji CO₂ w postaci:

1. dalszego rozpuszczania się CO₂ w solance aż do zupełnego zaniku fazy swobodnej,
2. konwekcji solanki pod wpływem zmian jej gęstości w efekcie rozpuszczania się CO₂.

Rozkłady nasycen swobodnego CO₂, s_g , wraz z upływem czasu po zakończeniu zatłaczania przedstawiono na **Fig.1.1.16_44** dla kolejnych okresów 3-miesięcznych. Obrazują one stopniową redukcję fazy swobodnej na skutek zjawiska rozpuszczania się CO₂ w solance. W ciągu roku od zakończenia testowego zatłaczania spadek ten jest bardzo znaczący. W dłuższej skali czasowej obserwuje się zjawisko konwekcji i opadania solanki z rozpuszczonym CO₂. Odpowiednie rozkłady CO₂ rozpuszczonego w solance (R_{CO2} [ułamek molowy]) przedstawiono na **Fig.1.1.16_45** odpowiednio dla 3, 7, 11, 15, 19, 49, 99 i 199 lat po zakończeniu zatłaczania.

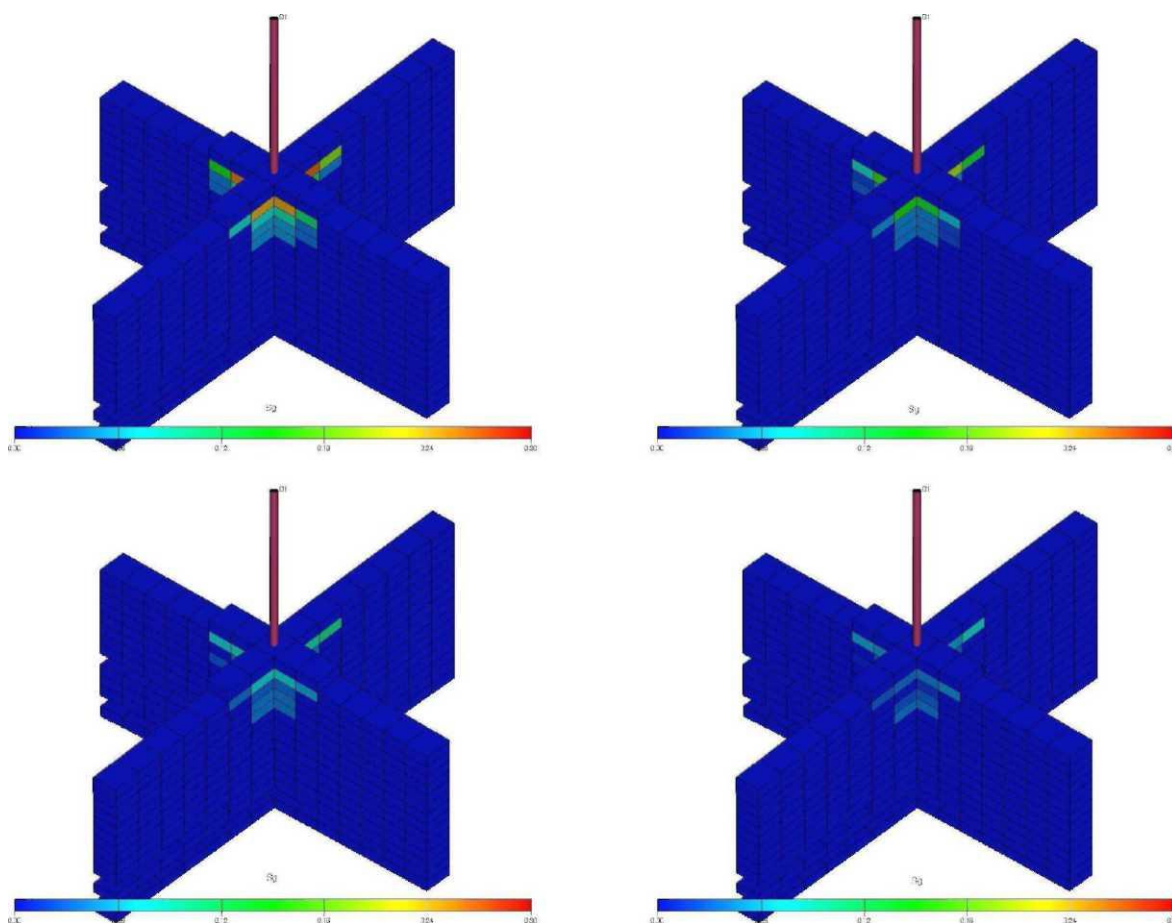


Fig.1.1.16_44 Rozkład nasycen swobodnego CO₂ na przekrojach wokół otworu B-1 po 3 miesiącach od zakończenia zatłaczania (lewy, góra), 6 miesiącach (prawy, góra), 9 miesiącach (lewy, dół) i 12 miesiącach (prawy, dół)

W trakcie symulacji procesu sekwestracji rejestrowano ciśnienia na spodzie odwiertu oraz w obrębie całej modelowanej struktury. Z punktu widzenia znaczenia dla przebiegu procesu i jego ograniczeń najistotniejsze są:

1. maksymalne przewyższenie ciśnienia na stropie struktury ze względu na kwestie szczelności skał nadkładu,
2. maksymalne ciśnienie w całej strukturze (gradient ciśnienia z głębokością) w związku z niebezpieczeństwem indukowania niekontrolowanych szczelin,
3. ciśnienia dynamiczne w odwiertach ze względu na konieczność doboru instalacji napowierzchniowych.

Maksymalne ciśnienia na stropie w postaci jego przewyższenia w stosunku do wartości pierwotnej przedstawiono na **Fig.1.1.16_46**. Przewyższenie to nie przekracza 0,9 MPa, tj. 3% pierwotnego ciśnienia na stropie. Wartość maksymalnego gradientu ciśnienia z głębokością w całej objętości struktury nie przekracza 0.011 MPa/m i jest wyraźnie mniejszy od typowych gradientów szczelinowania w skałach analizowanego typu.

Ciśnienie na spodzie odwiertu zatłaczającego, PBHP, w funkcji czasu gwałtownie spada po zakończeniu zatłaczania i rok później osiąga wartość zbliżoną do ciśnienia pierwotnego.

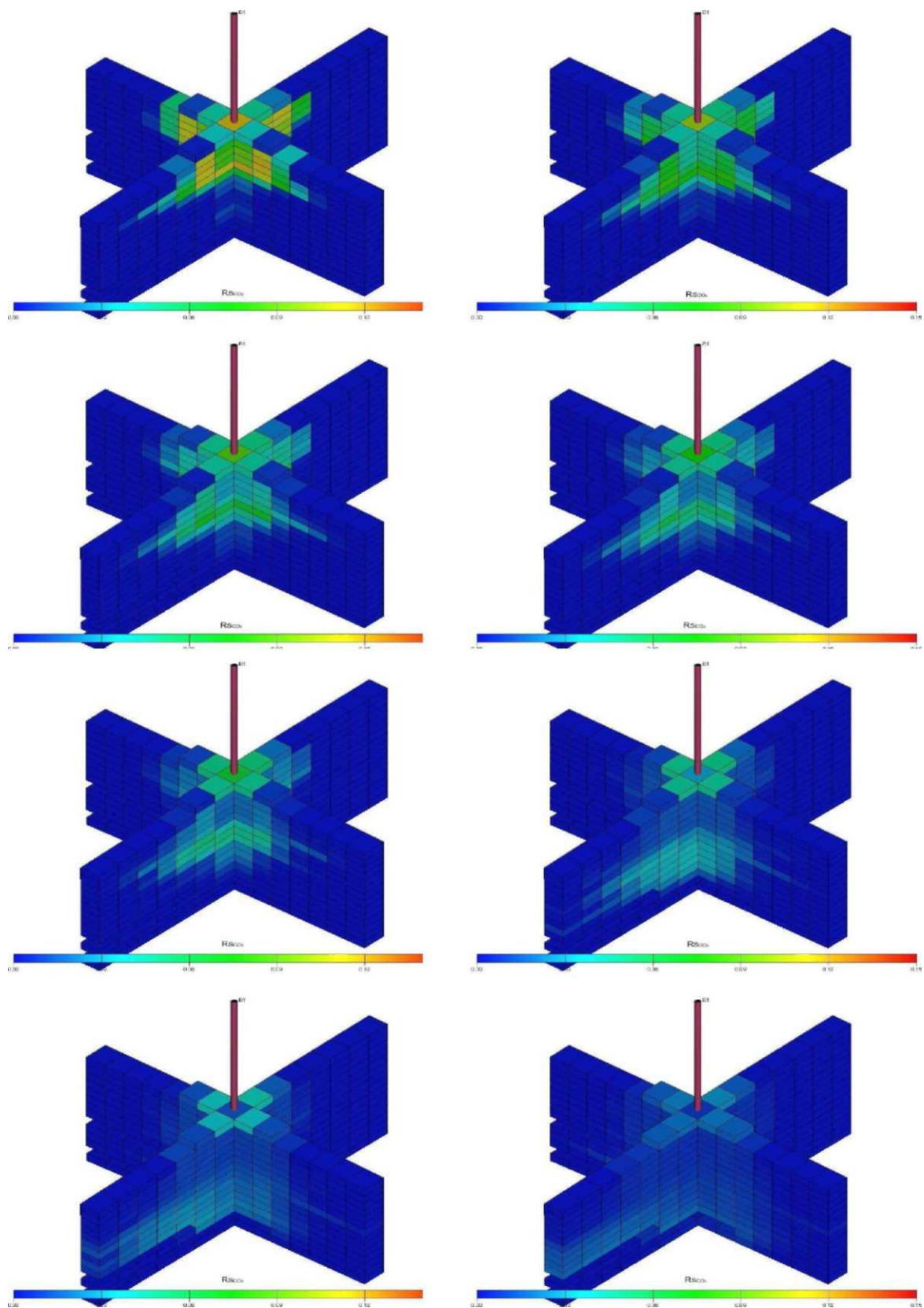


Fig.1.1.16_45 Rozkład CO₂ rozpuszczonego w solance (R_{sc02} - ułamek molowy) na przekrojach wokół otworu B-1 po 3 latach od rozpoczęcia zatłaczania (lewy, góra), 7, 11, 15, 19, 49, 99 i 199 latach (prawy, dół)

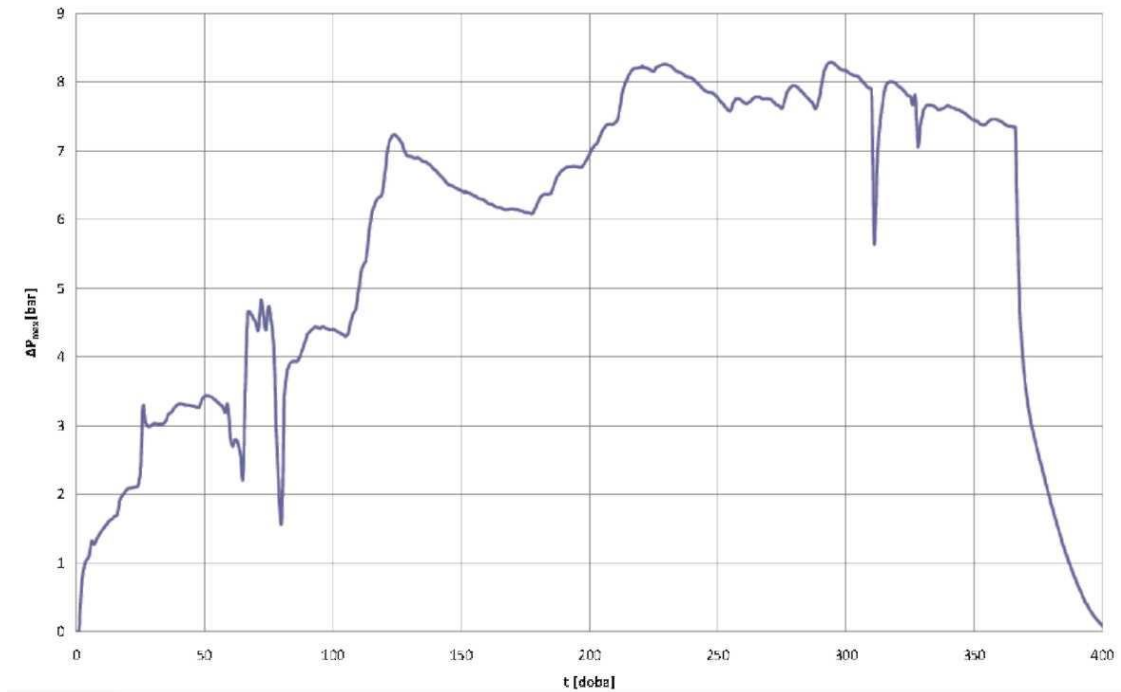


Fig.1.1.16_46 Maksymalne przewyższenie ciśnienia A_{pmax} na stropie struktury w funkcji czasu zatłaczania, t

Zmiany ciśnienia charakteryzują się silnymi fluktuacjami w okresie zatłaczania spowodowanymi dużym stopniem niejednorodności struktury oraz podwójnym czasem relaksacji do ciśnienia pierwotnego: pierwsza faza relaksacji trwa kilka miesięcy, obejmuje ponad 90% zmian ciśnienia i związana jest głównie ze zjawiskiem rozpuszczania się CO_2 w solance, podczas gdy druga faza trwa co najmniej 20 lat, dotyczy zmian ciśnienia poniżej 0,1 MPa i odpowiada zjawisku konwekcji.

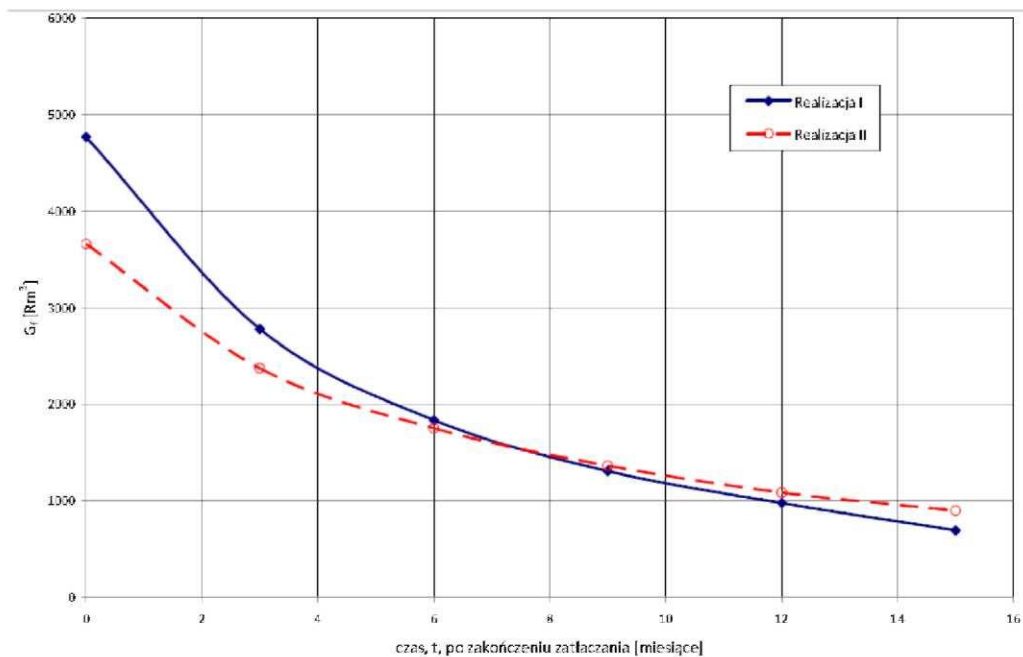


Fig.1.1.16_48 Porównanie zmian w czasie ilości swobodnego CO_2 w strukturze

Ze względu na niepewność w określeniu podstawowych parametrów geologicznych struktury (porowatość, przepuszczalność itd.) wyrażający się istnieniem wielu statystycznie równorzędnych realizacji rozkładów tych parametrów zbadano wpływ nieoznaczoności tych wielkości na podstawowe wyniki symulacji procesu sekwestracji. Procedurę tą zrealizowano poprzez wybór 2 realizacji rozkładów dla każdego z istniejących parametrów geologicznych. Skonstruowano dla nich kompletne modele symulacyjne i przeprowadzono zestaw analogicznych symulacji prognostycznych. W rezultacie otrzymano zróżnicowane wyniki dla zmiennych w czasie rozkładów nasycenia CO₂, ilości CO₂ rozpuszczonego w solance oraz przebiegu ciśnień w odwiertach i pozostałych ciśnień charakteryzujących proces. Spośród analizowanych wielkości najbardziej systematyczną różnicę wykazują wykresy ilości swobodnego CO₂ w funkcji czasu (**Fig. 1.1.16_48**) wynikającą z warunków wpływających na tempo rozpuszczania się CO₂ w solance, co w dużym stopniu zależy od efektywnej powierzchni kontaktu CO₂-solanka.

Wariant docelowy - odwierty B1, B2, B3, B4

W wariantcie tym założono zatłaczanie CO₂ czterema odwiertami (B-1, B-2, B-3, B4) ze stałą wydajnością tłoczenia $q_{inj} = 623.7$ tys. Nm³/d każdym z odwiertów przez 25 lat z sumarycznym zatłoczeniem $G_{inj} = 5.695 \times 10^9$ Nm³/odwiert.

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

Efektom zatłaczania CO₂ do struktury jest powstanie i rozwój stref wolnego CO₂ wokół każdego z odwiertów zatłaczających. Ze względu na relatywnie znaczne odległości między poszczególnymi odwiertami strefy te nie interferują ze sobą. Pomimo identycznych ilości CO₂ tłoczonych przez każdy z odwiertów rozmiary omawianych stref są zróżnicowane ze względu na silnie niejednorodne rozkłady właściwości zbiornikowych (decydujące znaczenie mają tu rozkłady porowatości). Cechy te są widoczne na **Fig. 1.1.16_48**, na których pokazano rozkłady nasycień CO₂, S_g, wzdłuż pionowych przekrojów wokół odwiertów zatłaczających dla kolejnych chwil czasowych, tj. odpowiednio po 6, 10, 16 i 25 latach od rozpoczęcia zatłaczania. Figury te obrazują nie tylko oczywisty proces zwiększania się stref CO₂, ale również jego migrację do góry w kierunku stropu i dalej w tym samym kierunku wzdłuż stropu z powodu dominujących sił wyporu.

Innym istotnym efektem jest rozpuszczanie się zatłaczanego CO₂ w solance. Rozkłady rozpuszczonego CO₂, R_{SCO₂} (w ułamkach molowych) wokół odwiertów i ich zmiany w czasie przedstawiono na **Fig.1.1.16_49** dla powyższych chwil czasowych. Obszary solanki z rozpuszczonym CO₂ odpowiadają miejscom, do których dotarł zatłaczany gaz albo na skutek bezpośredniego wtłaczania w strefę przyodwiertową albo w efekcie migracji wyporowej. W odróżnieniu od nasycień swobodnym CO₂, solanka z rozpuszczonym gazem nie migruje ku górze, ale przeciwnie, wykazuje tendencję opadania, choć jest to proces znacznie wolniejszy od migracji wyporowej gazu i będzie lepiej widoczny w dłuższej skali czasowej przedstawionej w kolejnym rozdziale. Ważnym dla procesu sekwestracji efektem jest obecność solanki z rozpuszczonym CO₂ na znacznie większym obszarze aniżeli końcowy obszar nasycony gazem swobodnym.

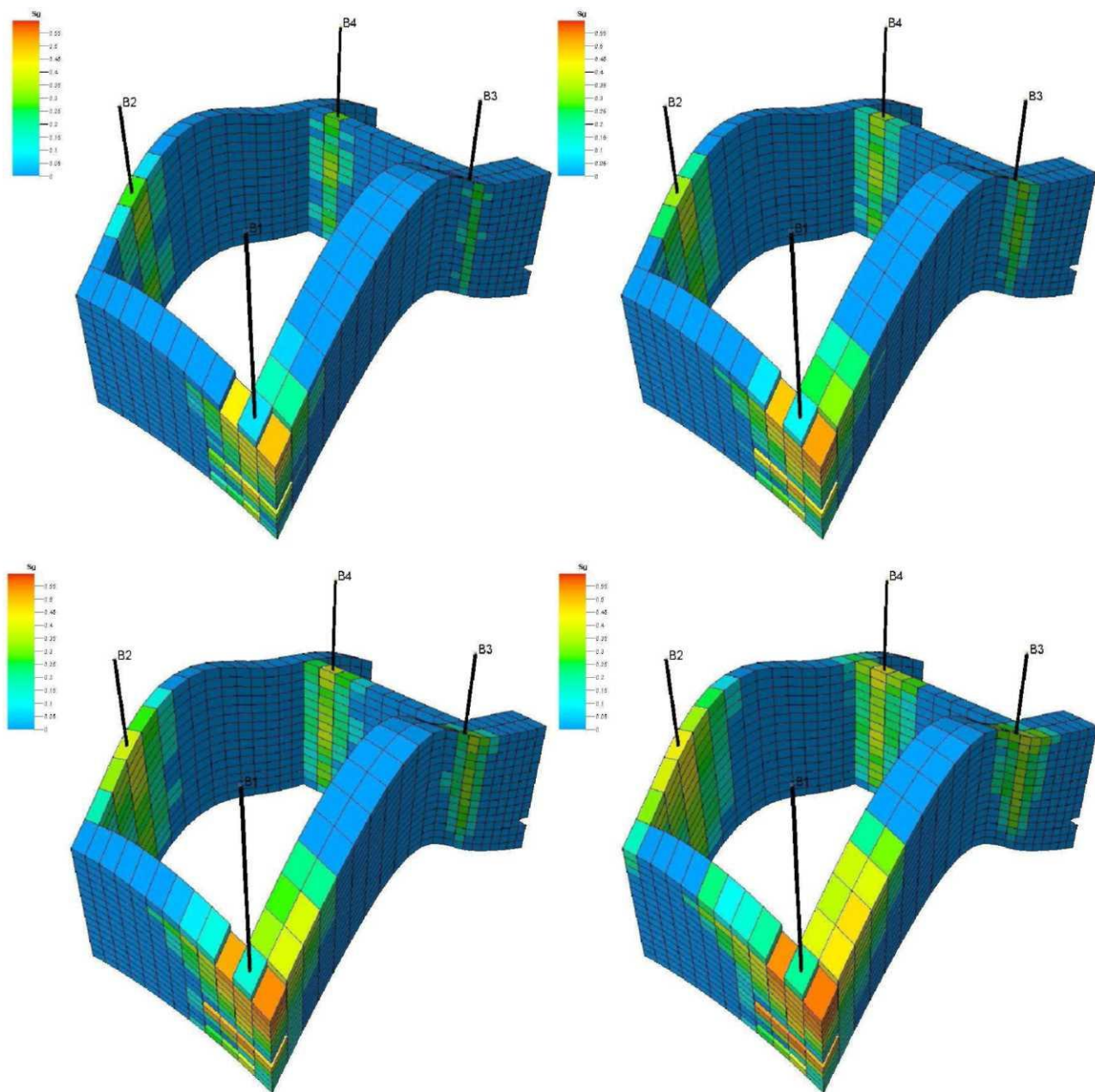


Fig.1.1.16_48 Rozkład nasycień swobodnego CO₂ na przekrojach wokół otworów zatłaczających po 6 latach od rozpoczęcia zatłaczania (lewy, góra), 10 latach (prawy, góra), 16 latach (lewy, dół) i 25 latach (prawy, dół; koniec zatłaczania)

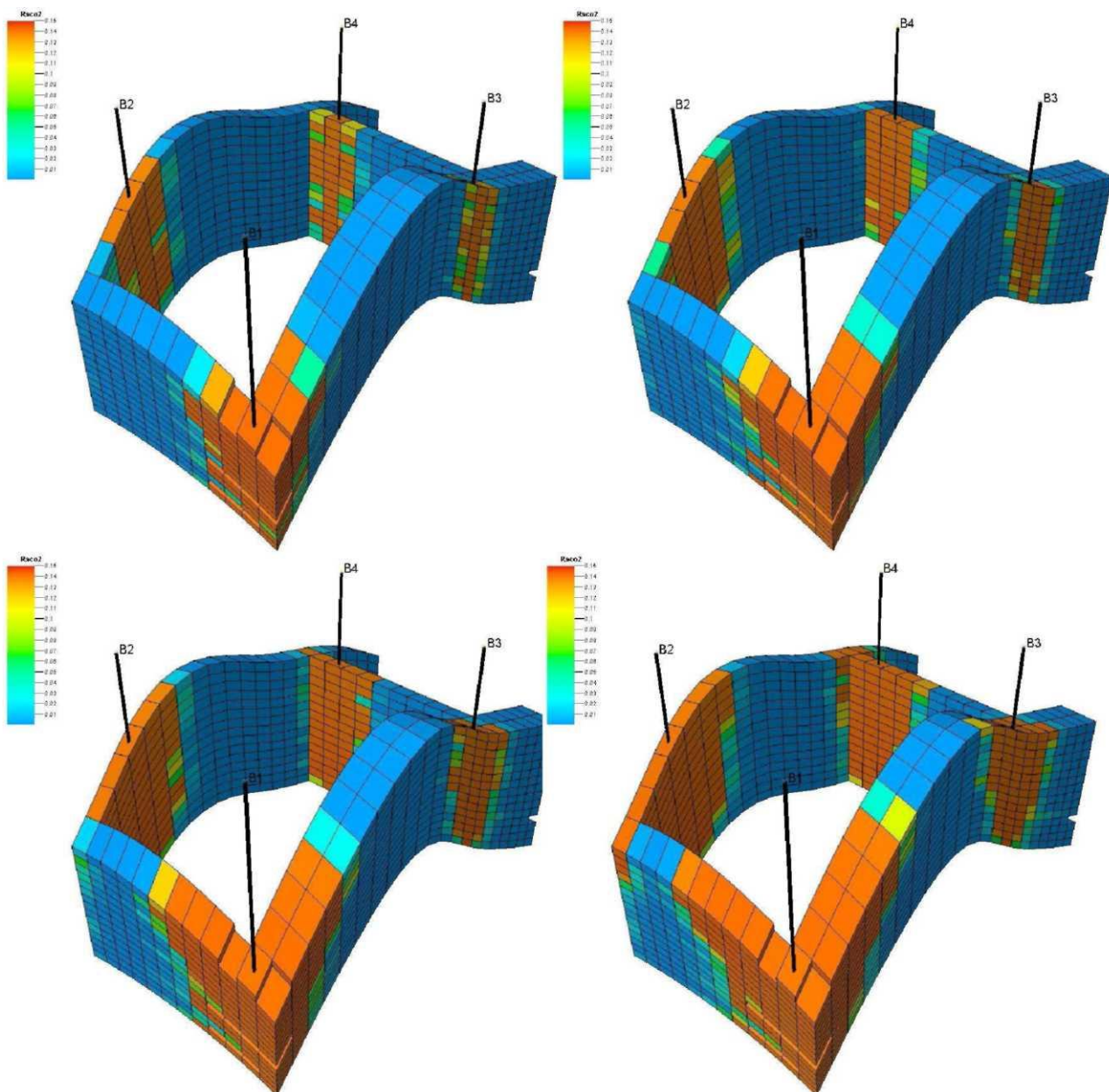


Fig.1.1.16_49 Rozkład CO₂ rozpuszczonego w solance (RscO₂- ułamek molowy) na przekrojach wokół otworów zatłaczających po 6 latach od rozpoczęcia zatłaczania (lewy, góra), 10 latach (prawy, góra), 16 latach (lewy, dół) i 25 latach (prawy, dół; koniec zatłaczania)

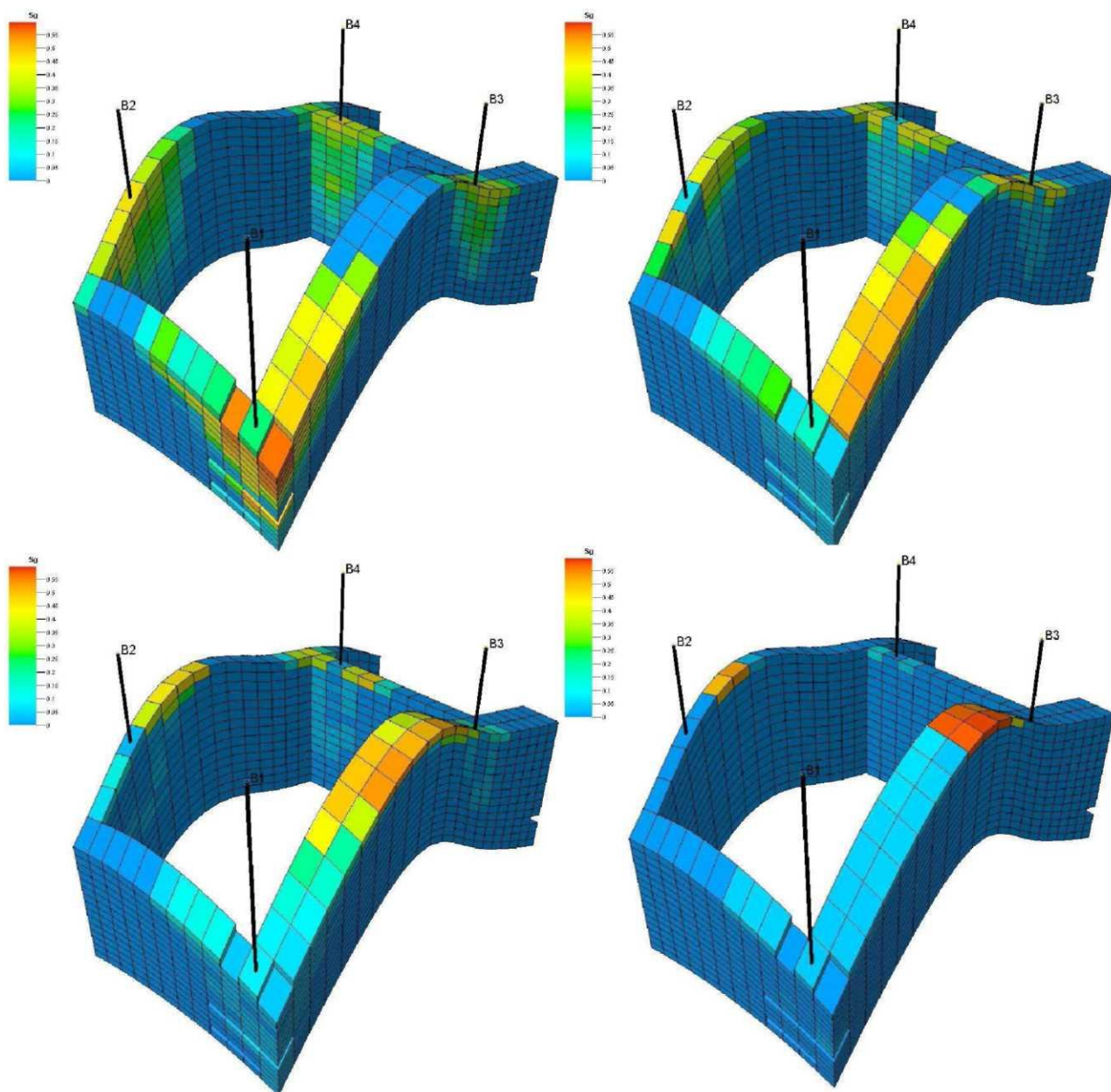


Fig.1.1.16_50 Rozkład nasycień swobodnego CO₂ na przekrojach wokół otworów zatłaczających po 6 latach od zakończenia zatłaczania (lewy, góra), 20 latach (prawy, góra), 45 latach (lewy, dół) i 200 latach (prawy, dół)

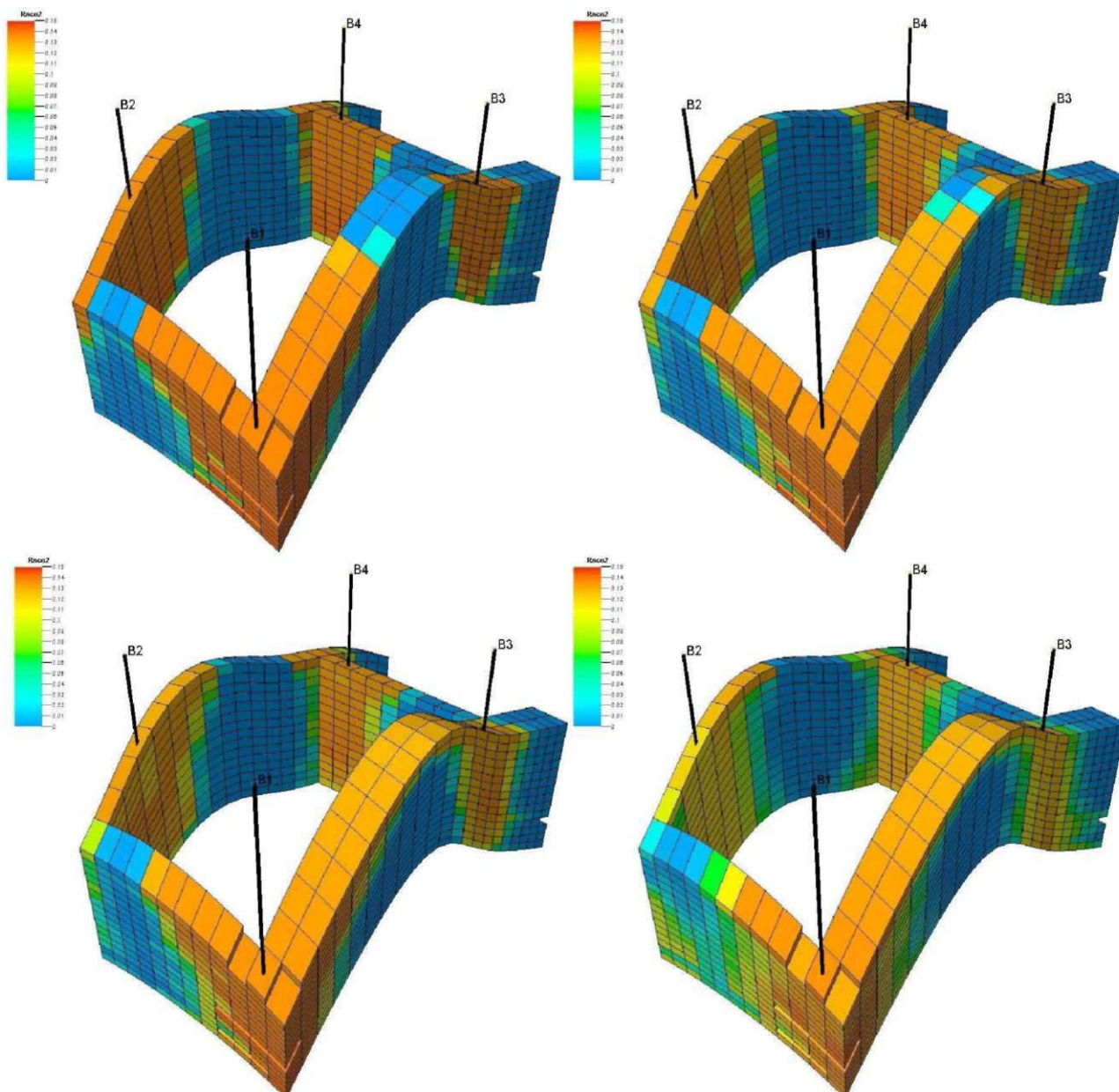


Fig.1.16_51 Rozkład CO₂ rozpuszczonego w solance (RscO₂- ułamek molowy) na przekrojach wokół otworów zatłaczających po 6 latach od zakończenia zatłaczania (lewy, góra), 20 latach (prawy, góra), 45 latach (lewy, dół) i 200 latach (prawy, dół)

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

1. kontynuację przemieszczania się swobodnego CO₂ ku górze - w tym okresie jest to głównie migracja warstwami przystropowymi w kierunku lokalnego szczytu struktury.

2. dalsze rozpuszczanie się CO₂ w solance - jest to proces bardzo efektywny ze względu na poszerzony kontakt CO₂ z nienasyconą solankę w efekcie zjawisk opisanych w punkcie 1, i 3.
3. konwekcja solanki pod wpływem zmian jej gęstości (wzrostu) w efekcie rozpuszczania się CO₂.

Zjawiska powyższe zilustrowano zmiennymi w czasie:

- a) rozkładami swobodnego CO₂, S_g, zarejestrowanymi dla 6, 10, 20, 45, i 200 lat po zakończeniu zatłaczania na **Fig.1.1.16_50**- migracja CO₂, zanik fazy gazu swobodnego na skutek rozpuszczania.
- b) rozkładami CO₂ rozpuszczonego, R_{scO2} dla czasów j.w. na **Fig.1.1.16_51**
 - wzrost objętości obszaru solanki z rozpuszczonym CO₂,
 - opadanie solanki z rozpuszczonym CO₂ (konwekcja).

Tak jak dla wariantu testowego poniżej scharakteryzowano wyniki dla:

1. maksymalnego przewyższenia ciśnienia na stropie struktury ze względu na szczelność skał nadkładu,
2. maksymalnego ciśnienia w całej objętości struktury (gradientu ciśnienia z głębokością) ze względu na niebezpieczeństwo powstania szczelin,
3. ciśnień dynamicznych na spodzie odwiertów ze względu na techniczne parametry sekwestracji.

Maksymalne przewyższenie ciśnień na stropie struktury przedstawiono na **Fig.1.1.16_52**i wynosi ono 11,8 MPa i 42%. Maksymalny gradient ciśnienia z głębokością w całej objętości struktury wynosi ok. 0.0152 MPa/m. Ciśnienie na spodzie odwiertów zatłaczających PBHP w funkcji czasu spada gwałtownie po zakończeniu zatłaczania a w okresie następnych 20-30 lat praktycznie stabilizuje się. Wszystkie odwierty wykazują maksymalny wzrost ciśnień na koniec okresu zatłaczania wynoszący od 9.85 MPa dla B-3 do 11.96 MPa dla B-1. Analogicznie wszystkie 4 odwierty charakteryzuje czas relaksacji ciśnienia po zakończeniu zatłaczania wynoszący ok. 35 lat. W późniejszym okresie obserwuje się niewielkie zmiany ciśnień w odwiertach w skali czasowej setek lat.

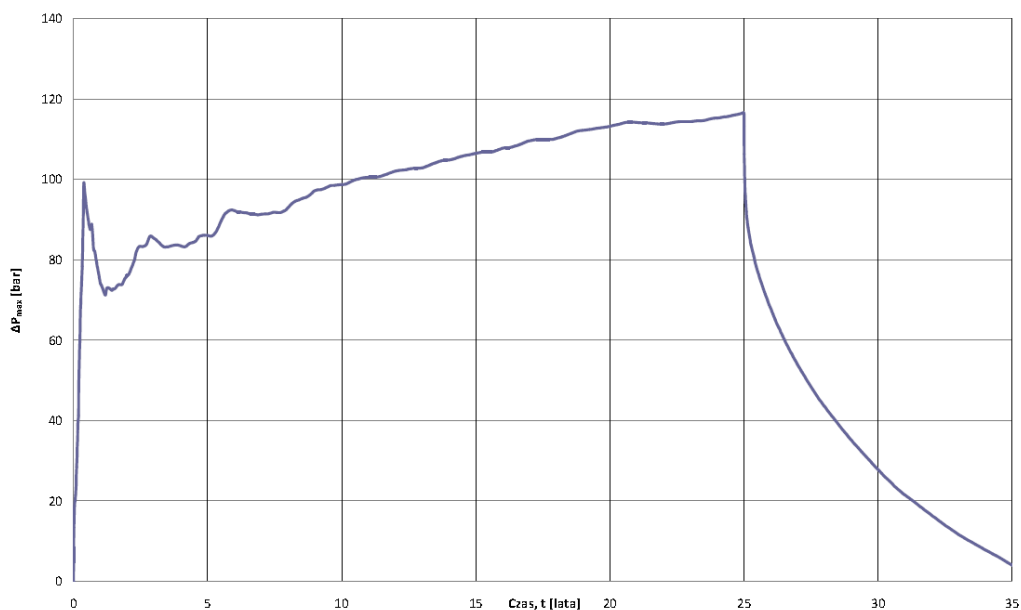


Fig.1.1.16_53 Maksymalne przewyższenie ciśnienia Δp_{\max} na stropie struktury w funkcji czasu zatłaczania, t

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

W niniejszym wariantcie objętość zatłoczonego gazu wynosi ok. 75×10^6 Rm³ co stanowi 1.67×10^{-2} objętości porów modelowanej struktury. W konsekwencji zmiany ciśnień zauważalne są dopiero po zakończeniu zatłaczania i nie przekraczają 0,2 MPa (dla akifera 3-krotnego względem akifera 10-krotnego i nieskończonego).

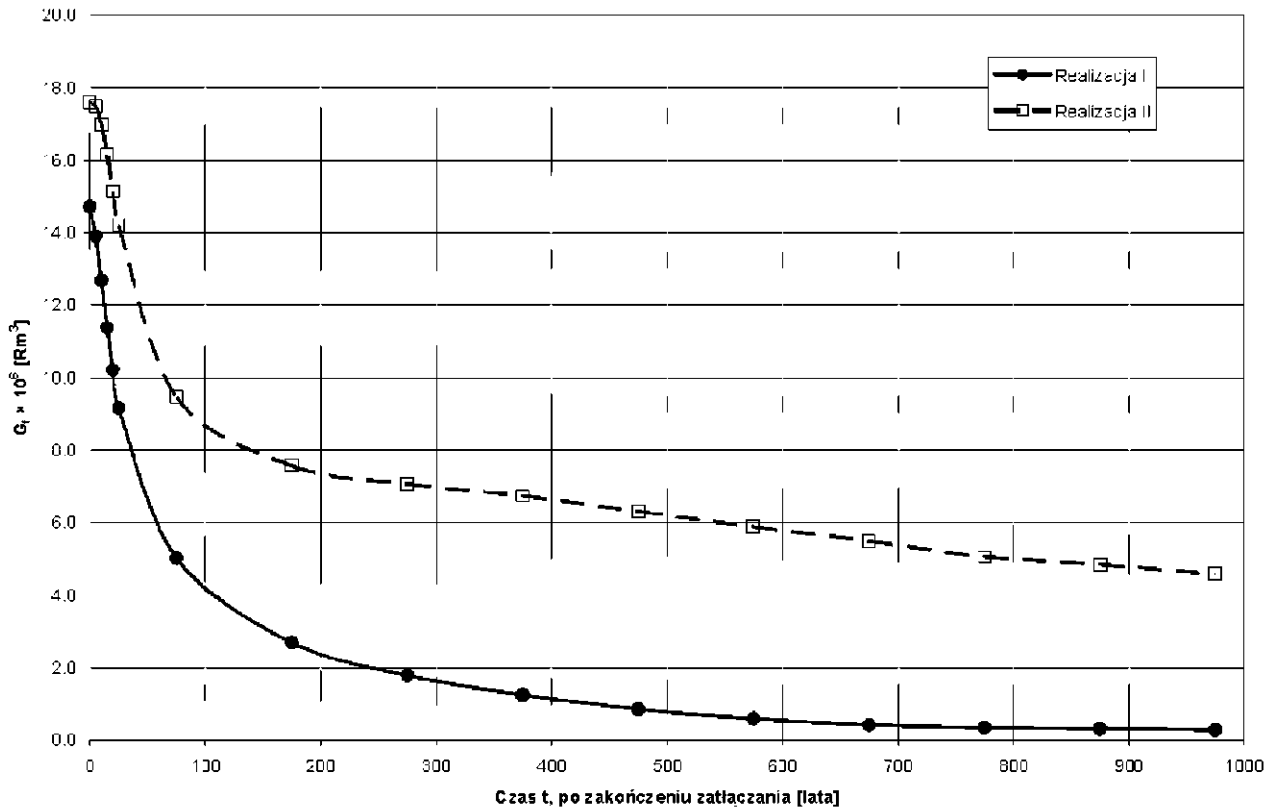


Fig.1.1.16_52 Porównanie zmian w czasie ilości swobodnego CO₂, G_f, w strukturze

Podobnie jak w przypadku wariantu testowego, również w przypadku niniejszego wariantu docelowego, badano wpływ nieoznaczoności rozkładów podstawowych parametrów geologicznych na wyniki symulacji procesu sekwestracji. Przeprowadzono równolegle symulacje dla dwu wybranych realizacji rozkładów każdego z parametrów. Otrzymano wyraźnie zróżnicowane wyniki zarówno dla rozkładów nasycień CO₂, ilości CO₂ rozpuszczonego w solance, ciśnień charakterystycznych sekwestracji i innych. Z porównań powyższych wynikają wyraźnie gorsze własności Realizacji II, co przejawia się wyższymi o ok. 2 MPa ciśnieniami w odwiertach i w samej strukturze (na stropie) własności te wpływają również na wolniejsze rozpuszczanie się zatłaczanego CO₂ w solance, co pokazuje **Fig.1.1.16_53**.

Podsumowanie

W pracy skonstruowano dynamiczny model symulacyjny struktury wodonośnej Budziszewice-Zaosie w utworach triasu dolnego jako potencjalnego składowiska dla sekwestracji CO₂. Dokonano implementacji statycznego modelu geologicznego struktury z uwzględnieniem jego wielokrotnych realizacji geostatystycznych. Informacje geologiczne uzupełniono własnościami termodynamicznymi płynów złożowych niezbędnymi do zastosowania symulacji kompozycyjnych tworzonego modelu.

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

Zaprezentowano wyniki symulacji w zakresie: (i) rozkładów nasyceń CO₂ i ich ewolucji w czasie zatłaczania i następującym po nim okresie relaksacji, (ii) przestrzennych rozkładów ilości CO₂ rozpuszczonego w solance i ich zmian w fazie zatłaczania i relaksacji, (iii) ciśnień charakteryzujących proces: maksymalnego przewyższenia ciśnienia na stropie; maksymalnego gradientu ciśnienia z głębokością; ciśnień na spodzie odwiertów.

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

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

Wnioski

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

Wariant testowy

1. Czas trwania testu i wydajność zatłaczania CO₂ w jego trakcie określają zasięg strefy sekwestracji, która wg symulacji przeprowadzonych na skonstruowanym modelu struktury nie przekracza 1 km.
2. Wyniki testu mogą zweryfikować i/lub precyzyjniej określić własności powyższej strefy.
3. Wyniki testu niezależnie od szczegółowych informacji o strukturze nie pozwolą określić stopnia otwartości hydrodynamicznej struktury.
4. Dla zoptymalizowania testu pod kątem technicznych szczegółów i możliwości uzyskania maksimum istotnych informacji o strukturze należy skonstruować model strefy przyodwiertowej o podwyższonej rozdzielczości i użyć go zarówno na etapie projektowania testu jak i analizy jego wyników.

Wariant docelowy

1. Zakładane ilości zatłaczanego CO₂ obejmą stosunkowo niewielką objętość struktury wokół odwiertów zatłaczających.

2. Istotne parametry procesu sekwestracji (w tym ciśnienia przewyższenia na stropie, gradient z głębokością i inne) słabo lub wcale nie zależą od całkowitych rozmiarów struktury, których częścią jest analizowany obszar.
3. Krytyczną wielkością limitującą efektywną pojemność sekwestracji jest przewyższenie ciśnień na stropie (przewyższenie ciśnienia pierwotnego będące miarą ryzyka rozszczenia skał nadkładu), które przekroczy 11,0 MPa lub 42% ciśnienia pierwotnego.
4. Kolejnym parametrem podwyższonego ryzyka będzie maksymalny gradient ciśnienia z głębokością, który przekroczy 0.015 MPa/m.
5. Niepewność w określeniu właściwości geologicznych struktury może oznaczać dodatkowy wzrost wyliczonych ciśnień rzędu 2 MPa.
6. Procesy migracji gazu na skutek sił wyporu oraz efekty rozpuszczania się CO₂ w solance wraz ze zjawiskiem konwekcji solanki powodują efektywny wzrost pojemności sekwestracyjnej struktury w okresie kilku dziesięcioleci od rozpoczęcia zatłaczania.

Obiekt solankowy w rejonie GZW

Modelowania dynamiczne dla utworów miocenu dla rejonu Cieszyn-Skoczów-Czechowice (GIG; PetraSim/TOUGH2 oraz PIG PIB)

(Jarosław Chećko, Tomasz Urych, Robert Warzecha, Magdalena Głogowska)

(Janusz Jureczka, Adam Wójcicki)

Przyjęte założenia: 1 lub 4 otwory zatłaczające o wydajności odpowiednio 450 tys. t CO₂/rok lub 250 tys. ton CO₂/rok, zlokalizowane z uwzględnieniem zagadnień możliwych konfliktów interesów i bezpieczeństwa składowania (patrz Fig. 1.1.16_54 - 57). Model dynamiczny oparto na zgeneralizowanym modelu statycznym (zadanie 1.1.15) i parametrach z bazy danych (zadanie 1.1.10).

W ramach zadania opracowano model numeryczny zlokalizowany w południowo-zachodniej części GZW w rejonie Cieszyn-Skoczów-Czechowice i obejmujący obszar o powierzchni około 370 km². Przeprowadzono symulacje rozptyłu dwutlenku węgla zatłoczonego do poziomów solankowych w warstwach dębowieckich w utworach miocenu. Modelowany zbiornik zlokalizowany został w warstwach dębowieckich o zróżnicowanych miąższach zawierających się w przedziale od 0 do ponad 250 m (Fig. 1.1.16_54).

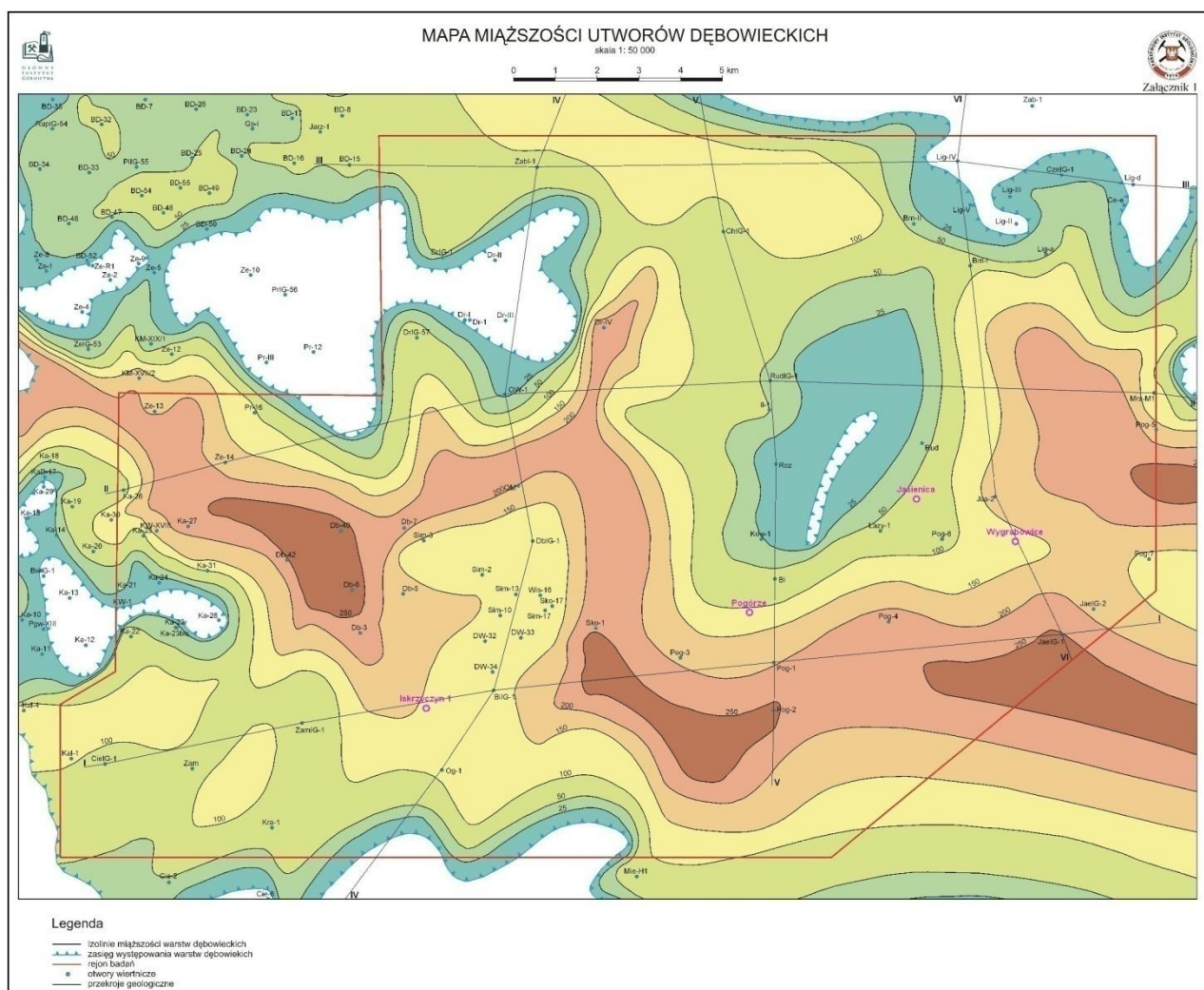


Fig. 1.1.16_54 Lokalizacja modelowanego obszaru na tle mapy miąższości warstw dębowieckich

Modelowanie dynamiczne procesu rozptywu dwutlenku węgla przeprowadzono za pomocą oprogramowania PetraSIM, posiadającego koprocesor TOUGH2.

Dwutlenek węgla w opracowanym modelu zatłaczany jest do warstw dębowieckich za pomocą czterech otworów iniekcyjnych: Iskrzyczyn 1, Pogórze, Wygrabowice, Jasienica. Zakładane otwory iniekcyjne nawiercają strop warstw dębowieckich na głębokości od ok. 820 do 1020 m (Fig. 1.1.16_55).

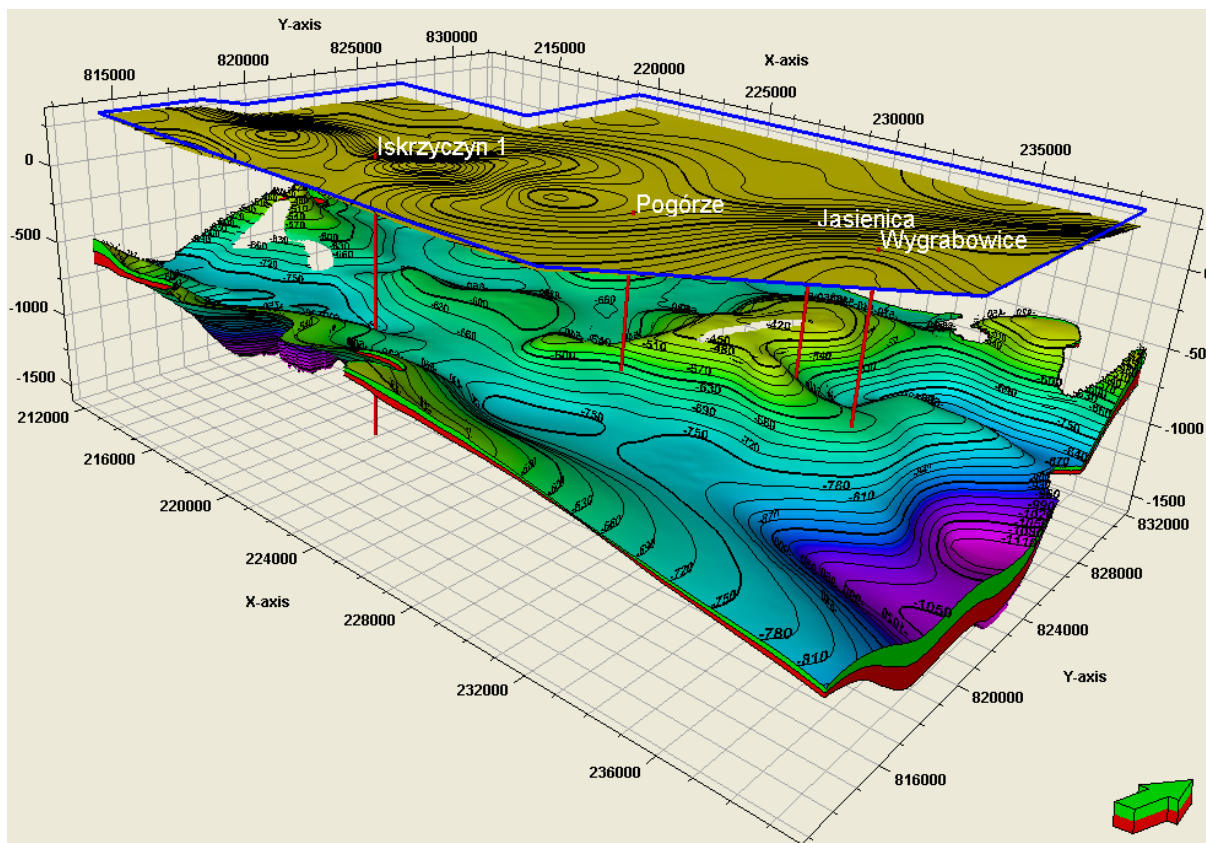


Fig. 1.1.16_55 Warstwy dębowieckie wraz z powierzchnią terenu oraz otworami iniekcyjnymi

Struktura modelu numerycznego

Opracowane zostały dwa modele numeryczne. Pierwszy wariant symulacji obejmuje iniekcję CO₂ jednym otworem. Dwutlenek węgla zatłaczany jest w tym przypadku do warstw dębowieckich oraz do zalegających poniżej warstw zamarskich. Natomiast w drugim wariantcie mamy do czynienia z zatłaczaniem CO₂ tylko do warstw dębowieckich, jednak za pomocą czterech otworów iniekcyjnych. W obydwu przypadkach opracowany model obejmuje przedział głębokościowy od -200 do -1300 m n.p.m. Pole powierzchni modelu to 486 km² (27 x 18 km). W płaszczyźnie poziomej podzielono go na komórki o boku 1 km, natomiast w osi pionowej dokonano podziału na warstwy o średniej miąższości 50 m. Model pierwotnie zakładał rozdzielczość siatki 27x18x14 (6804 komórki). Wprowadzono jednak dodatkowe zagęszczenie siatki w kierunkach X, Y, Z w obrębie otworu iniekcyjnego. Po takiej modyfikacji siatki w strefie zatłaczania dla wariantu pierwszego uzyskano rozdzielczość modelu 31x22x18 (12276 komórek), a dla wariantu drugiego -

rozdzielczość modelu 33x25x12 (9900 komórek). Zmodyfikowane modele numeryczne przedstawiono na Fig. 1.1.16_56 i Fig. 1.1.16_57.

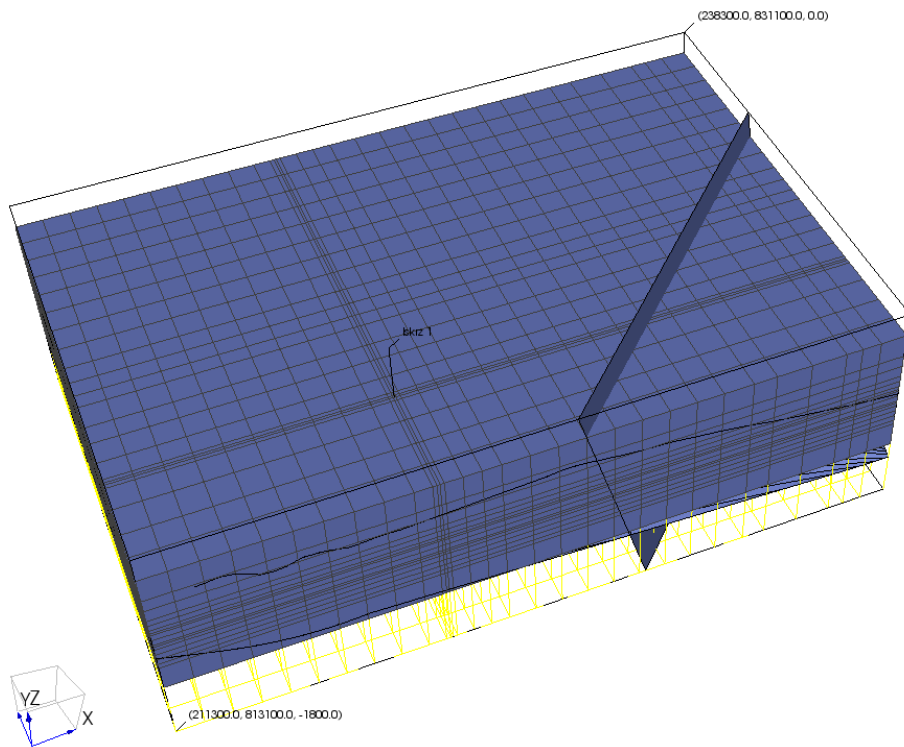


Fig. 1.1.16_56 Model numeryczny dla wariantu I (jeden otwór iniekcyjny *Iskrzyn 1*)



Fig. 1.1.16_57 Model numeryczny dla wariantu II wraz z naniesioną mapą topograficzną oraz czterema otworami iniekcyjnymi

Parametry fizyczne modelu

W celu odwzorowania właściwości fizycznych modelu wyróżniono w nim siedem różniących się wzajemnie ośrodków skalnych (Fig. 1.1.16_58). Ich parametry fizyczne przedstawiono w Tab.1.1.16_4. Przestrzenne zróżnicowanie gęstości, porowatości i przepuszczalności w obrębie warstw dębowieckich przedstawiono na Fig. 1.1.16_59, Fig. 1.1.16_60, Fig. 1.1.16_61.

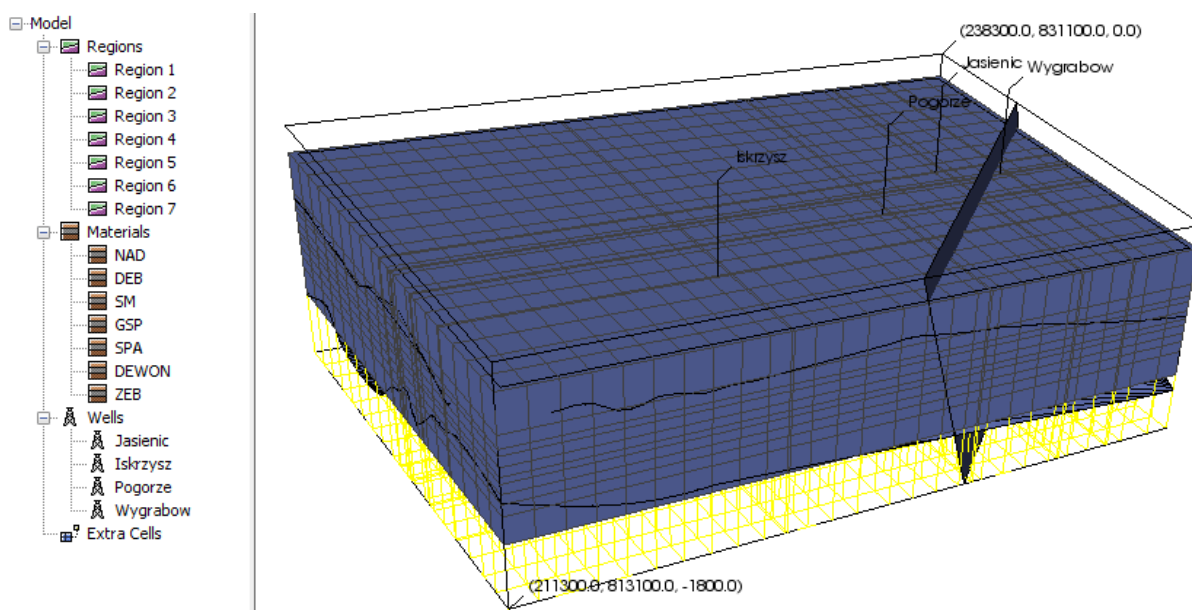


Fig. 1.1.16_58 Wykaz ośrodków skalnych przyjętych w modelu

Tab. 1.1.16_4 Parametry fizyczne ośrodków skalnych przyjętych w modelu

Ośrodek	Gęstość [kg/m ³]	Porowatość [%]	Przepuszczalność [m ²]		
			X	Y	Z
NAD	2535	1	1,0E-21	1,0E-21	1,0E-21
DEB	2490	10	5,0E-14/ 3,5E-14	5,0E-14/ 3,5E-14	5,0E-14/ 3,5E-14
SM	2450	9	3,5E-15	3,5E-15	3,5E-15
GSP	2500	6,4	2,5E-15	2,5E-15	2,5E-15
	2600	5	2,0E-15	2,0E-15	2,0E-15

SPA					
DEWON	2600	2	2,0E-15	2,0E-15	2,0E-15
ZEB	2555	9	2,0E-14	2,0E-14	2,0E-14

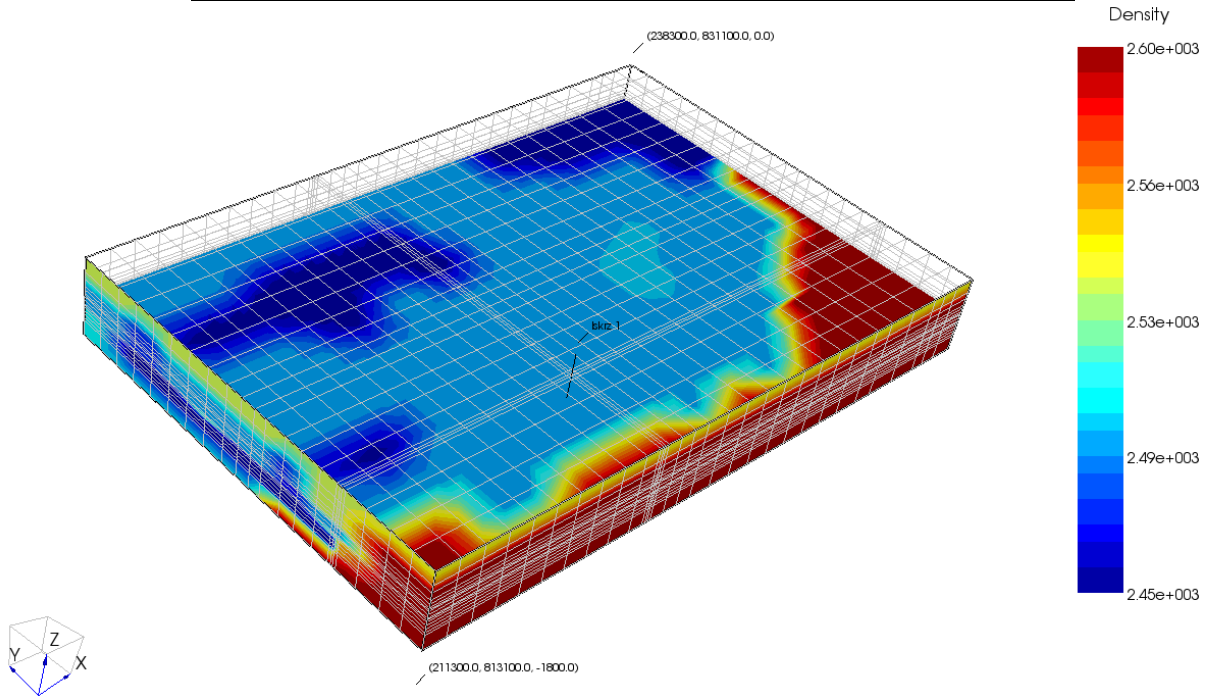


Fig. 1.1.16_59 Rozkład gęstości w modelu

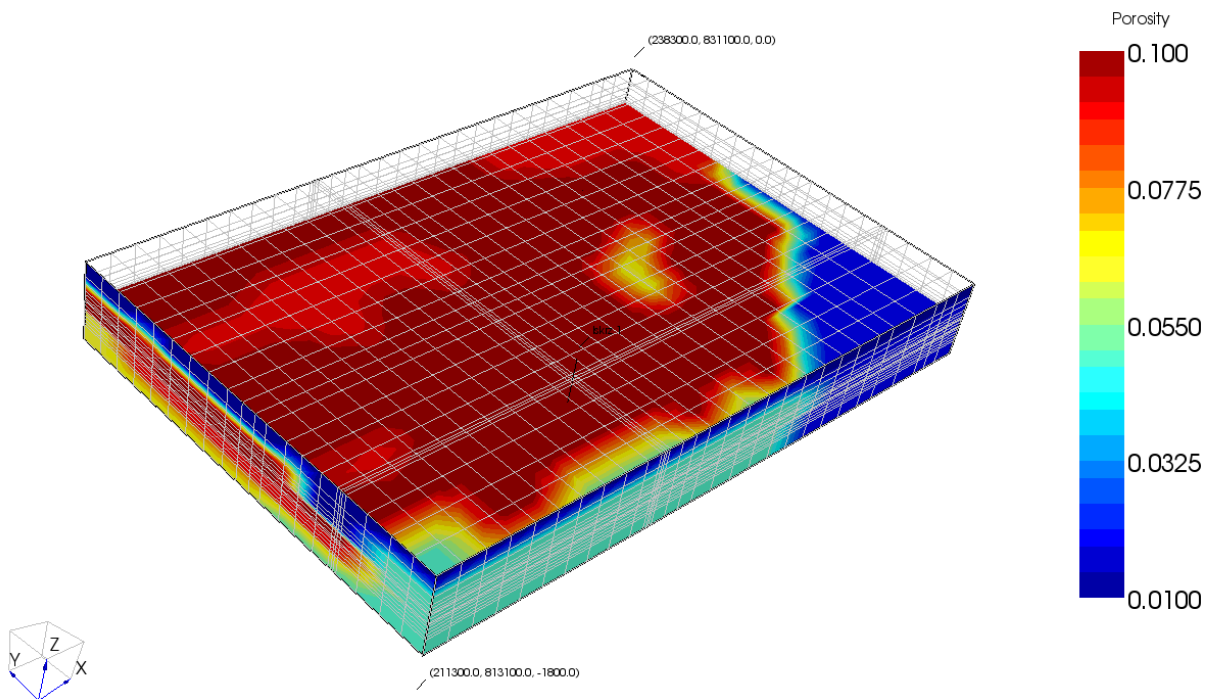


Fig. 1.1.16_60 Rozkład porowatości w modelu

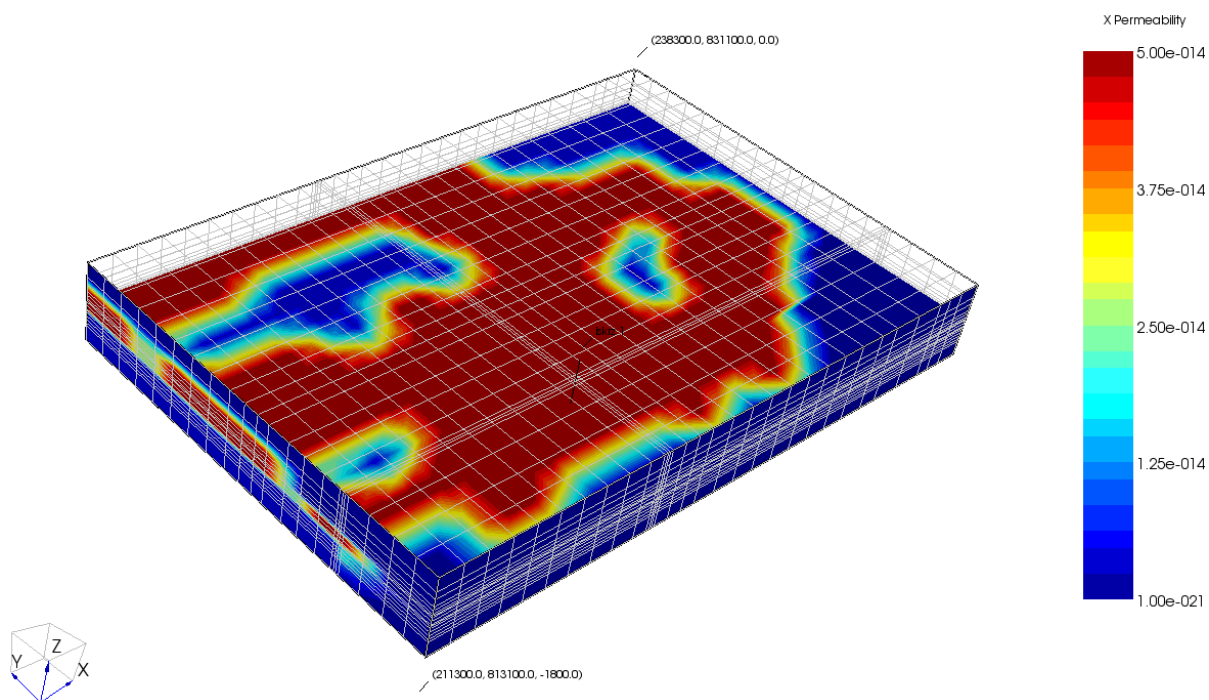


Fig. 1.1.16_61 Rozkład przepuszczalności w modelu

Do symulacji procesów sekwestracji CO_2 w badanej strukturze wykorzystano moduł ECO2N symulatora TOUGH2. Moduł ten umożliwia badania przepływu jedno- dwu i trójfazowego oraz analizę termodynamicznych zmian w systemie woda – NaCl – CO_2 związanym z geologiczną sekwestracją CO_2 . W całym omawianym modelu założono przemianę izotermiczną przy temperaturze $T = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ oraz ciśnienie hydrostatyczne (Fig. 1.1.16_62). Informacje dotyczące parametrów hydrogeologicznych ośrodków skalnych przyjętych w modelu przedstawiono w Tab. 1.1.16_5.

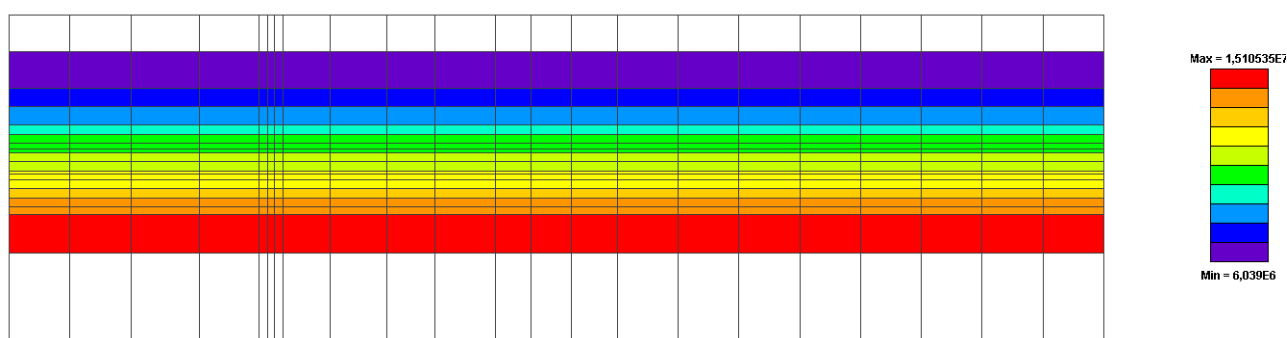


Fig. 1.1.16_62 Rozkład ciśnienia w modelu

Tab. 1.1.16_5 Parametry hydrogeologiczne ośrodków skalnych przyjętych w modelu

Parametr	Wartość
1. Przepuszczalność względna	
<p>- faza stała: krzywe Corey'a (1954)</p> $RP_{liq} = S^4$ <p>ilość nieredukowalnej wody związanej w przestrzeni porowej :</p>	$S = (S_l - S_{lr}) / (1 - S_{lr})$ <p>$S_{lr} = 0,3$</p>
<p>- faza gazowa: krzywe Corey'a (1954)</p> $RP_{gas} = (1 - S)^2 / (1 - S^2)$ <p>ilość nieredukowalnej wody związanej w przestrzeni porowej:</p> <p>nieredukowalne nasycenie gazem (ilość nieredukowalnego gazu związanego w przestrzeni porowej):</p>	$S = (S_l - S_{lr}) / (1 - S_{lr} - S_{gr})$ <p>$S_{lr} = 0,3$</p> <p>$S_{gr} = 0,05$</p>
2. Ciśnienie kapilarne	
<p>- funkcja van Genuchtena (1980)</p> $P_{cap} = - P_o ([S]^{-1/\lambda} - 1)^{1-\lambda}$ <p>ilość nieredukowalnej wody związanej w przestrzeni porowej:</p> <p>wykładnik potęgowy:</p> <p>współczynnik wytrzymałości:</p>	$S = (S_l - S_{lr}) / (1 - S_{lr})$ <p>$S_{lr} = 0,3$</p> <p>$\lambda = 0,4$</p> <p>w-wy dębowieckie: $P_o = 3,58$ kPa skały nadkładu: $P_o = 62,0$ kPa</p>

Wyniki symulacji komputerowych

Modelowanie procesu zatłaczania CO₂ przeprowadzono w dwóch następujących wariantach (**Tab.1.1.16_6**)

1. **Wariant I** - 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 wtłoczonego CO₂ do górotworu wynosi 230 lat, z czego przez pierwsze 5 lat symulacji trwa stabilizacja modelu (brak iniekcji). W sumie zatłoczono 11,25 mln Mg CO₂.
2. **Wariant II** – symulacja obejmuje zatłaczanie CO₂ czterema otworami (*Iskrzyczyn 1, Pogórze, Wygrabowice, Jasienica*) przez okres 25 lat; ilość zatłaczanego dwutlenku węgla w każdym otworze wynosi 250 tys. Mg CO₂/rok; cały okres symulacji wraz z obserwacją wtłoczonego CO₂ do górotworu wynosi 230 lat, z czego przez pierwsze 5 lat symulacji trwa stabilizacja modelu (brak iniekcji). W sumie zatłoczono 25 mln Mg CO₂. Jest to wariant optymistyczny, gdyż przyjęto tutaj średnią wartość przepuszczalności warstw dębowieckich wynoszącą 50 mD.
3. **Wariant III** – jedyna różnica w porównaniu z wariantem II polega na tym, że w tym przypadku dla warstw dębowieckich przyjęto przepuszczalność równą 35 mD.

Tab. 1.1.16_6 Zestawienie wariantów symulacji

Wariant	Ilość otworów iniekcyjnych	Ilość CO ₂ [kg/s]		Ilość CO ₂ [tys. Mg /rok]	Przepuszczalność warstw dębowieckich [mD]
		w-wy dębowieckie	w-wy zamarskie		
I	1	9,51	4,76	450 (300+150)	50
II	4	7,92	-	1000 (4x250)	50
II	4	7,92	-	1000 (4x250)	35

Symulacja iniekcji CO₂ - wariant I

Pierwszy wariant symulacji obejmuje proces zatłaczania dwutlenku węgla jednym otworem o nazwie *Iskrzyczyn 1*. Dane dotyczące lokalizacji tego zakładanego otworu iniekcyjnego zamieszczono poniżej:

- wysokość +290 m n. p. m.;
- gmina: Dębowiec, miejscowość Iskrzyczyn;
- współrzędne w układzie 1965: 221134, 817408;
- współrzędne w układzie 1942: 5 519 934, 4 337 119.

W wariantcie I zatłoczono do warstw dębowieckich 7,5 mln Mg CO₂, a do warstw zamarskich – około 3,75 mln Mg CO₂. Podstawowe założenia modelowe dla wariantu I zebrano w **Tabeli 1.1.16_7**. Zatłaczanie dwutlenku węgla odbywa się w części spągowej zarówno warstw dębowieckich, jak i zamarskich. Miejsca iniekcji znajdują się na odmiennych głębokościach, dlatego też mamy tu do czynienia z odmiennymi ciśnieniami dennymi w otworach iniekcyjnych. W czasie iniekcji dwutlenku węgla do warstw dębowieckich zaobserwowano wzrost ciśnienia hydrostatycznego z 11,71 do 13,4 MPa (wzrost ciśnienia o 14,43 %) (**Fig. 1.1.16_63**). Natomiast w przypadku iniekcji w warstwach zamarskich nastąpił wzrost ciśnienia z 13,84 do 16,4 MPa, co wskazuje na wzrost ciśnienia o 18,5 % w stosunku do ciśnienia hydrostatycznego (**Fig. 1.1.16_64**). Należy wspomnieć, że iniekcja CO₂ rozpoczyna się dopiero po 5 latach symulacji. Zabieg taki ma na celu stabilizację modelu w początkowej fazie symulacji, a obserwowany w tym czasie nieznaczny wzrost ciśnienia w komórkach iniekcyjnych spowodowany jest przepływem wód w tym rejonie. Podstawowe parametry zatłaczania dla wariantu I przedstawiono w **Tab. 1.1.16_8** i **Tab. 1.1.16_9**.

Na wykresach (**Fig. 1.1.16_65** i **Fig. 1.1.16_66**) pokazano zmiany nasycenia CO₂ w miejscu iniekcji w warstwach dębowieckich i zamarskich. W warstwach dębowieckich zaobserwowano szybki wzrost nasycenia warstwy iniekcyjnej do 76,7 % w ostatniej fazie zatłaczania. Natomiast w warstwach zamarskich nastąpił szybki wzrost nasycenia do 62 %. Jednak po krótkim czasie od zaprzestania iniekcji nasycenie to gwałtownie spada do kilku procent. Zmiany nasycenia i ciśnienia w stropie zbiornika, w warstwie położonej 50 m ponad miejscem iniekcji oraz w komórkach oddalonych 150 m od miejsca iniekcji przedstawiono na figurach **Fig. 1.1.16_67-72**.

Tab. 1.1.16_7 Warunki początkowe przyjęte w modelu dla wariantu I

Parametr	W-wy dębowieckie	W-wy zamarskie
Ciśnienie [MPa]	11,71	13,84
Entalpia [kJ/kg]	12,364	12,1
Gęstość [kg/m ³]	2490	2555
Porowatość [%]	10	9
Przepuszczalność [mD]	50	20
Temperatura [°C]	35	
Zasolenie [% NaCl]	20	
Nasycenie dwutlenkiem węgla [% CO ₂]	5	

Tab. 1.1.16_8 Zestawienie podstawowych parametrów zatłaczania CO₂ do warstw dębowieckich

Czas	Ciśnienie denne [MPa]	Nasylenie CO ₂ [%]	Całkowita masa zatłoczonego CO ₂ [tys. Mg]	Wydajność zatłaczania [kg/s]
0	11,71	0,05	0	0
4,3 lat	11,76	0,0499	0	0
5 lat	12,61	0,1723	1513,04	9,56
10 lat	12,85	0,5395	3011,40	9,56
15 lat	12,75	0,5864	4518,56	9,56
20 lat	12,72	0,6395	6094,44	9,56
25 lat	12,71	0,7016	7579,38	9,56
30 lat	12,5	0,7669	9043,76	9,56
50 lat	11,96	0,0826	9043,76	0
80 lat	11,92	0,0704	9043,76	0
100 lat	11,89	0,0675	9043,76	0
130 lat	11,85	0,0649	9043,76	0

Tab. 1.1.16_9 Zestawienie podstawowych parametrów zatłaczania CO₂ do warstw zamarskich

Czas	Ciśnienie denne [MPa]	Nasylenie CO ₂ [%]	Całkowita masa zatłocz. CO ₂ [tys. Mg]	Wydajność zatłaczania [kg/s]
0	13,84	0,05	0	0
4,3 lat	14,12	0,0496	0	0
5 lat	15,03	0,096	753,35	4,76
10 lat	15,13	0,496	1499,40	4,76
15 lat	15,03	0,5358	2249,83	4,76
20 lat	15,01	0,567	3034,47	4,76
25 lat	15,03	0,5938	3773,84	4,76
30 lat	14,69	0,5725	4502,96	4,76
50 lat	14,33	0,0748	4502,96	0
80 lat	14,28	0,0684	4502,96	0
100 lat	14,25	0,067	4502,96	0
130 lat	14,21	0,0657	4502,96	0

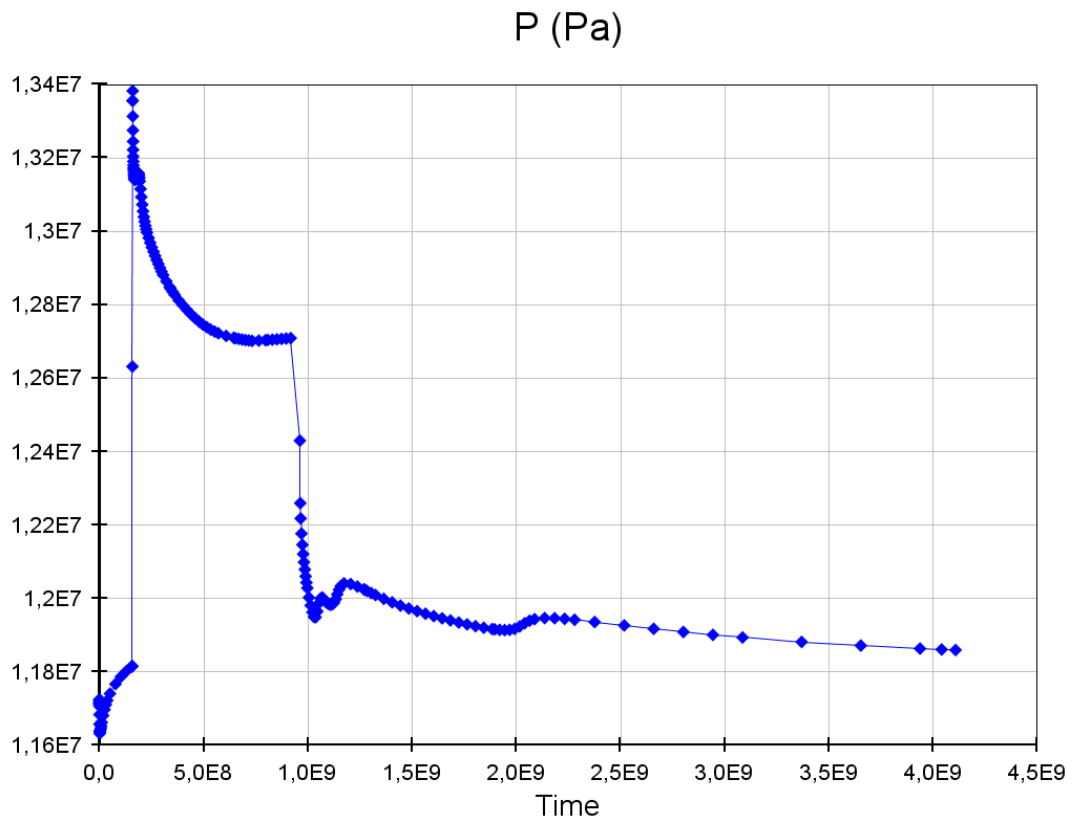


Fig. 1.1.16_63 Ciężnienie denne w odwiercie *Iskrzyczyn 1* w trakcie zatężczania oraz po jego zakończeniu (iniekcja CO_2 w warstwach dębowieckich)

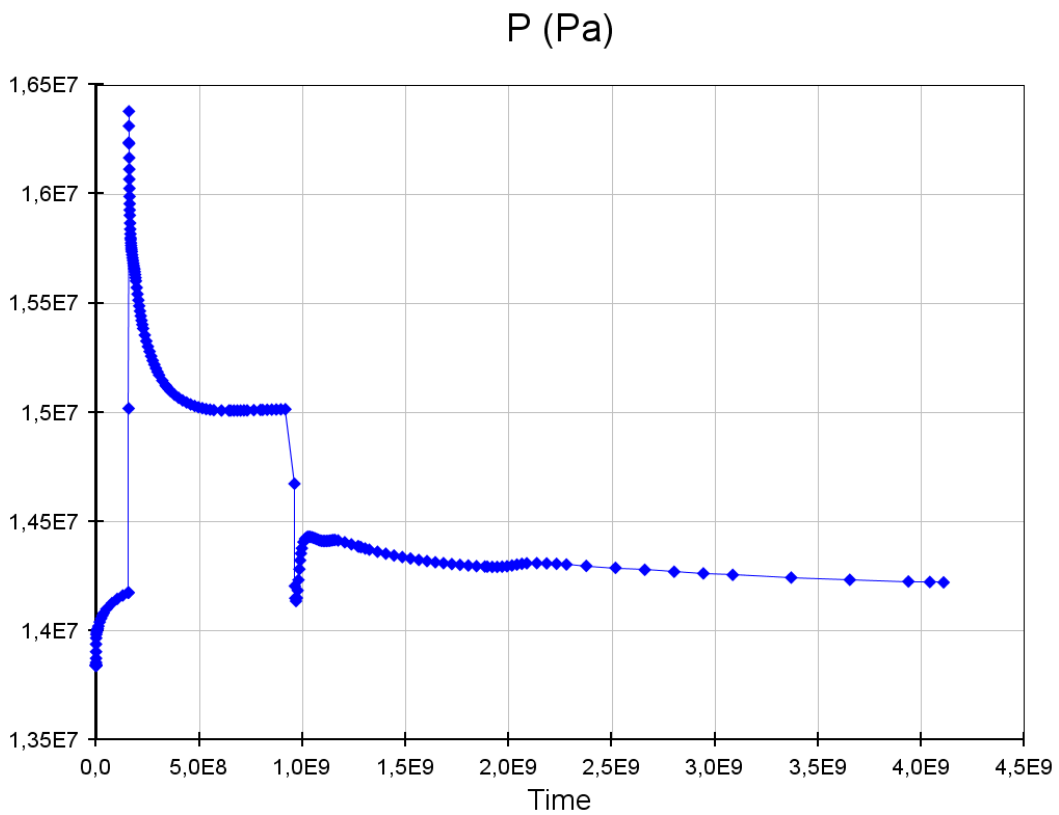


Fig. 1.1.16_64 Ciężnienie denne w odwiercie *Iskrzyczyn 1* w trakcie zatężczania oraz po jego zakończeniu (iniekcja CO_2 w warstwach zamarskich)

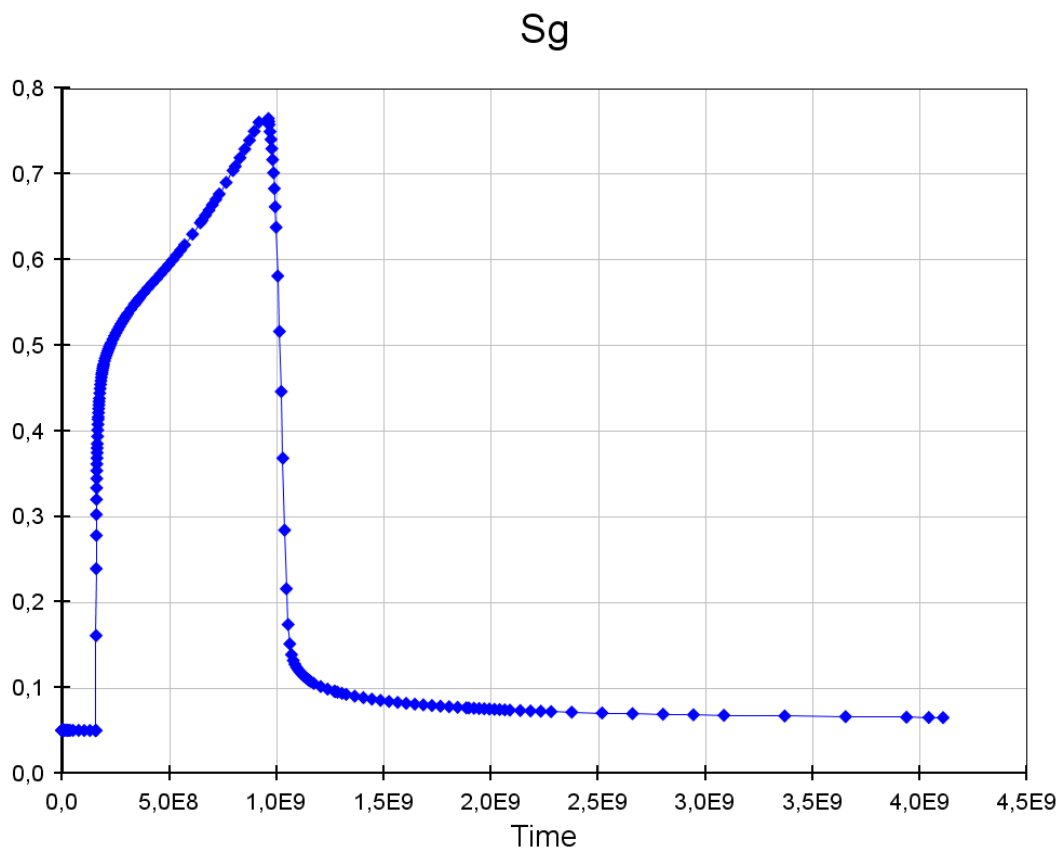


Fig. 1.1.16_65 Przebieg zmian nasycenia CO₂ w miejscu iniekcji (w-wy dębowieckie) w czasie do 100 lat po zakończeniu iniekcji CO₂

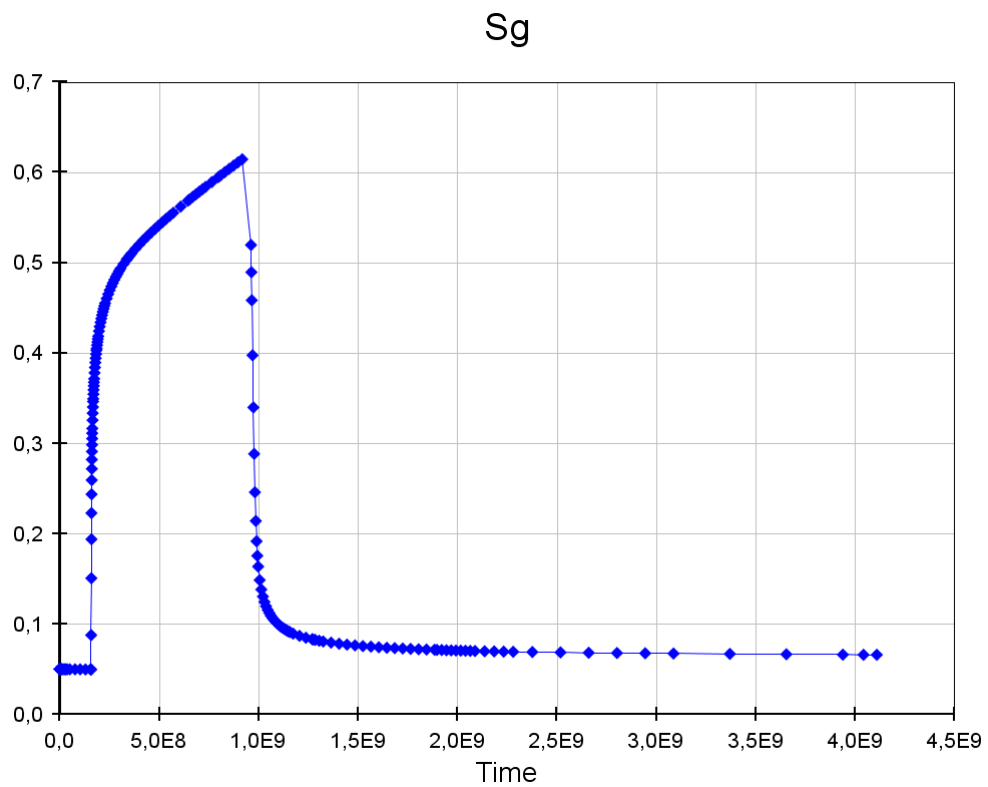


Fig. 1.1.16_66 Przebieg zmian nasycenia CO₂ w miejscu iniekcji (w-wy zamarskie) w czasie do 100 lat po zakończeniu iniekcji CO₂

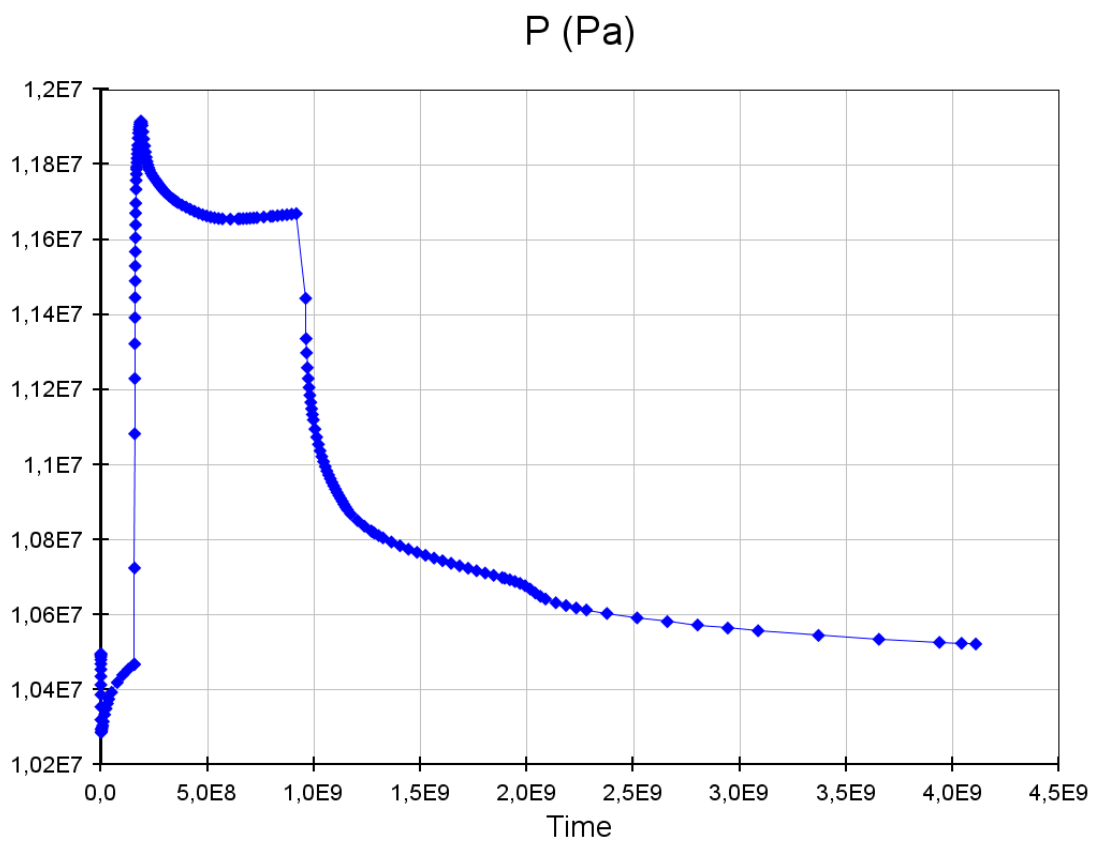


Fig. 1.1.16_67 Przebieg zmian ciśnienia w komórce położonej w stropie zbiornika warstw dębowieckich

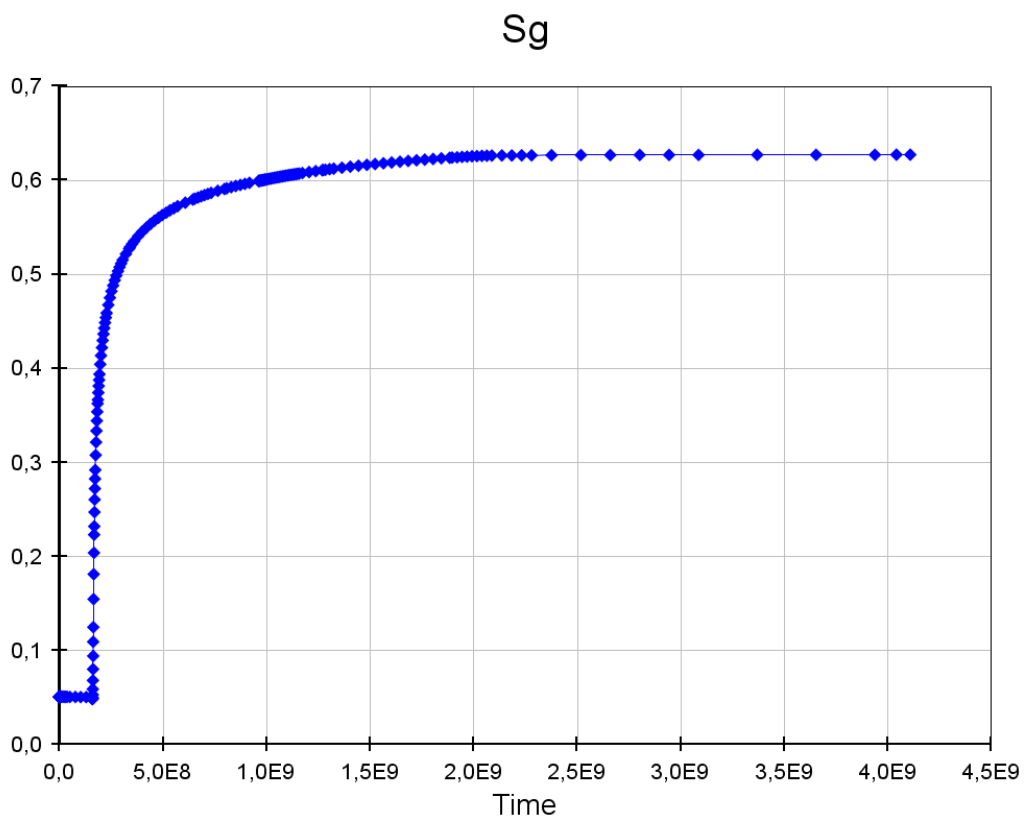


Fig. 1.1.16_68 Przebieg zmian nasycenia CO₂ w komórce położonej w stropie zbiornika warstw dębowieckich

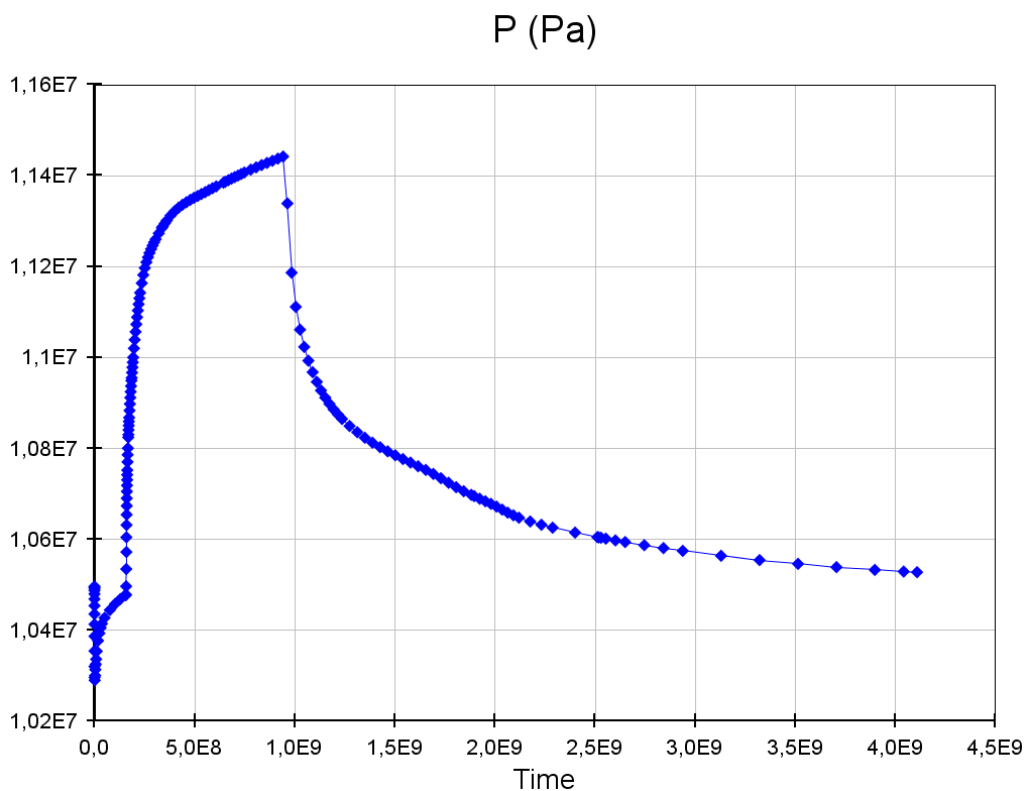


Fig. 1.1.16_69 Przebieg zmian ciśnienia w komórce położonej w stropie zbiornika warstw dębowieckich w odległości około 150 m od miejsca iniekcji

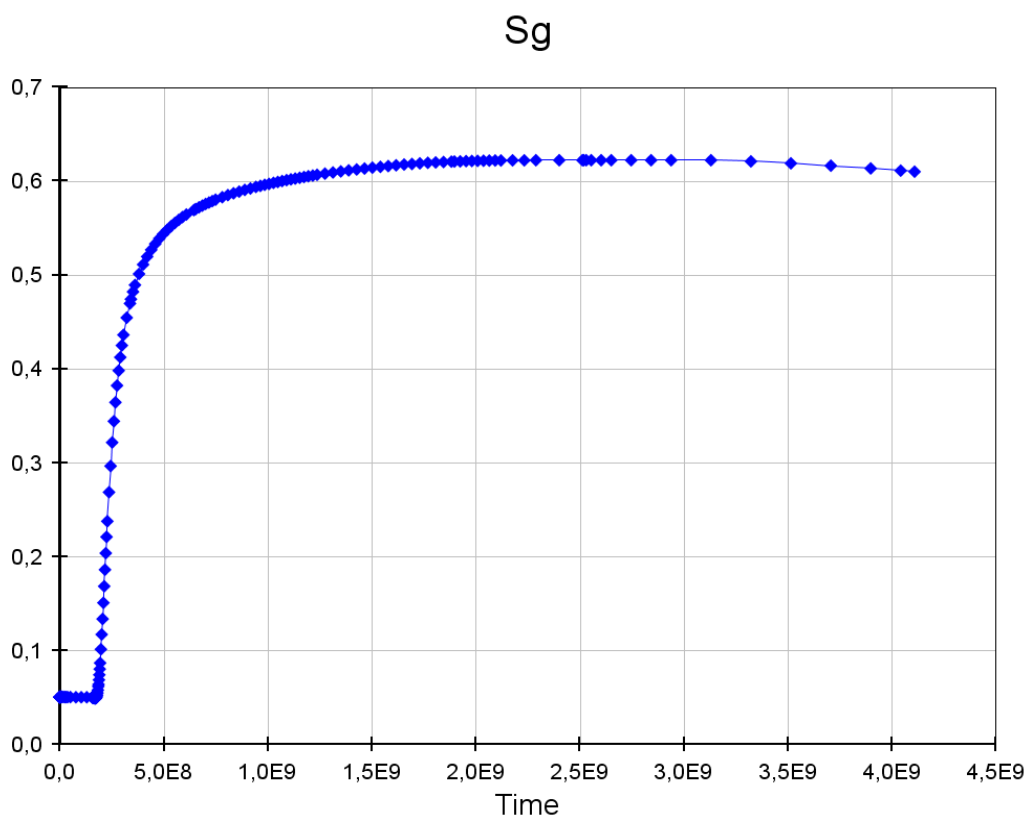


Fig. 1.1.16_70 Przebieg zmian nasycenia CO₂ w komórce położonej w stropie zbiornika warstw dębowieckich w odległości około 150 m od miejsca iniekcji.

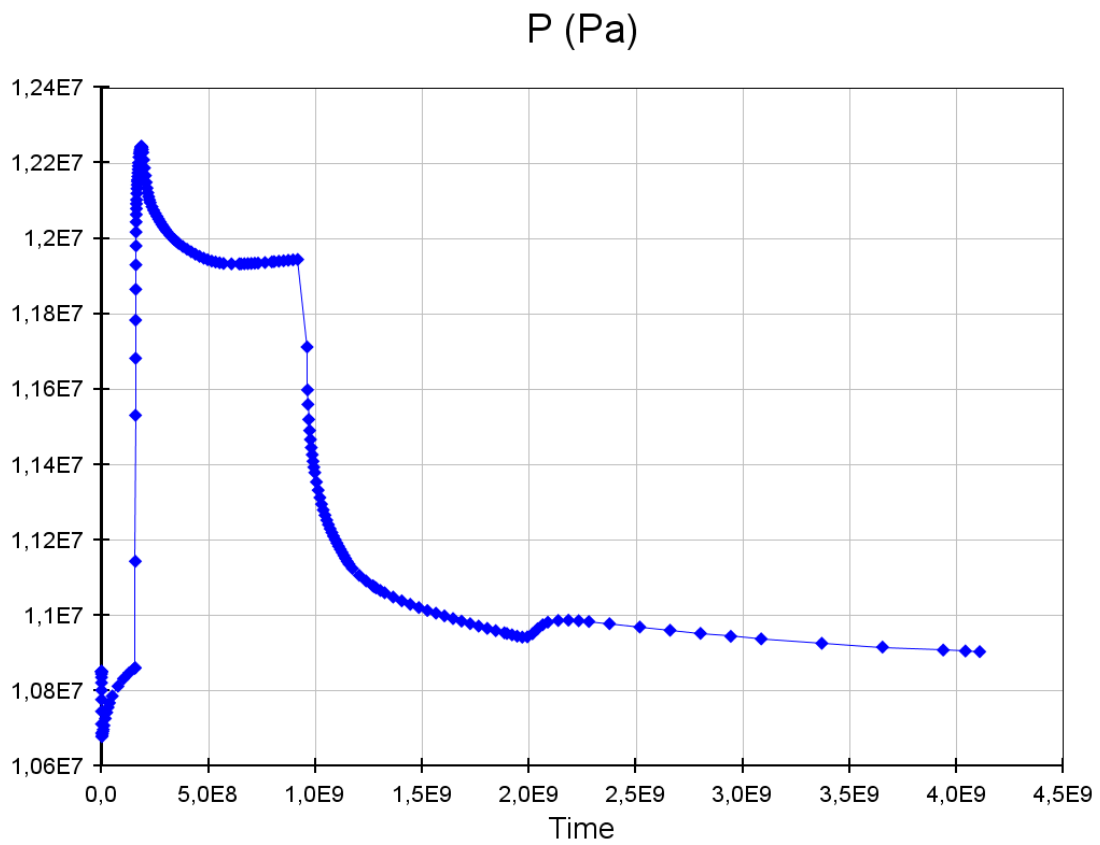


Fig. 1.1.16_71 Przebieg zmian ciśnienia w komórce położonej 50 m powyżej miejsca iniekcji w warstwach dębowieckich

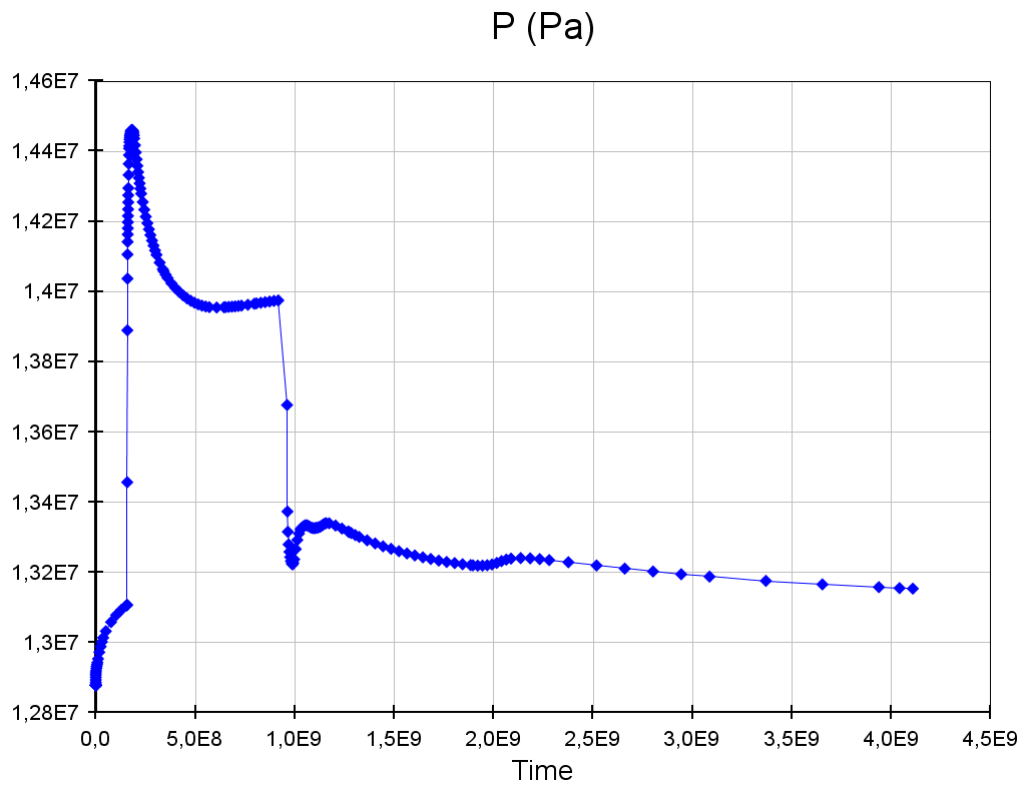
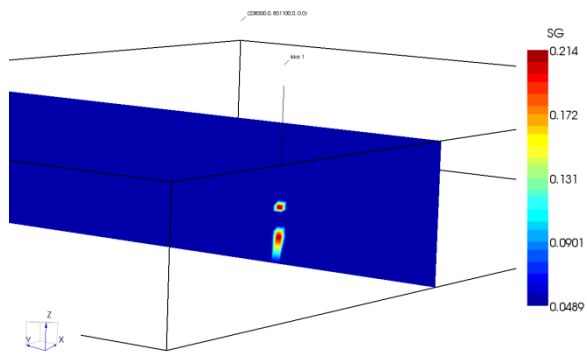
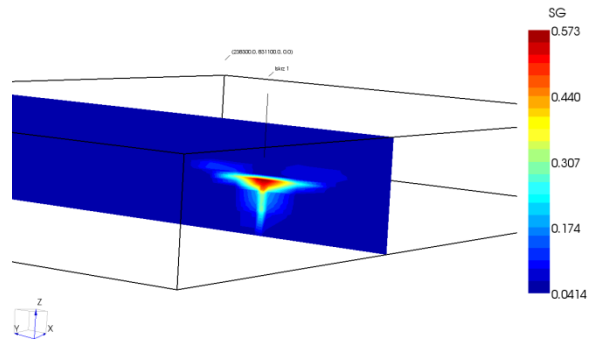


Fig. 1.1.16_72 Przebieg zmian ciśnienia w komórce położonej 50 m powyżej miejsca iniekcji w warstwach zamarskich
16-72

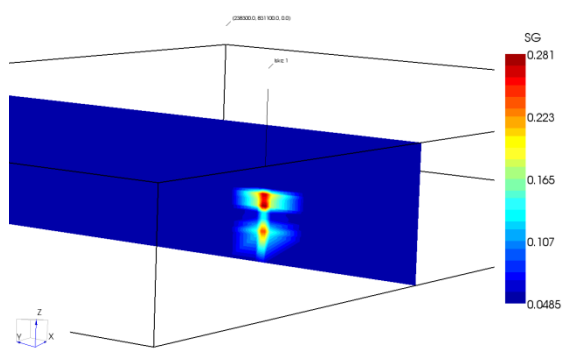
a) początek iniekcji



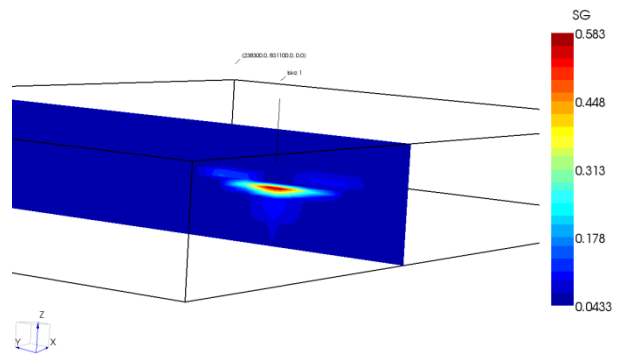
e) po 25 latach iniekcji



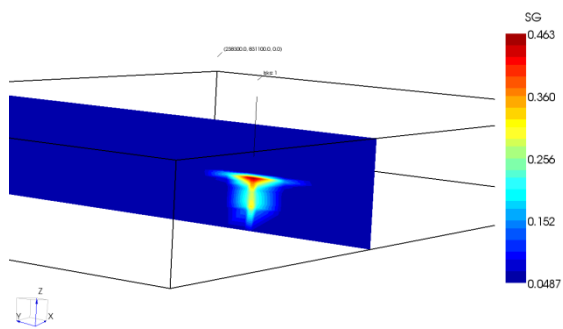
b) po 1 roku iniekcji



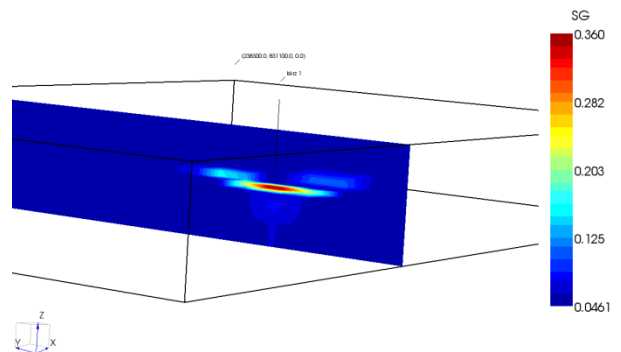
f) 10 lat po zakończeniu iniekcji



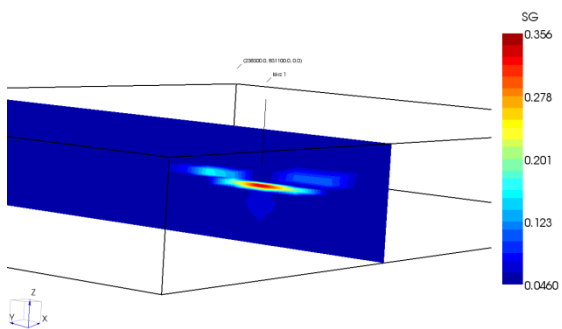
c) po 5 latach iniekcji



g) 50 lat po zakończeniu iniekcji



d) po 15 latach iniekcji



h) 200 lat po zakończeniu iniekcji

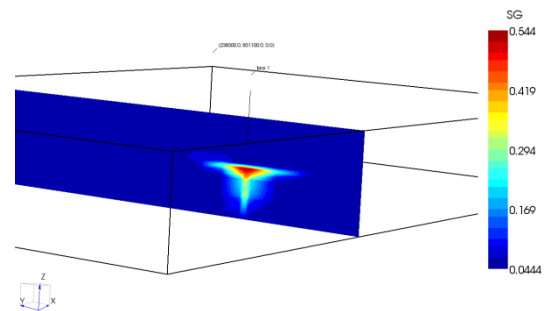


Fig. 1.1.16_73 Rozkład nasycenia CO₂ w otworze *Iskrzyczyn 1*

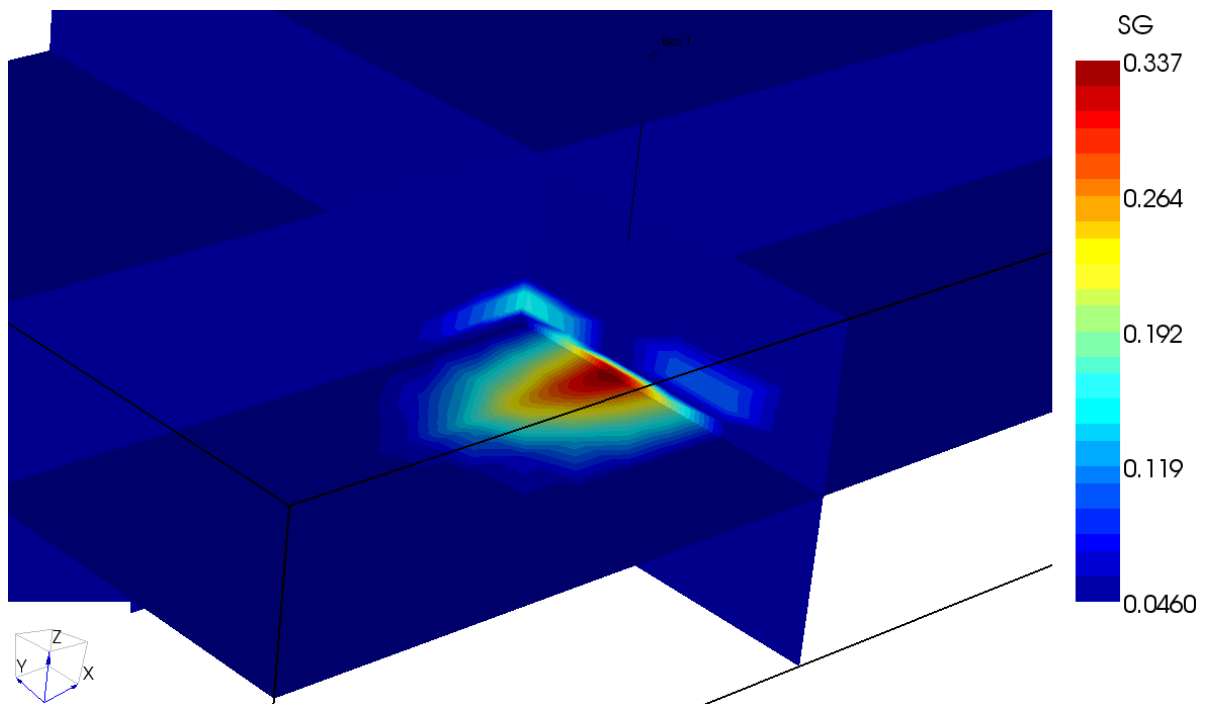


Fig. 1.1.16_74 Rozkład nasycenia CO₂ na głębokości ok. 1040 m m (-750 m npm) po 200 latach od zakończenia iniekcji

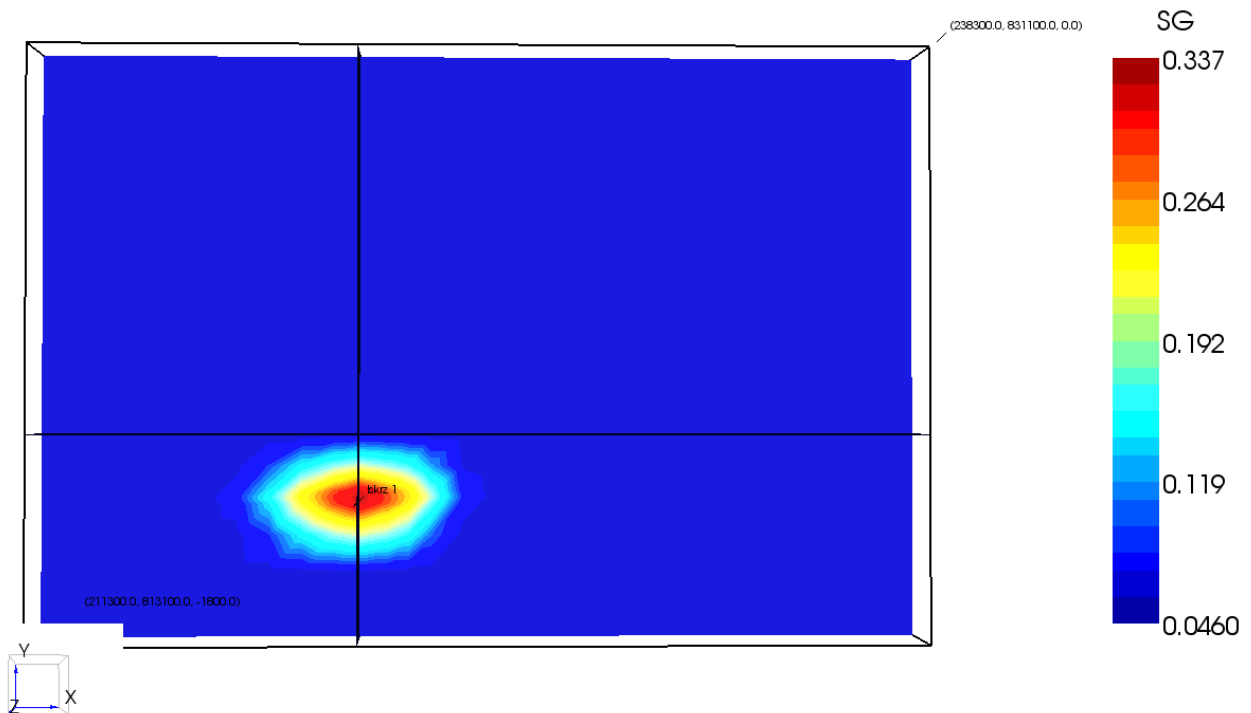


Fig. 1.1.16_75 Rozkład nasycenia CO₂ na głębokości ok. 1040 m (-750 m npm) po 200 latach od zakończenia iniekcji (widok z góry)

Na powyższych figurach (Fig. 1.1.16_74, Fig. 1.1.16_75) obserwuje się nieznacznie zwiększone rozprzestrzenianie się dwutlenku węgla w kierunku zachodnim, zgodnie z regionalnym gradientem przepływu wód.

Na figurach Fig. 1.1.16_73-77 przedstawiono rozkład zmian nasycenia warstw dwutlenkiem węgla w czasie iniekcji oraz po jej zakończeniu.

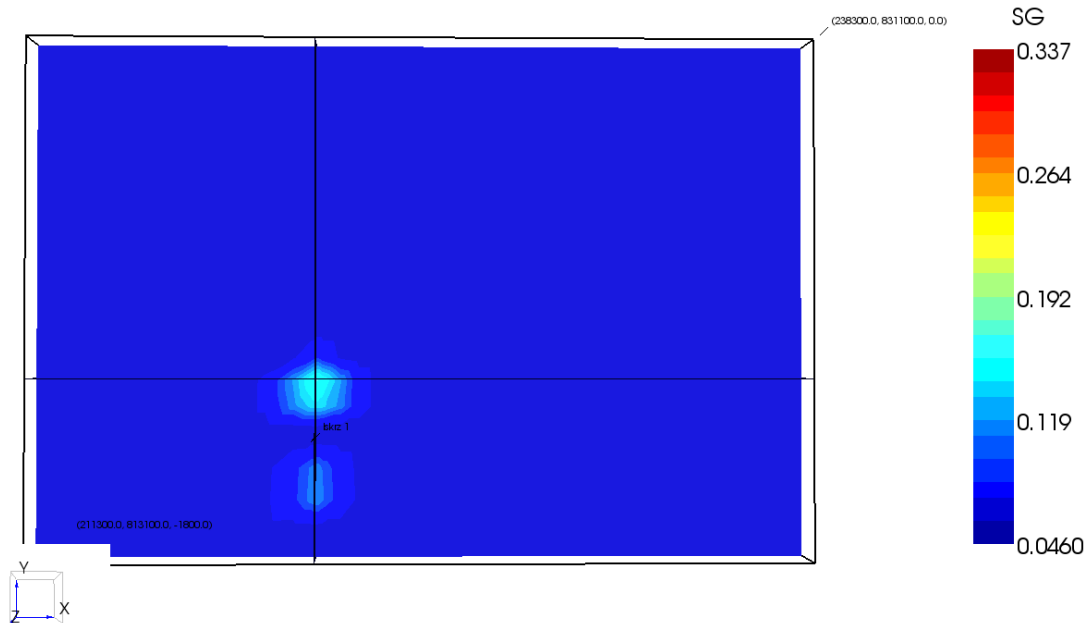


Fig. 1.1.16_76 Rozkład nasycenia CO₂ na głębokości ok. 940 m (-650 m n.p.m.) po 200 latach od zakończenia iniekcji (widok z góry)

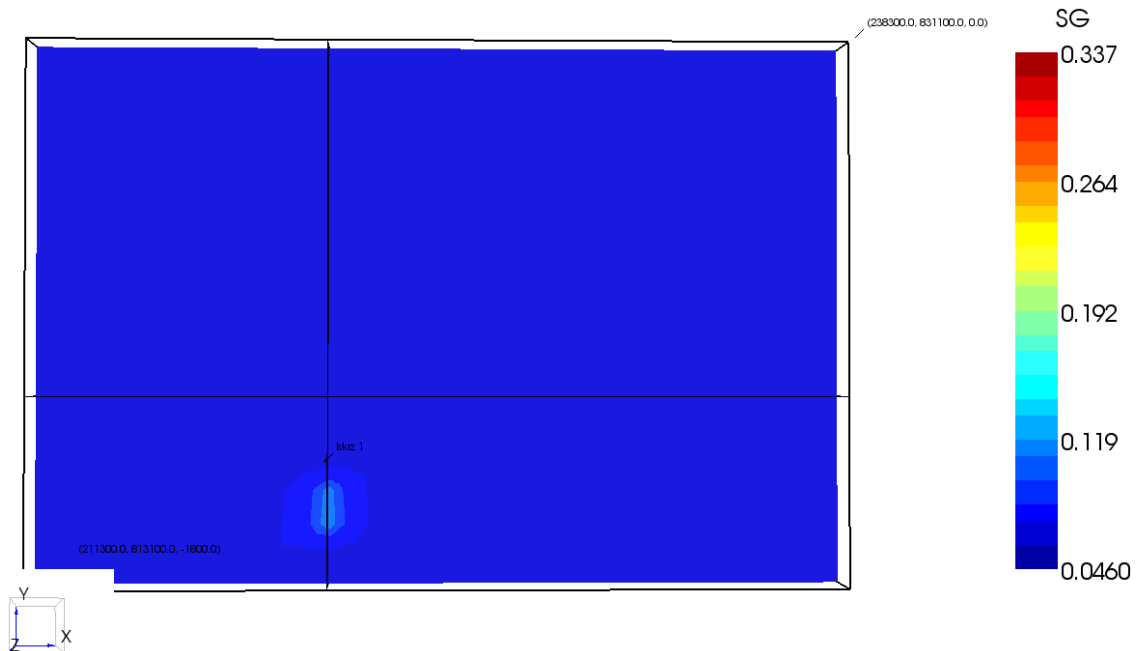


Fig. 1.1.16_77 Rozkład nasycenia CO₂ na głębokości ok. 890 m (-600 m n.p.m.) po 200 latach od zakończenia iniekcji (widok z góry)

Na poniższym wykresie (**Fig. 1.1.16_78**) przedstawiono zmiany ciśnienia i nasycenia w komórkach położonych w kierunku zachodnim w stosunku do komórki iniekcyjnej. Wpływ zatłaczania dwutlenku węgla na otoczenie maleje wraz ze wzrostem odległości od miejsca iniekcji. Komórki oddalone o 3300 m od komórki iniekcyjnej nie wykazują już wzrostu nasycenia dwutlenkiem węgla.

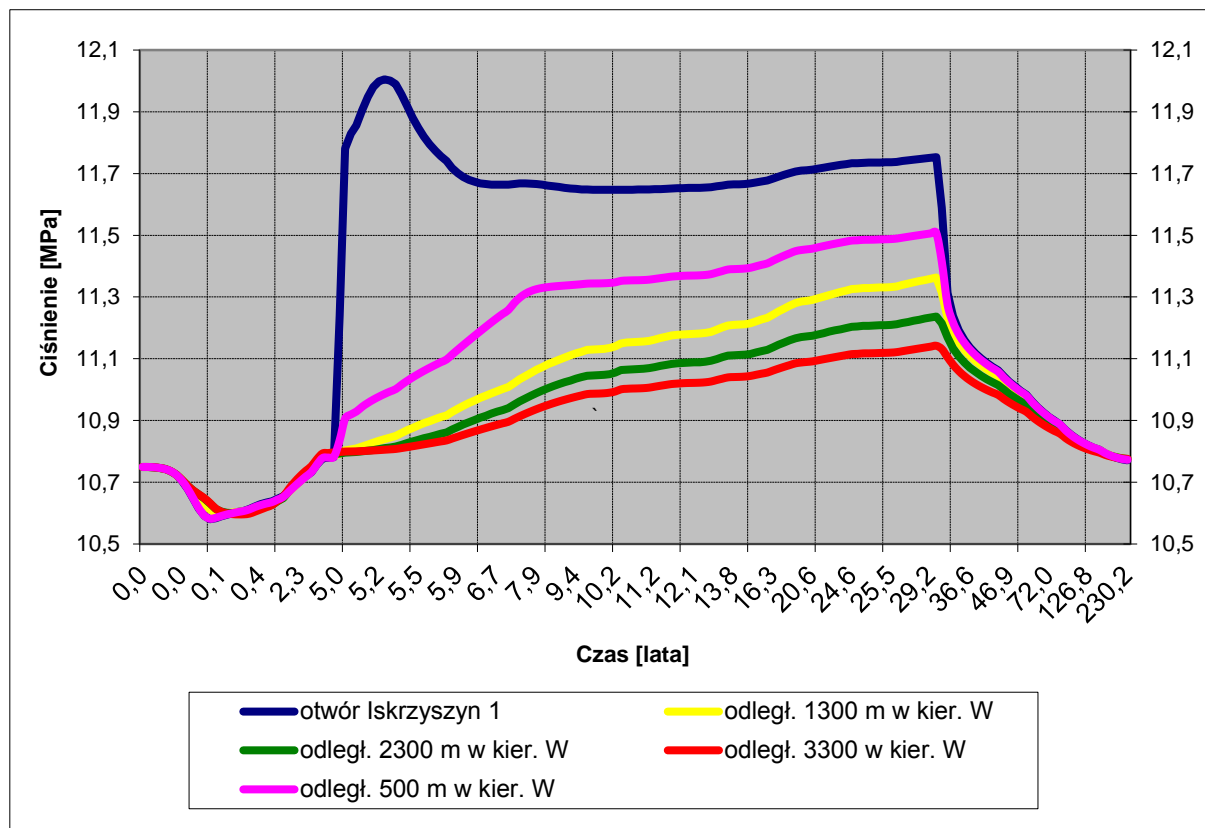


Fig. 1.1.16_78 Przebieg zmian ciśnienia w komórkach położonych w obrębie otworu *Iskrzyczyn 1* w stropie warstw dębowieckich

Symulacja iniekcji CO₂ - wariant II

Symulacja w wersji II obejmuje zatłaczanie CO₂ czterema otworami (*Iskrzyczyn 1, Pogórze, Wygrabowice, Jasienica*) przez okres 25 lat. Pozwoliło to na zatłoczenie 250 tys. Mg CO₂/rok w każdym z otworów, co daje w sumie 25 mln Mg CO₂ przez cały okres iniekcji. Całkowity czas symulacji wraz z obserwacją wtłoczonego CO₂ do górotworu wynosi 230 lat, z czego przez pierwsze 5 lat symulacji trwa stabilizacja modelu (brak iniekcji). Zatłaczanie dwutlenku węgla odbywa się w tylko w części spągowej warstw dębowieckich. Miejsca iniekcji w otworach *Iskrzyczyn 1, Pogórze* i *Wygrabowice* znajdują się na tych samych głębokościach, a jedynie w otworze *Jasienica* mamy do czynienia z zatłaczaniem CO₂ na nieco mniejszej głębokości. Wiąże się to też z odmiennymi ciśnieniami dennymi w otworach iniekcyjnych. Szczegółowe dane dotyczące otworów iniekcyjnych zamieszczono w **Tab. 1.1.16_10**. Warunki początkowe w modelu przyjęto takie same jak dla wariantu I i przedstawiono je w **Tab. 1.1.16_11**. Podstawowe parametry zatłaczania w poszczególnych otworach iniekcyjnych zebrano w **Tab. 1.1.16_12**.

Tab. 1.1.16_10 Dane dotyczące otworów iniekcyjnych

	W-wy dębowieckie – otwory iniekcyjne			
	Iskrzyczyn 1	Pogórze	Wygrabowice	Jasienica
Miejscowość	Iskrzyczyn	Pogórze (Zalas, Kopaniny)	Wygrabowice	Podgaj, Podwarzyszcz
Gmina	Dębowiec	Skoczów	Jasienica	Jasienica
Wysokość [m npm]	290	296	354	305
Wsp. układu 1965	X: 221134 Y: 817408	X: 228867 Y: 819700	X: 235228 Y: 821396	X: 232861 Y: 822412
Wsp. układu 1942	X: 5 519 934 Y: 4 337 119	X: 5 522 015 Y: 4 344 914	X: 5 523 538 Y: 4 351 321	X: 5 524 618 Y: 4 348 982
Ciśnienie denne [MPa]	11,99	11,99	11,99	9,33
Entalpia [kJ/kg]	12,35	12,35	12,35	13,0

Tab. 1.1.16_11 Warunki początkowe przyjęte w modelu dla wariantu II

Parametr	Wartość przyjęta w modelu
Temperatura	35 °C
Zasolenie	20 % NaCl
Nasylenie CO	5 % CO ₂

Tab. 1.1.16_12 Zestawienie podstawowych parametrów zatłaczania w otworach iniekcyjnych

Otwór iniekcyjny	Czas	Ciśnienie denne [MPa]	Nasylenie CO ₂ [%]	Całkowita masa zatłoczonego CO ₂ [tys. Mg]	Wydajność zatłaczania [kg/s]
Iskrzyczyn 1	0	11,99	0,0500	0	0
	4 lat	12,13	0,0498	0	0
	5 lat	13,21	0,1426	1253,48	7,92
	10 lat	12,86	0,4734	2494,80	7,92
	15 lat	12,86	0,5059	3743,41	7,92
	20 lat	12,88	0,5277	5048,95	7,92
	25 lat	12,89	0,5466	6279,15	7,92
	30 lat	12,69	0,5232	7492,32	7,92
	50 lat	12,38	0,0729	7492,32	0
	80 lat	12,28	0,0657	7492,32	0
	100 lat	12,22	0,0625	7492,32	0
	130 lat	12,19	0,0611	7492,32	0
	Pogórze	0	11,99	0,0500	0
4 lat		12,14	0,0497	0	0
5 lat		12,99	0,1418	1253,48	7,92
10 lat		12,83	0,4584	2494,80	7,92
15 lat		12,84	0,4861	3743,41	7,92
20 lat		12,86	0,5046	5048,95	7,92
25 lat		12,88	0,5055	6279,15	7,92
30 lat		12,70	0,4010	7492,32	7,92
50 lat		12,34	0,0696	7492,32	0
80 lat		12,24	0,0625	7492,32	0
100 lat		12,18	0,0595	7492,32	0
130 lat		12,16	0,0583	7492,32	0
Wygrabowice		0	11,99	0,0500	0
	4 lat	12,12	0,0498	0	0
	5 lat	12,99	0,1418	1253,48	7,92
	10 lat	12,63	0,4573	2494,80	7,92
	15 lat	12,58	0,4828	3743,41	7,92
	20 lat	12,57	0,4829	5048,95	7,92
	25 lat	12,57	0,4756	6279,15	7,92
	30 lat	12,37	0,3928	7492,32	7,92
	50 lat	12,17	0,0693	7492,32	0
	80 lat	12,14	0,0623	7492,32	0
	100 lat	12,12	0,0593	7492,32	0
	130 lat	12,12	0,0582	7492,32	0
	Jasienica	0	9,33	0,0500	0
4 lat		9,23	0,0505	0	0
5 lat		10,40	0,1664	1253,48	7,92
10 lat		9,98	0,4686	2494,80	7,92
15 lat		10,01	0,5034	3743,41	7,92
20 lat		9,99	0,5303	5048,95	7,92
25 lat		9,98	0,5546	6279,15	7,92
30 lat		9,80	0,5121	7492,32	7,92
50 lat		9,32	0,0637	7492,32	0
80 lat		9,23	0,0586	7492,32	0
100 lat		9,20	0,0566	7492,32	0
130 lat		9,19	0,0558	7492,32	0

W czasie iniekcji dwutlenku węgla w poszczególnych otworach zaobserwowano następujące wzrosty ciśnień hydrostatycznych (**Fig. 1.1.16_79, Fig. 1.1.16_80, Fig. 1.1.16_81**):

- *Iskrzyczyn 1* – wzrost ciśnienia z 11,99 do 14,15 MPa (wzrost o 18%);
- *Pogórze* - wzrost ciśnienia z 11,99 do 13,65 MPa (wzrost o 13,85%);
- *Wygrabowice* - wzrost ciśnienia z 11,99 do 13,7 MPa (wzrost o 14,26%);
- *Jasienica* - wzrost ciśnienia z 9,33 do 11,1 MPa (wzrost o 19%).

Podobnie jak w przypadku wariantu I iniekcja CO₂ rozpoczyna się dopiero po 5 latach symulacji. Zabieg taki ma na celu stabilizację modelu w początkowej fazie symulacji, a obserwowany w tym czasie nieznaczny wzrost ciśnienia w komórkach iniekcyjnych spowodowany jest przepływem wód w tym rejonie.

Przebieg zmian ciśnienia w komórkach położonych w obrębie otworu *Pogórze* przedstawiono na **Fig. 1.1.16_82**. Pokazano wpływ iniekcji na przebieg zmian ciśnienia w warstwach położonych 50 m, 100 m i 200 m powyżej miejsca iniekcji, a także w warstwie nadkładu.

Na figurach **Fig. 1.1.16_83-87**, przedstawiono zasięg strefy nasycenia CO₂ w warstwach dębowieckich na poszczególnych poziomach (-600, -650, -700, -800 m n.p.m.) po 200 latach od zakończenia zatłaczania.

a) Iskrzyczyn 1

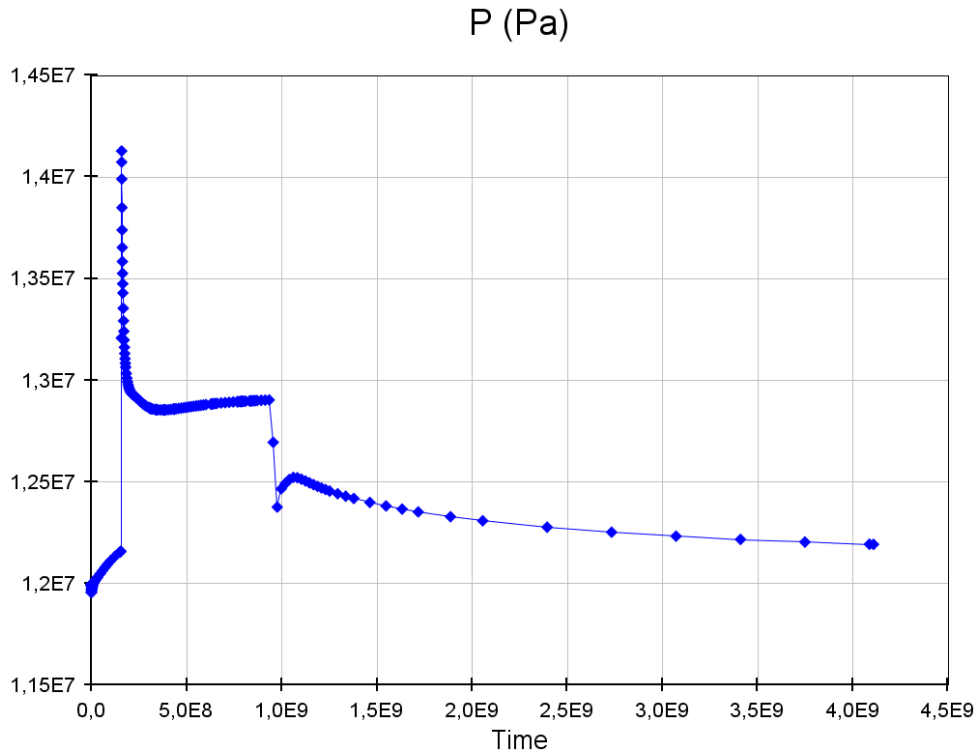


Fig. 1.1.16_79 Ciśnienie denne w otworach iniekcyjnych w trakcie zatłaczania oraz po jego zakończeniu (a – otwór Iskrzyczyn 1)

b) Pogórze

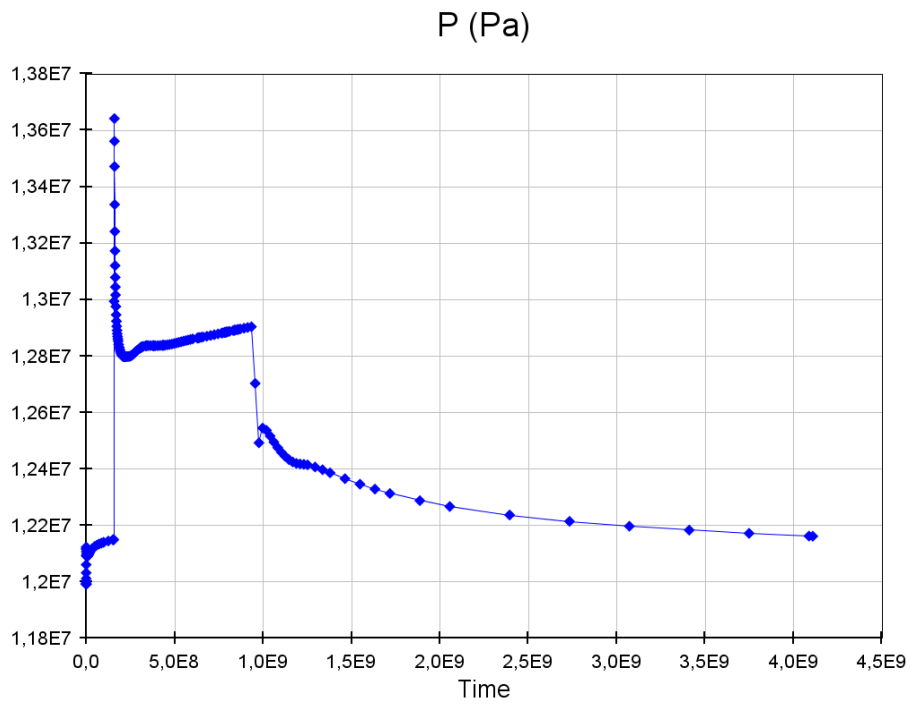
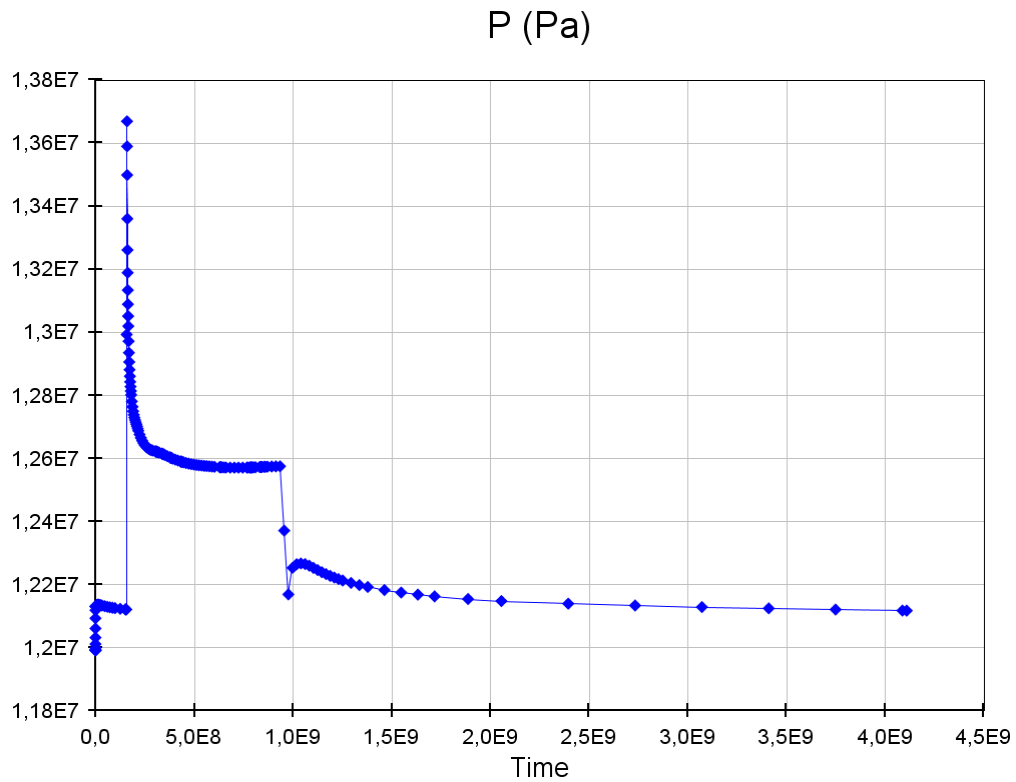


Fig. 1.1.16_80 Ciśnienie denne w otworach iniekcyjnych w trakcie zatłaczania oraz po jego zakończeniu (b – otwór Pogórze)

a) Wygrabowice



b) Jasienica

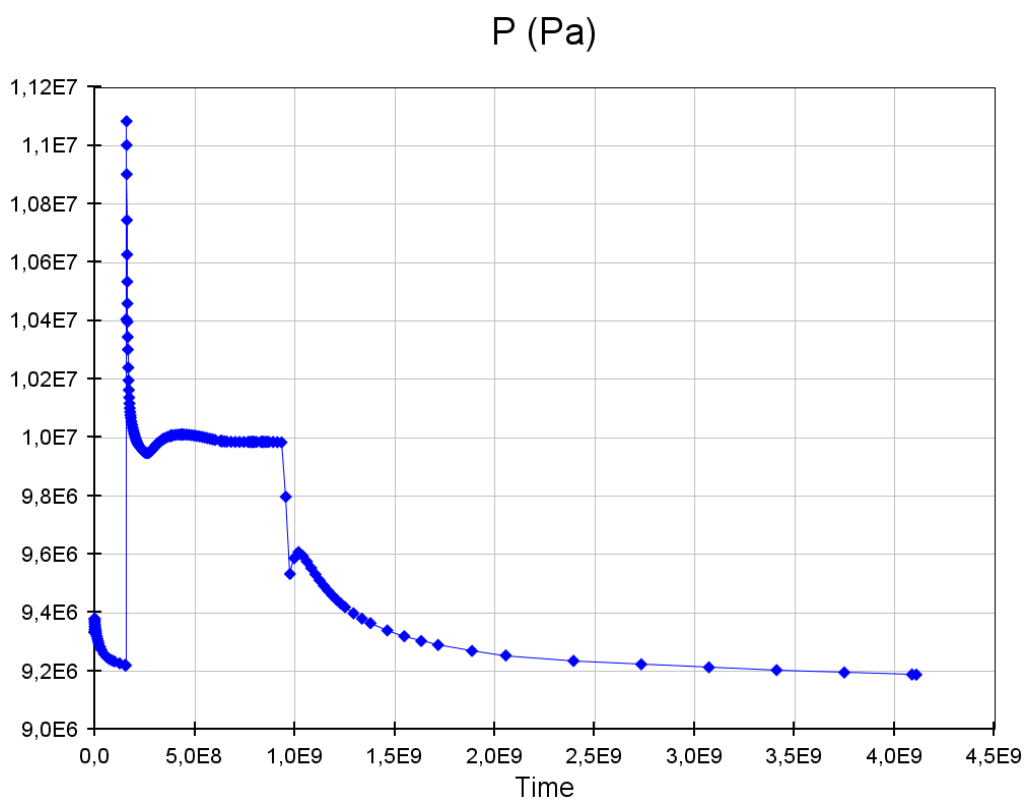


Fig. 1.1.16_81 Ciśnienie denne w otworach iniekcyjnych w trakcie zatłaczania oraz po jego zakończeniu (a – otwór Wygrabowice, b – otwór Jasienica)

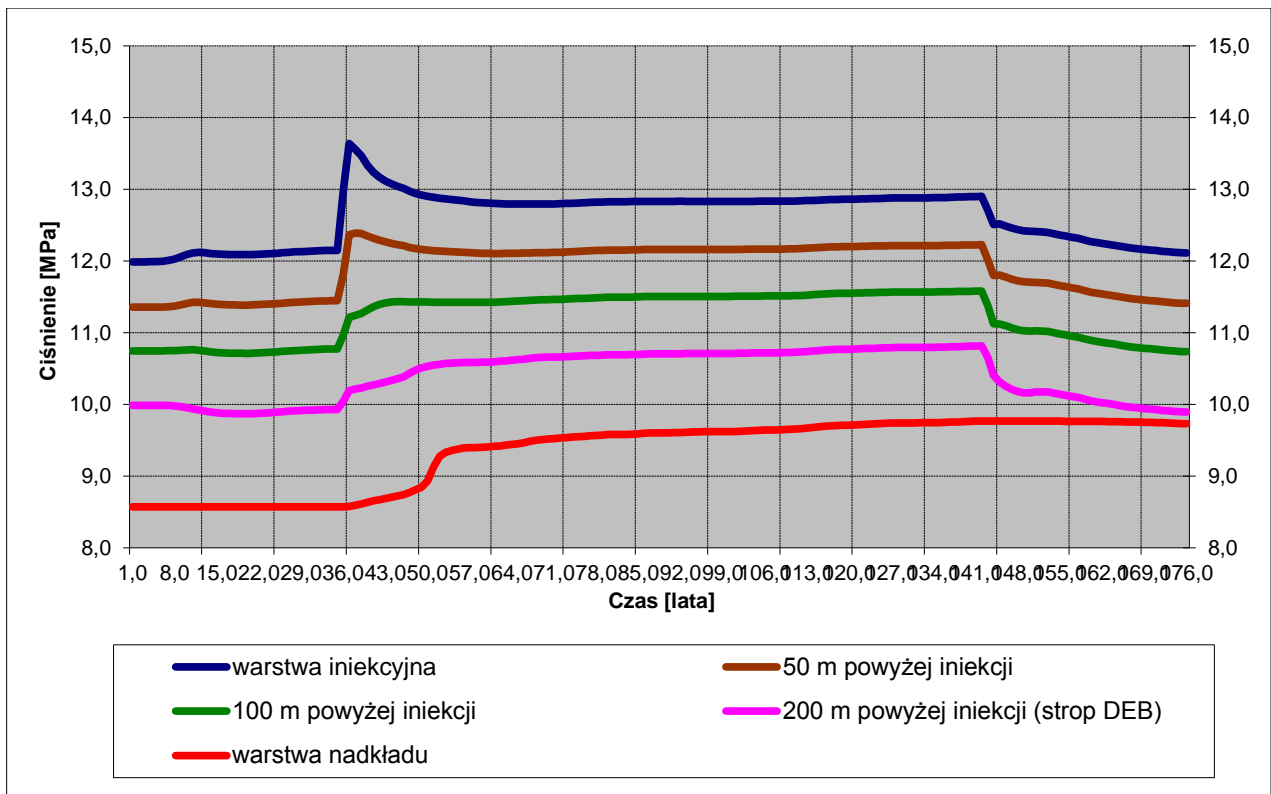
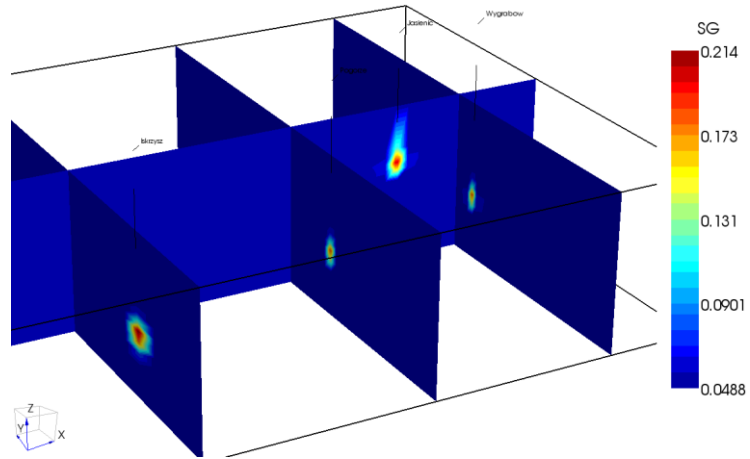
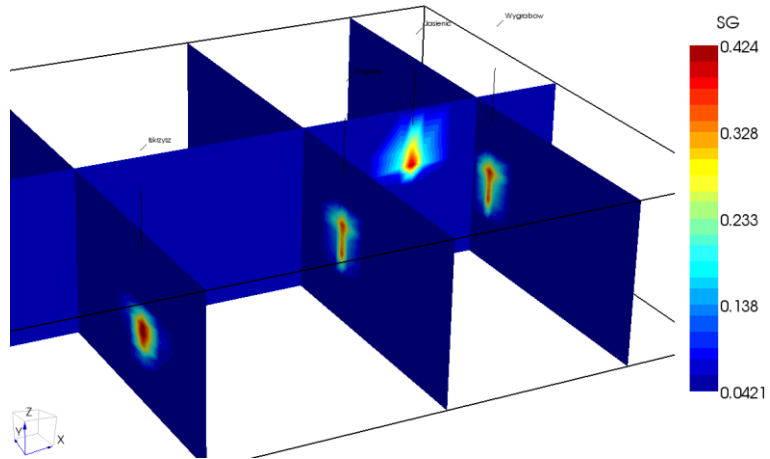


Fig. 1.1.16_82 Przebieg zmian ciśnienia w komórkach położonych w obrębie otworu iniekcyjnego *Pogórze*

początek iniekcji



po 5 latach iniekcji



po 15 latach iniekcji

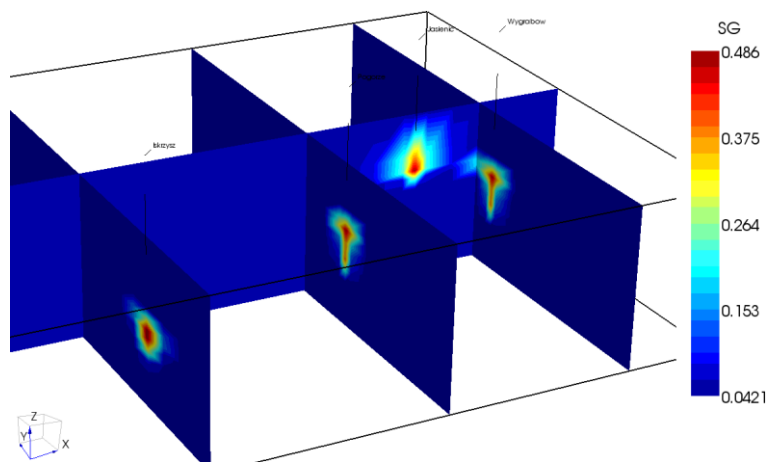
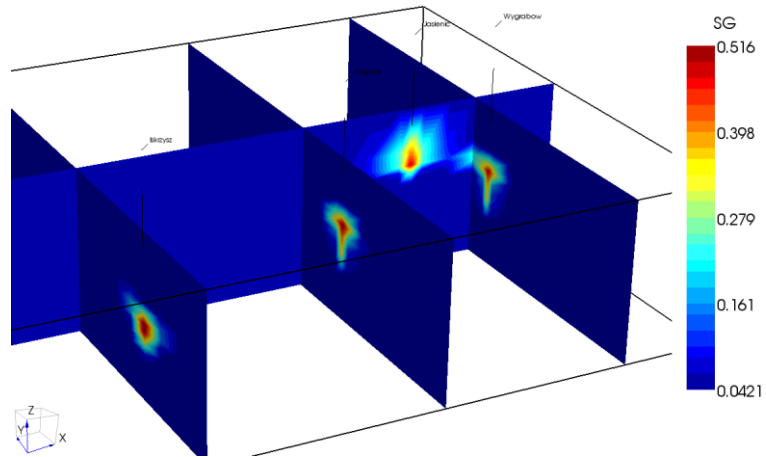
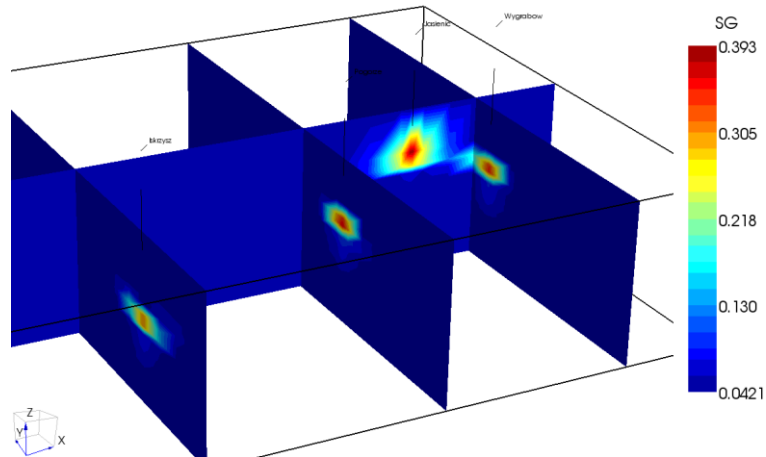


Fig. 1.1.16_83a Rozkład nasycenia CO₂ w modelu – wariant II

po 25 latach iniekcji (zakończenie iniekcji)



10 lat po zakończeniu iniekcji



50 lat po zakończeniu iniekcji

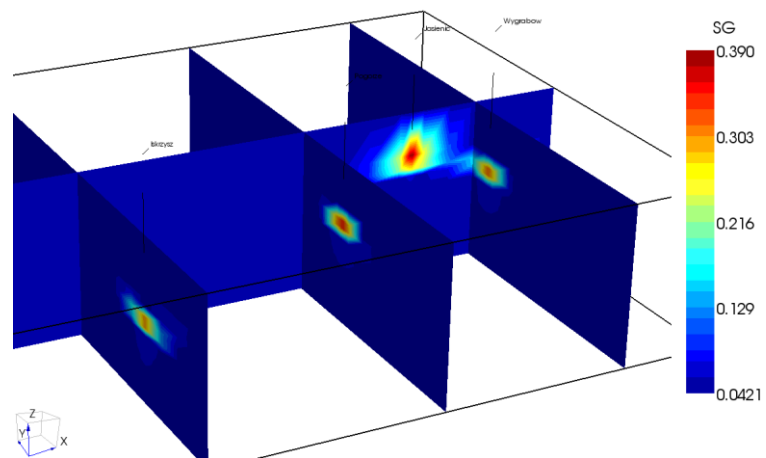
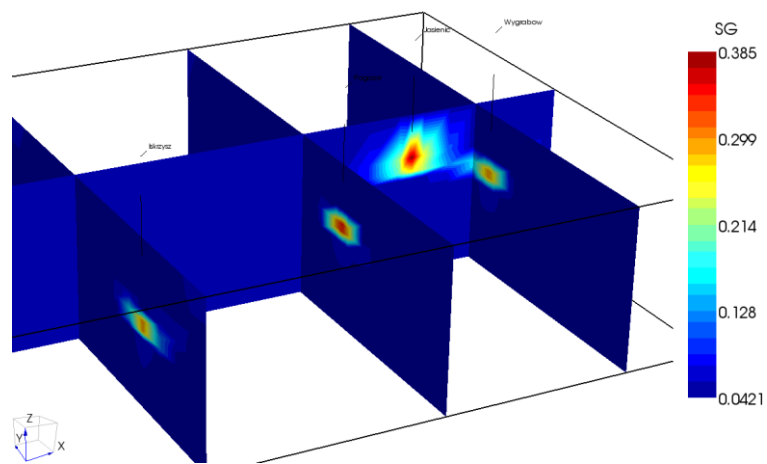


Fig. 1.1.16_83b Rozkład nasycenia CO₂ w modelu – wariant II

100 lat po zakończeniu iniekcji



200 lat po zakończeniu iniekcji

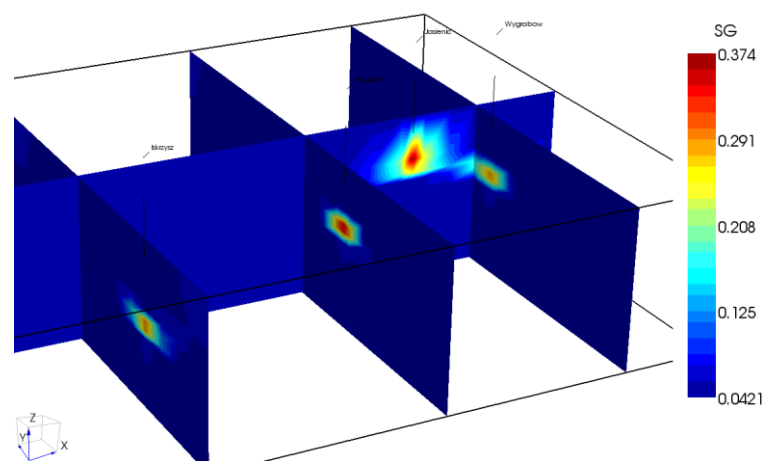


Fig. 1.1.16_83c Rozkład nasycenia CO₂ w modelu – wariant II

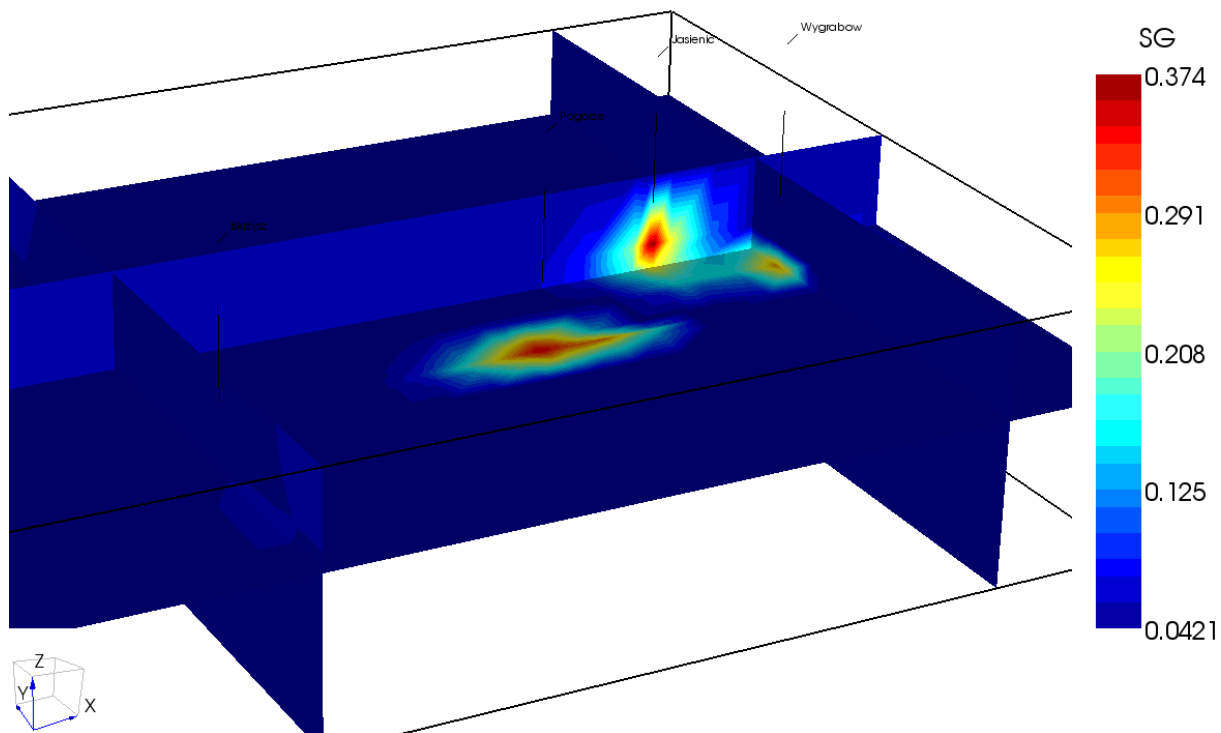


Fig. 1.1.16_84 Zasięg strefy nasycenia CO₂ w warstwach dębowieckich na głębokości -600 m n.p.m. po 200 latach od zakończenia zatłaczania

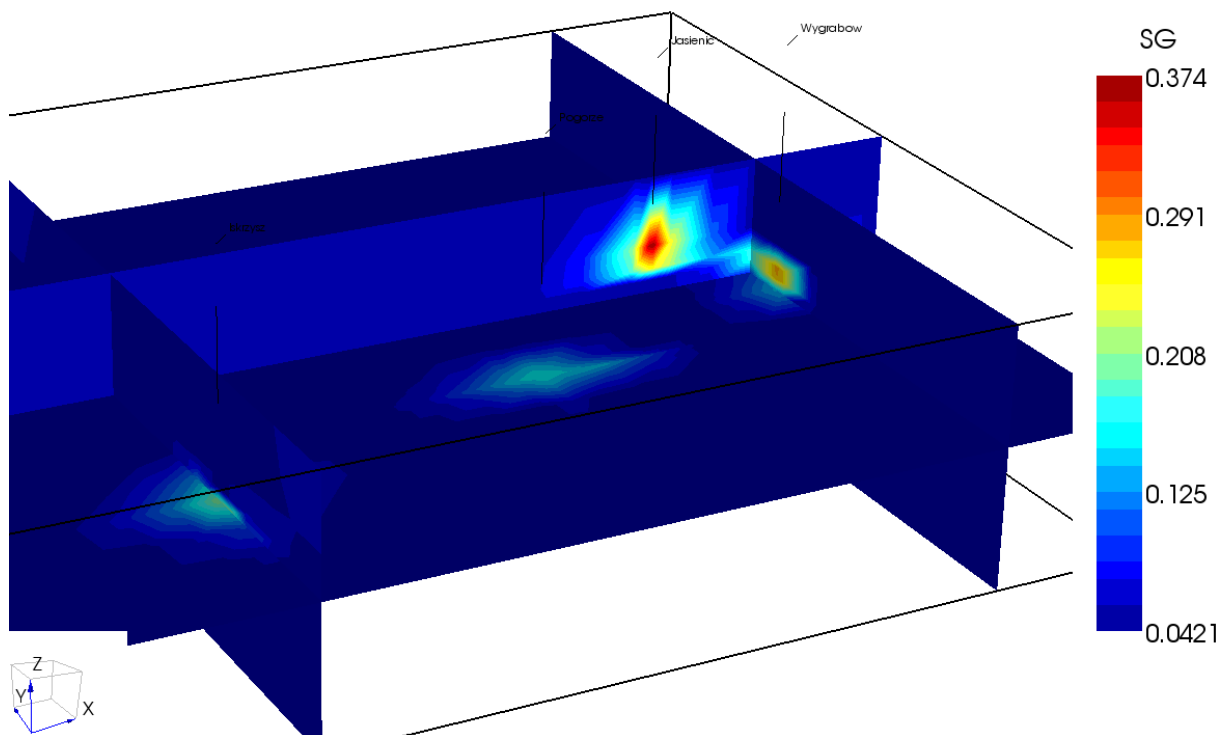


Fig. 1.1.16_85 Zasięg strefy nasycenia CO₂ w warstwach dębowieckich na głębokości -700 m n.p.m. po 200 latach od zakończenia zatłaczania

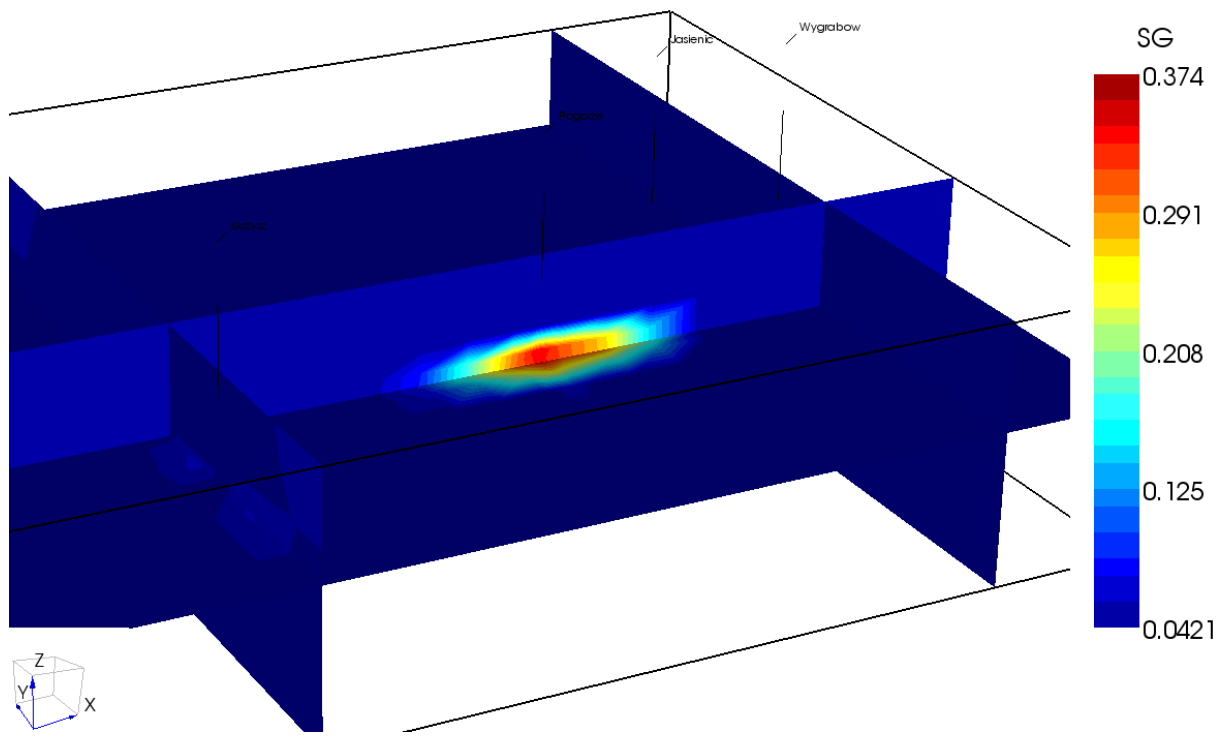


Fig. 1.1.16_86 Zasięg strefy nasycenia CO₂ w warstwach dębowieckich w otworze *Pogórze* na głębokości -650 m n.p.m. po 200 latach od zakończenia zatłaczania

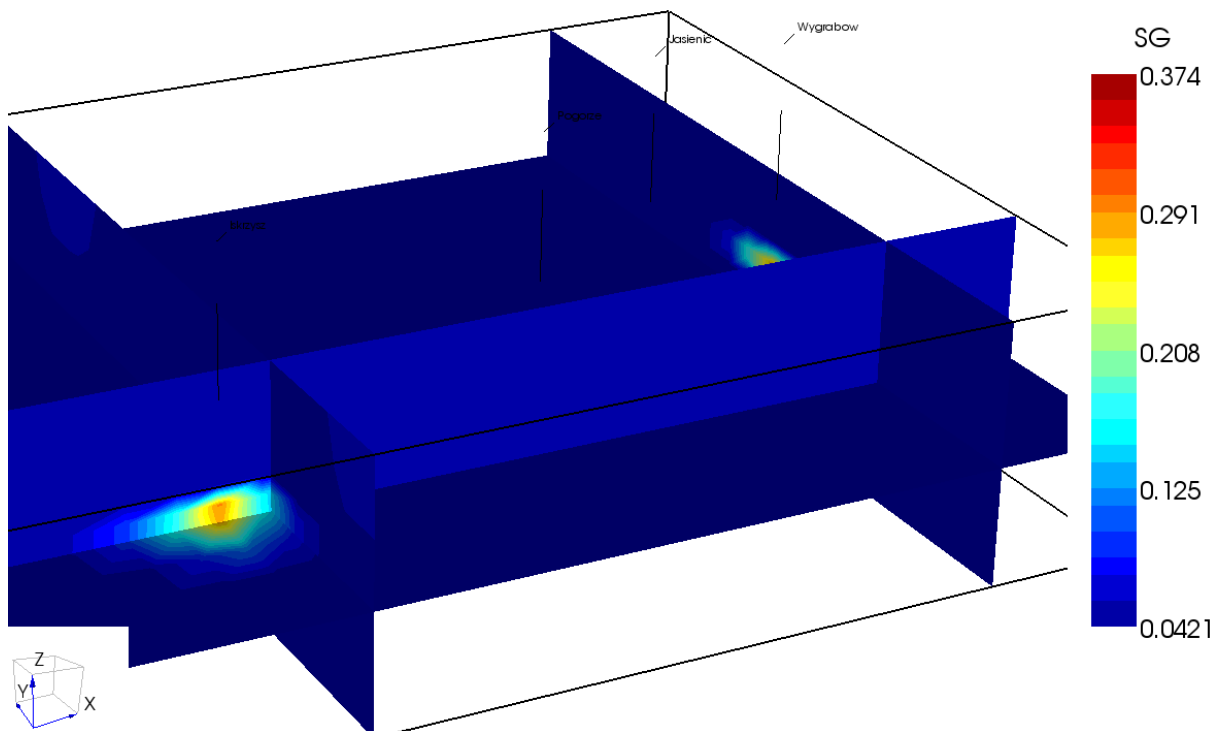


Fig. 1.1.16_87 Zasięg strefy nasycenia CO₂ w warstwach dębowieckich w otworze *Iskrzyżyn 1* na głębokości -800 m n.p.m. po 200 latach od zakończenia zatłaczania

Symulacja iniekcji CO₂ - wariant III

Trzeci wariant symulacji obejmuje proces zatłaczania dwutlenku węgla czterema otworami (*Iskrzyczyn 1, Pogórze, Wygrabowice, Jasienica*) przez okres 25 lat. Warstwom dębowieckim przypisano w tym wariantcie modelu przepuszczalność równą 35 mD. Zatłaczanie dwutlenku węgla odbywa się w tylko w części spągowej warstw dębowieckich. Przewyższenie ciśnienia w stropie zbiornika, informujące o ryzyku rozszczelnienia skał nadkładu, w żadnym z otworów nie przekroczyło 20%. Pozwoliło to na zatłoczenie w sumie około 25 mln Mg dwutlenku węgla. Szczegółowe wartości parametrów zatłaczania przedstawiono w **Tab. 1.1.16_13**.

Tab. 1.1.16_13. Szczegółowe wartości parametrów zatłaczania dla wariantu IV

Parametr	Warstwy dębowieckie – otwory iniekcyjne			
	Iskrzyczyn 1	Pogórze	Wygrabowice	Jasienica
Początkowe ciśnienie denne [MPa]	11,99	11,99	11,99	9,33
Maksymalne ciśnienie denne [MPa]	14,53	13,97	14,04	11,58
Wzrost ciśnienia dennego [%]	21,2	16,5	17,1	24,1
Początkowe ciśnienie w stropie zbiornika [MPa]	10,75	9,33	9,33	8,57
Maksymalne ciśnienie w stropie zbiornika [MPa]	12,28	10,51	10,12	10,21
Wzrost ciśnienia w stropie zbiornika [%]	14,2	13,0	8,5	19,1
Maksymalne nasycenie CO ₂ w stropie zbiornika [%]	53,8	57,8	55,5	53,7
Wydatek zatłaczania CO ₂ [kg/s]	7,92	7,92	7,92	7,92
Ilość zatłoczonego CO ₂ w czasie 1 roku [tys. Mg/rok]	249,765	249,765	249,765	249,765
Ilość zatłoczonego CO ₂ w czasie 25 lat [mln Mg/rok]	6,245	6,245	6,245	6,245
Całkowita ilość zatłoczonego CO ₂ w czasie 25 lat [mln Mg]	24,98			

Największy wzrost ciśnienia w stropie zbiornika warstw dębowieckich (19,1%) zaobserwowano w obrębie otworu Jasienica. Przebieg zmian ciśnienia w warstwie iniekcyjnej oraz we warstwie stropowej zbiornika dla tego otworu przedstawiono na **Fig. 1.1.16_88** i **Fig. 1.1.16_89**.

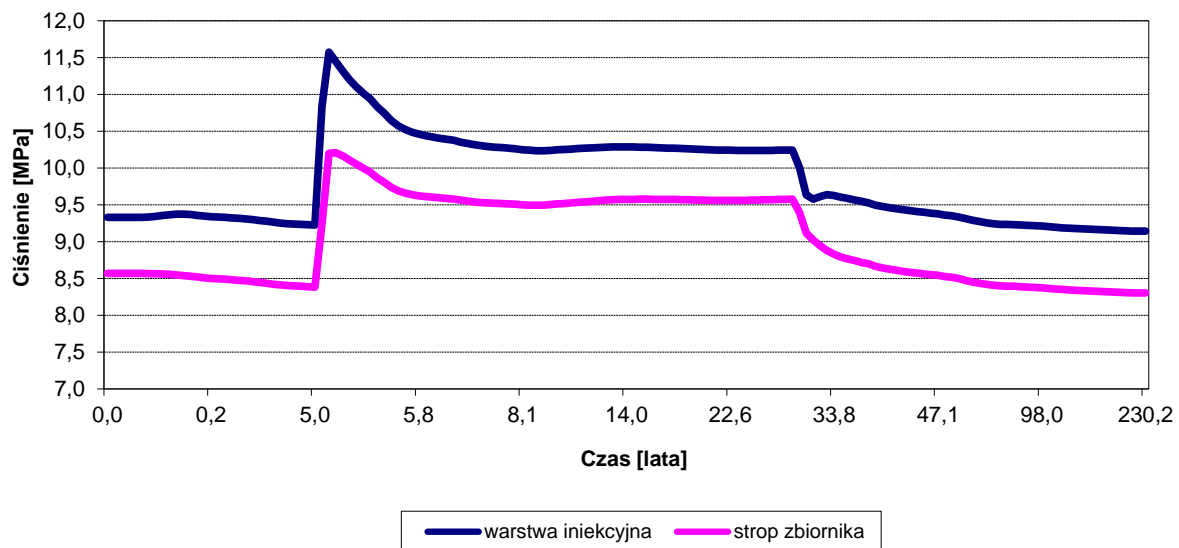


Fig. 1.1.16_88 Przebieg zmian ciśnienia w otworze Jasienica

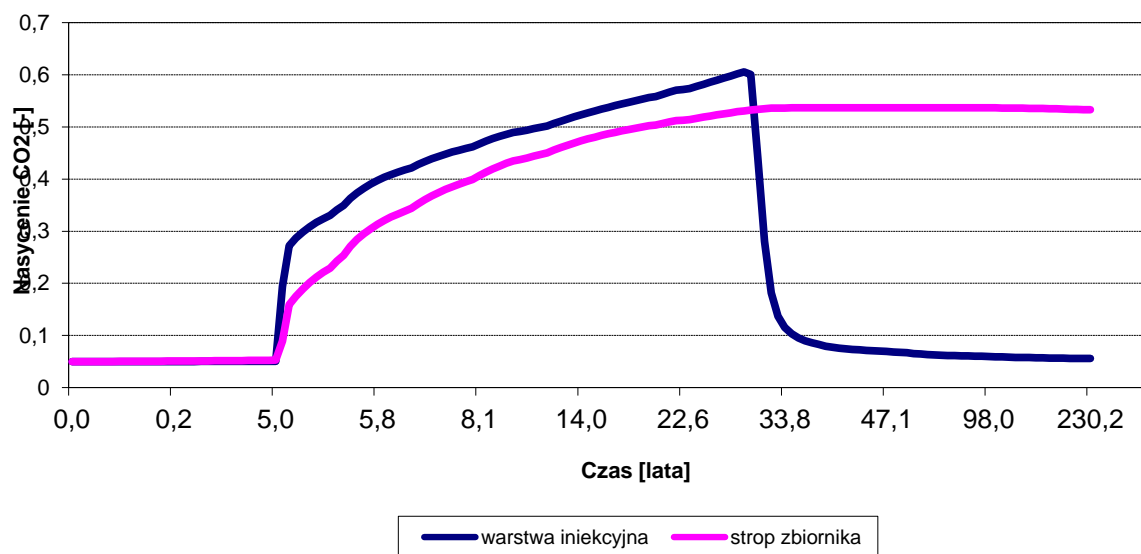


Fig. 1.1.16_89 Przebieg zmian nasycenia CO₂ w otworze Jasienica

Podsumowanie

Przeprowadzono symulacje zatłaczania dwutlenku węgla do struktury zbiornikowej w obrębie osadów miocenu. W pierwszym wariantcie zatłoczono jednym otworem *Iskrzyczyn 1* do warstw dębowieckich około 7,5 mln Mg CO₂, a do warstw zamarskich – około 3,75 mln Mg CO₂. W czasie iniekcji dwutlenku węgla do warstw dębowieckich zaobserwowano w miejscu iniekcji wzrost ciśnienia o 14,43 % oraz szybki wzrost nasycenia warstwy iniekcyjnej do 86,7 %. Natomiast w przypadku iniekcji w warstwach zamarskich nastąpił wzrost ciśnienia o 18,5 % oraz szybki wzrost nasycenia warstwy do 62 %. Ciśnienie w stropie zbiornika zwiększyło się o 13,2%.

Symulacja w wersji II obejmuje zatłaczanie CO₂ czterema otworami przez okres 25 lat. Pozwoliło to na zatłoczenie w sumie 25 mln Mg CO₂ przez cały okres iniekcji. Wzrost ciśnienia hydrostatycznego w komórkach iniekcyjnych otworów zawierał się w przedziale od 13,85 do 19%, a w warstwie stropowej zbiornika wzrost ten nie przekroczył 15,6%. Natomiast maksymalne zaobserwowane wartości nasycenia dwutlenkiem węgla dla komórek zlokalizowanych w stropie zbiornika wartość ta wynosiła od 55,2 do 56,7%.

Podczas symulacji w wariantcie III zaobserwowano generalnie większe wartości ciśnień. Jednak przewyższenia ciśnień w stropie zbiornika, informujące o ryzyku rozszczelnienia skał nadkładu, nie przekroczyło 20% w żadnym z przeprowadzonych wariantów symulacji.

Z analizy krzywych ilustrujących przebieg zmian nasycenia CO₂ w komórkach zlokalizowanych w obrębie otworu iniekcyjnego Pogórze wynika wyraźny brak wpływu iniekcji CO₂ na zmiany nasycenia CO₂ w warstwie nadkładu. Ponadto można stwierdzić, że komórki usytuowane w części stropowej zbiornika oddalone o około 300 m od komórki iniekcyjnej nie wykazują już wzrostu nasycenia dwutlenkiem węgla.

Modelowania dynamiczne dla rejonu Bielska Białej (AGH;symulator GEM)

(Jakub Siemek, Stanisław Nagy, Łukasz Klimkowski, Rafał Sedlaczek, Rafał Smulski)

Lokalizacja składowiska w rejonie Bielska - warstwy dębowieckie oraz warstwy dewonu środkowego.

W rejonie południowego obrzeżenia górnośląskiego zagłębia węglowego (Rejon Bielska) rozpoznane zostały następujące piętra wodonośne:

- czwartorzędowe,
- kredowo-paleogeńskie,
- trzeciorzędowe-neogeńskie, w którym wyróżniono poziomy wodonośne formacji skawińskiej oraz ogniwa dębowieckiego,
- paleozoiku, w obrębie którego wyróżniono poziom wodonośny serii węglanowej dolnego karbonu, górnego i środkowego dewonu oraz poziom wodonośny dewonu dolnego i kambriu.

Występowanie izolujących utworów trzeciorzędowych związanych z formacją skawińską, uniemożliwia zasilanie niżej zalegających poziomów wodonośnych przez wody atmosferyczne, a także izoluje je zarówno od wód powierzchniowych jak również od wód słodkich występujących w czwartorzędzie.

W związku z tym poziomy wodonośne ogniwa dębowieckiego, serii węglanowej karbonu, dewonu środkowego i górnego oraz osadów klastycznych dewonu dolnego i kambriu są praktycznie nieodnawialne i występują w nich wody reliktowe. Podobny obszar przeznaczony został na cele sekwestracyjne w USA w Arizonie (zob. Beyer J.H., 2008). Formację dębowiecką tworzą brekcje z nieautochtonicznych utworów fliszowych oraz głązowiska, zlepieńce i piaskowce występujące w obszarze położonym na przedpolu i wzdłuż brzegu Karpat. Źródłem dostarczanego materiału początkowego na stożki usypiskowe i napływowe, a później podmorskie były syntektoniczne obrywy stromych stoków z wychodniami pokładów węgla (Jachowicz & Jura, 1987; Jura, 2001).

Poziom wodonośny serii węglanowej dolnego karbonu oraz górnego i środkowego dewonu związany jest z masywnym kompleksem złożonym z wapieni i dolomitów z cienkimi wkładkami margli lub piaskowców. Miąższość serii jest zmienna, od 0,0m w rejonie położonym na południe od otworu Kęty 3 do 800-1000 m w kierunku zachodnim (otwór Krasna 1 - 858 m), północnym (otwór Goczałkowice IG-1 - 820 m) i północno-wschodnim. Seria węglanowa reprezentowana przez wapień i dolomity, tworzy zbiornik hydrogeologiczny, w którym prowadzenie wody jest uzależnione głównie od stopnia spękań i skrasowienia węglanowego górotworu. Silne zaangażowanie tektoniczne rejonu badań oraz procesy krasowe umożliwiły powstanie systemu szczelin i pustek krasowych decydujących o charakterze szczelinowo-krasowym warstw wodonośnych. Na skutek procesów diagenety, kompaktacji, rekrytalizacji i cementacji nastąpiło częściowe zaciśnięcie szczelin i pustek oraz zmniejszenie przepuszczalności górotworu, nie mniej jednak seria węglanowa stanowi najbardziej zasobny poziom wodonośny w rozpatrywanym rejonie badań oraz najbardziej perspektywiczny pod kątem możliwości zastosowania głębokiego zatłaczania.

Model złożowy statyczny dla rejonu Bielska

Mapy strukturalne, mapy miąższości, mapy porowatości oraz informacje odnośnie przepuszczalności – uzyskane ze Państwowego Instytutu Geologicznego – Oddział Górnośląski – zostały zaimplementowane do budowy modelu statycznego. Opis własności – szczegółowo został podany w części pierwszej opracowania (PIG).

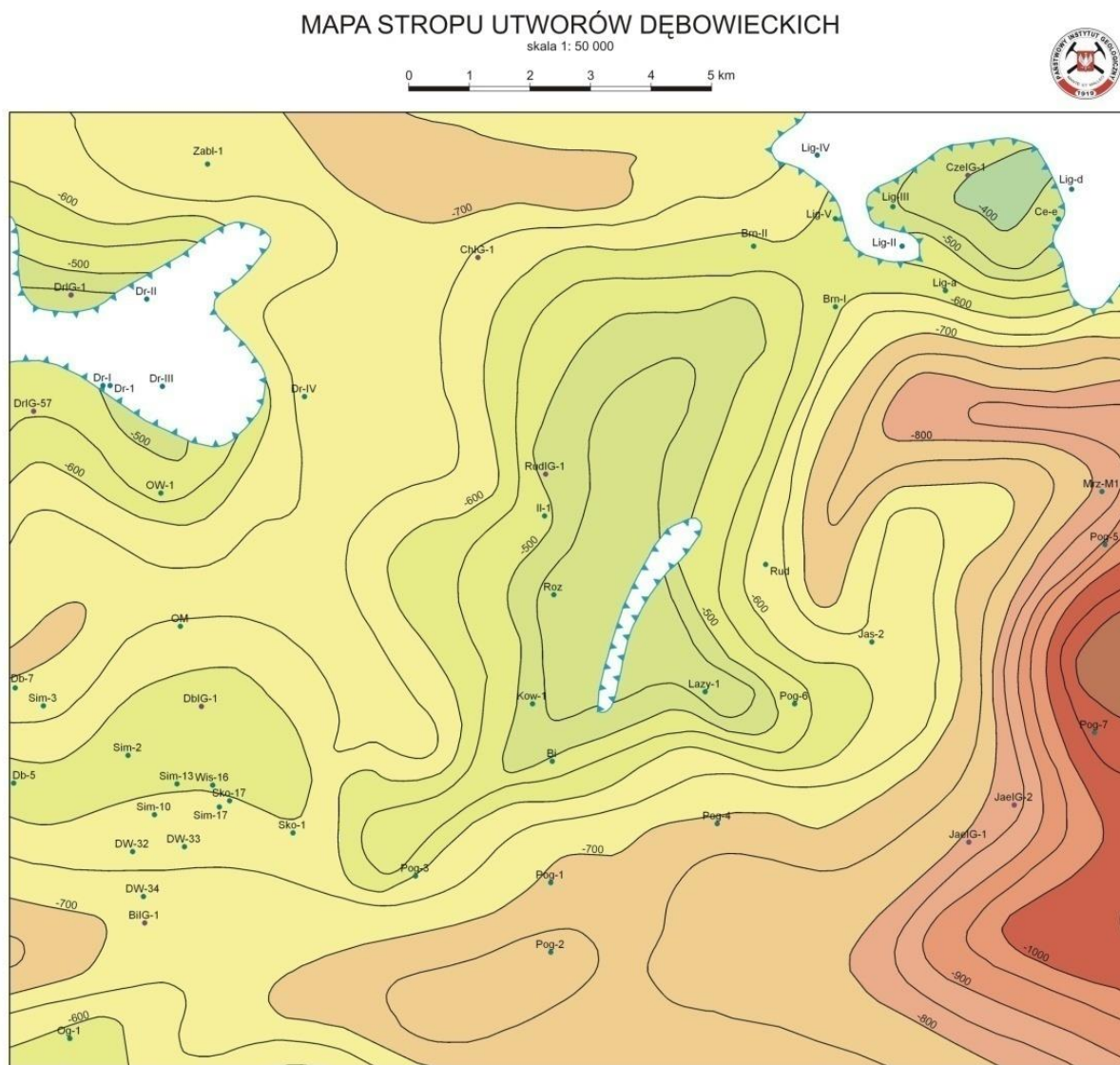


Fig. 1.1.16_90 Mapa stropu rejonu Bielska – warstwy dębowieckie (wg PIG)

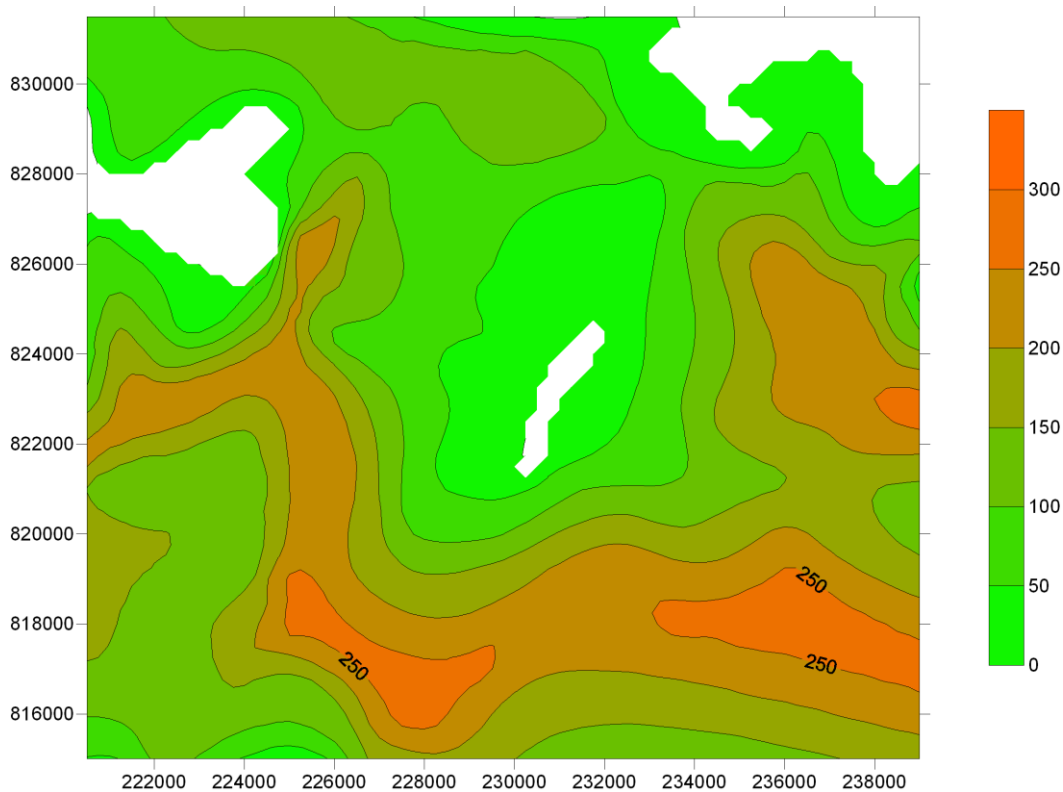


Fig. 1.1.16_91 Mapa miąższości całkowitej warstwy dębowieckich (wg PIG)

Lokalizacja otworów

Przyjęto położenie odwiertów do zatłaczania przyjęto jak w tabelicy poniżej:

Tab. 1.1.16_14 Współrzędne otworów do zatłaczania

	Współrzędne geograficzne	Układ 1965 (strefa 5)
INJ 01	18,9566059996 E	Y=235716
	49,8530168622 N	X=824538
INJ 02	18.956606124 E	Y=235353
	49.8498071503 N	X=824181
INJ 03	18,9566063006 E	Y=235207
	49.8452488193 N	X=823674
INJ 04	18.956606456 E	Y=235051
	49.8412389232 N	X=823228

Wybór związany był z analizą dostępności (dojazdu) w trudnych górzystych warunkach terenowych.

Wydajności tłoczenia i maksymalnych represji ciśnienia zatłaczania i liczby otworów

Przyjęto zatłaczanie czterema odwiertami pionowymi przy założeniu 1250 t/d. Ze względu na brak właściwej komunikacji hydraulicznej pomiędzy warstwami zauważa się szybki spadek ilości zatłaczanego CO₂ w czasie oraz szybkie narastanie ciśnienia do założonego maksymalnego ciśnienia w złożu (20% powyżej ciśnienia hydrostatycznego)

Oddziaływania długoterminowe reakcji CO₂ ze skałami i solanką

Nie przeprowadzono analizy z uwagi na brak dostatecznej liczby danych. Dane dot. składu mineralogicznego warstw dębowieckich – nie wykazują szczególnych zagrożeń związanych z długotrwałym oddziaływaniem CO₂ na skałę. Należy liczyć się z klasycznym oddziaływaniem, które nie stwarza większych zagrożeń. Badania dodatkowe muszą być wykonane po otrzymaniu materiału bezpośrednio z wierceń (rdzenie wiertnicze)

Opis metodyki tworzenia modelu

Na podstawie zbudowanego regionalnego modelu statycznego stworzono model numeryczny do zatłaczania CO₂. Do realizacji zadania wykorzystano symulator GEM (Computer Modelling Group).

Zbudowany model dynamiczny został zaimportowany do programu GEM z programu PETREL (AGH WGGiOŚ) a następnie zmodyfikowany celem przeprowadzenia symulacji procesu zatłaczania:

1. wprowadzono informacje o zaileniu oraz porowatości wygenerowane metodą krigingu w Petrelu,
2. zbudowano nowy rozkład przepuszczalności 3D opierający się na geofizycznym modelu Zawiszy,
3. przyjęto, że przepuszczalność pionowa stanowi 10% przepuszczalności poziomej.

Zmodyfikowano siatkę (grid) modelu wprowadzając lokalne zagęszczenie strefy zatłaczania blokami o wymiarach w kierunkach X Y 200x200 m.

Na figurze poniżej pokazano zmienność gęstości CO₂ w zależności od temperatury (**Fig. 1.1.16_92**), zaś wpływ ciśnienia i temperatury oraz głębokości składowania jest przedstawiony na **Fig. 1.1.16_93**. Najbardziej korzystne jest składowanie CO₂ w temperaturach superkrytycznych (ok. 40°C) przy ciśnieniu wyższym niż 7,4 MPa. W tych warunkach jednak, z uwagi na własności kinematyczne faza gazowa CO₂ posiada relatywnie największą ruchliwość (skłonność do migracji lateralnej) – co nakłada na operatora magazynu geologicznego dodatkowe wymagania monitoringu.

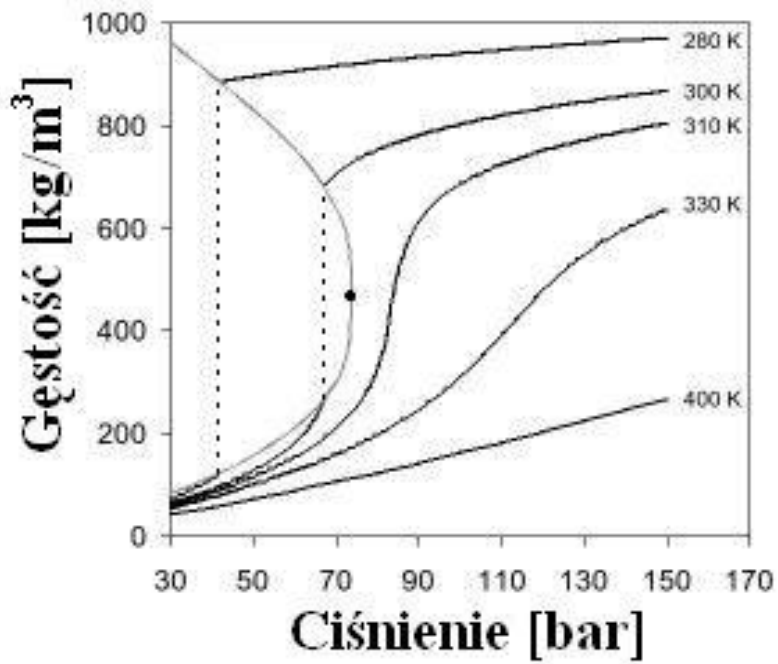


Fig. 1.1.16_92 Zmienność gęstości składowania CO₂ w funkcji temperatury złożowej

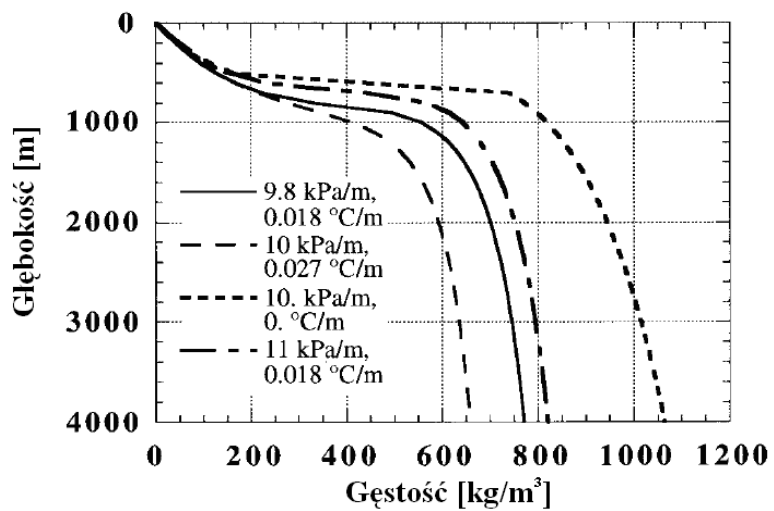


Fig. 1.1.16_93 Zmienność gęstości składowania w funkcji ciśnienia, temperatury geotermicznej i głębokości (McCoy, 2008)

Optymalne lokalizacje magazynów CO₂ (dla głębokości do 1200 m) gwarantują niski koszt wiercenia, niski koszt zatłaczania oraz maksymalne upakowanie zatłaczanego płynu w złożu.

Własności PVT dla zatłaczanego CO2

Własności PVT dla CO2 wyznaczono według równania stanu Penga – Robinsona oraz modelu Jossi – Stiel - Thodosa w zakresie ciśnienia 7 - 12 MPa/ temperatury 32 - 40 °C oraz 15 – 20 MPa/ 40 – 50 °C. Na figurach poniżej pokazano zmianę gęstości i zmienność lepkości w funkcji ciśnienia i temperatury.

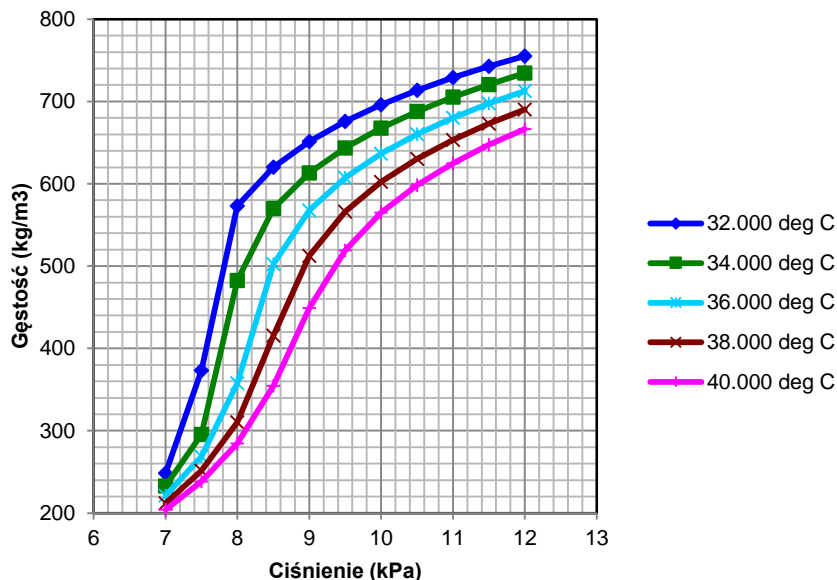


Fig. 1.1.16_94 Zmiana gęstości CO2 w zakresie ciśnień 7 – 12 [MPa] i temperatur 32 – 40 [°C]

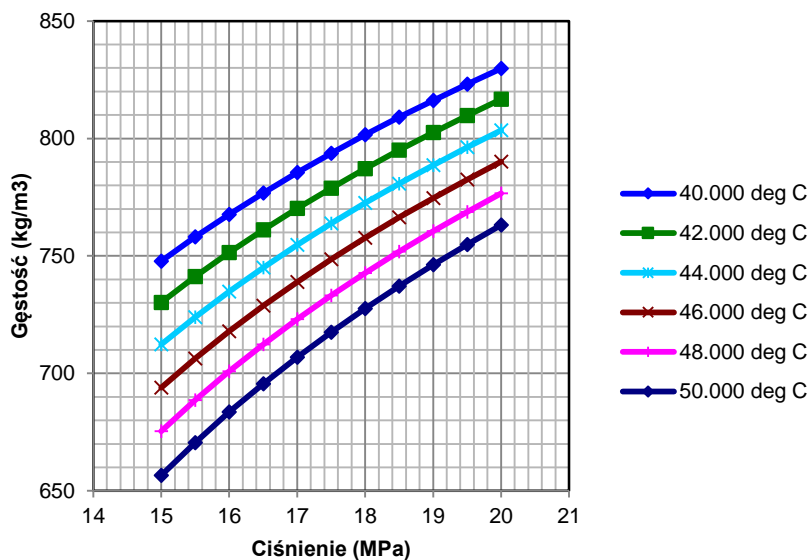


Fig. 1.1.16_95 Zmiana gęstości CO2 w zakresie ciśnień 15 – 20 [MPa] i temperatur 40 – 50 [°C]

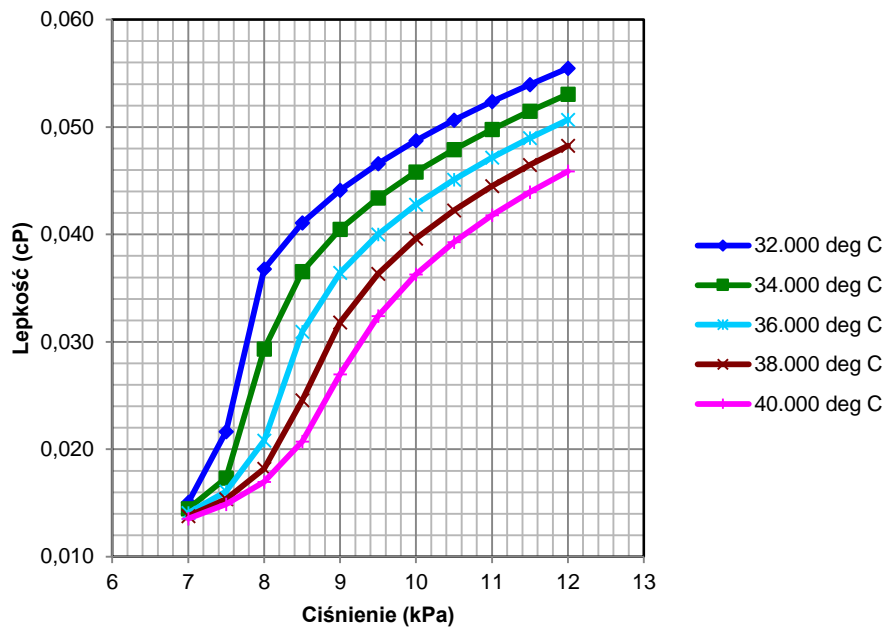


Fig. 1.1.16_96 Zmiana lepkości CO2 w zakresie ciśnień 7 – 12 [MPa] i temperatur 32 – 40 [°C]

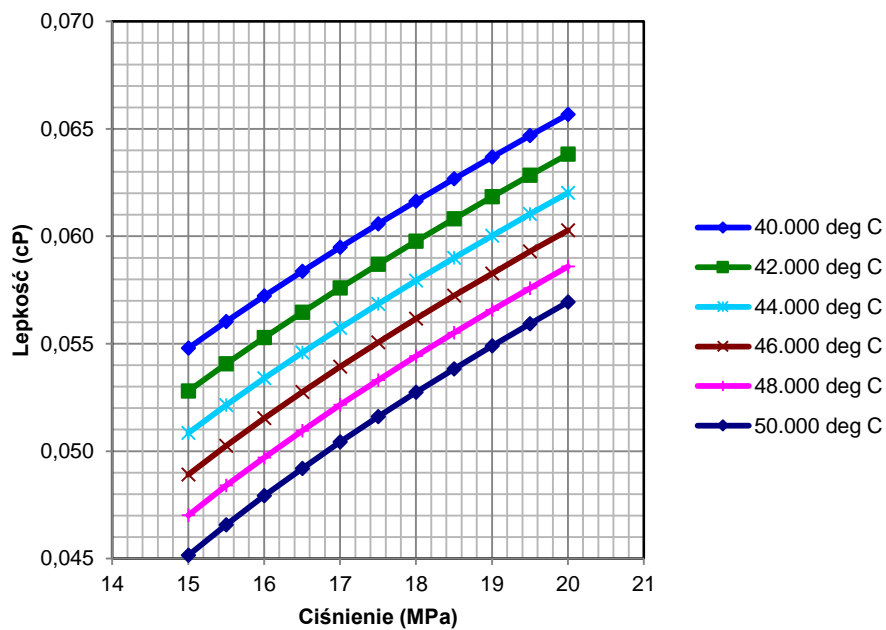


Fig. 1.1.16_97 Zmiana lepkości CO2 w zakresie ciśnień 15 – 20 [MPa] i temperatur 40 – 50 [°C]

Własności modelu przepuszczalności względnych k_{rg} i k_{rw} określono według tablicy:

Tab. 1.1.16_15 Zależność przepuszczalności względnych i nasycenia wodą wykorzystana w modelu

L.p.	S_w	k_{rw}	k_{rg}
1	0	0	1,000000
2	0,05	0	0,977220
3	0,1	0	0,954430
4	0,15	0,00001	0,655620
5	0,2	0,00015	0,506570
6	0,25	0,00077	0,395200
7	0,3	0,00244	0,307520
8	0,35	0,00595	0,232750
9	0,4	0,01235	0,180650
10	0,45	0,02287	0,136180
11	0,5	0,03902	0,098940
12	0,55	0,0625	0,070420
13	0,6	0,09526	0,048370
14	0,65	0,13947	0,031740
15	0,7	0,19753	0,019610
16	0,75	0,27207	0,011140
17	0,8	0,36595	0,005610
18	0,85	0,48225	0,002330
19	0,9	0,6243	0,000680
20	0,95	0,79562	0,000080
21	1	1	0,000000

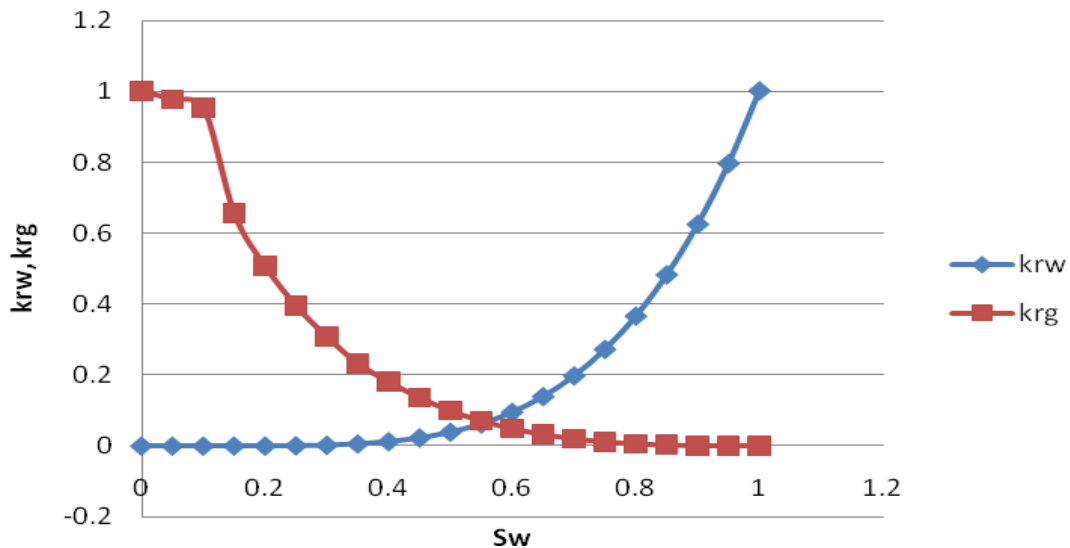


Fig. 1.1.16_98 Zależność przepuszczalności względnych od nasycenia wodą wykorzystana w modelu

Przyjęto ciśnienie złożowe na poziomie - 1000 m ppm równe ciśnieniu hydrostatycznemu. W modelu przyjęto temperaturę 32 °C jako temperaturę minimalną w stropie. Temperatura modelu zmienia się od 32 °C do 40 °C

Założono minimalny wpływ regionalnego przepływu na proces zatłaczania (rzędu 0,3 m/rok). Dla omawianego wariantu bazowego nie wprowadzono istotnego ruchu wód przyjmując $v_{reg} = 0$ m/rok.

Opis modelu zatłaczania

Zbudowano model numeryczny w oparciu o dane geologiczne i model statyczny. Model trójwymiarowy - 10 warstwowy. Własności transportowe dobrano na podstawie informacji uzyskanych przez PIG. Przyjęto brak istotnej wymiany wód w tym rejonie (wymiana rzędu kilku cm na rok). Przyjęto ciśnienie hydrostatyczne i temperaturę pomierzoną w otworach badawczych (Czechowice IG-1). Założono maksymalną represję w modelu 20% powyżej ciśnienia hydrostatycznego. Przyjęto ciśnienia w otworach zatłaczających jako maksymalnie 90% ciśnienia szczelinowania. Wyniki pokazano na wykresach poniżej.

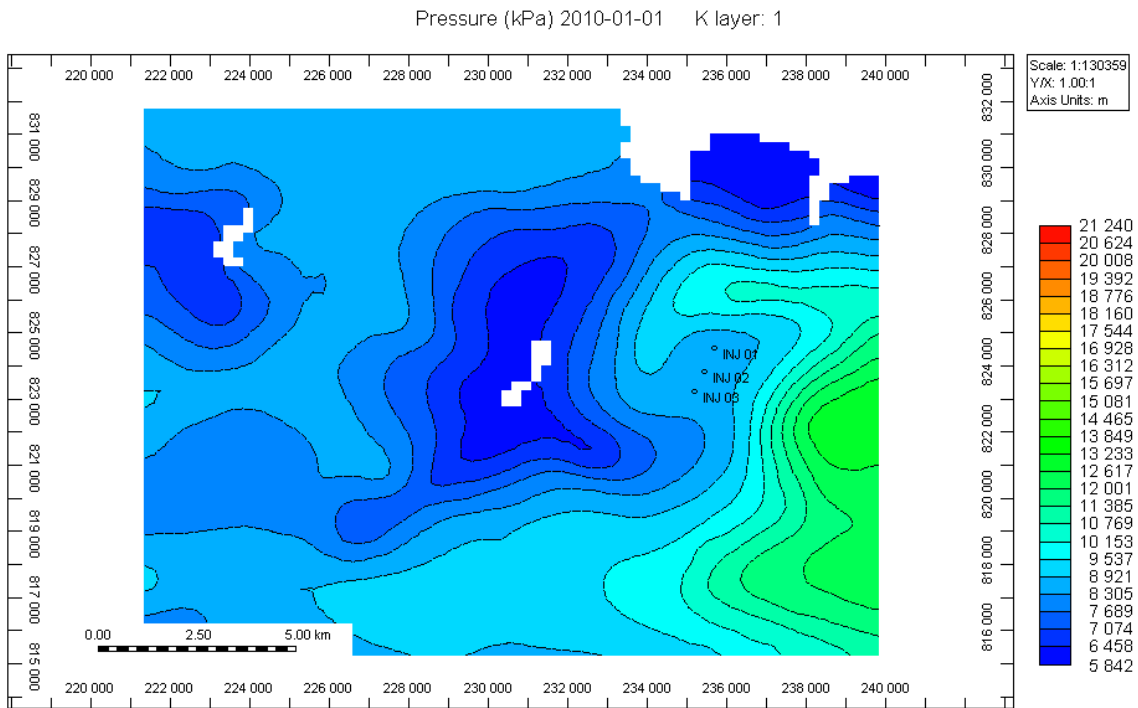


Fig. 1.1.16_99 Rozkład ciśnienia w stropie potencjalnego magazynu CO₂ – przed zatłaczaniem

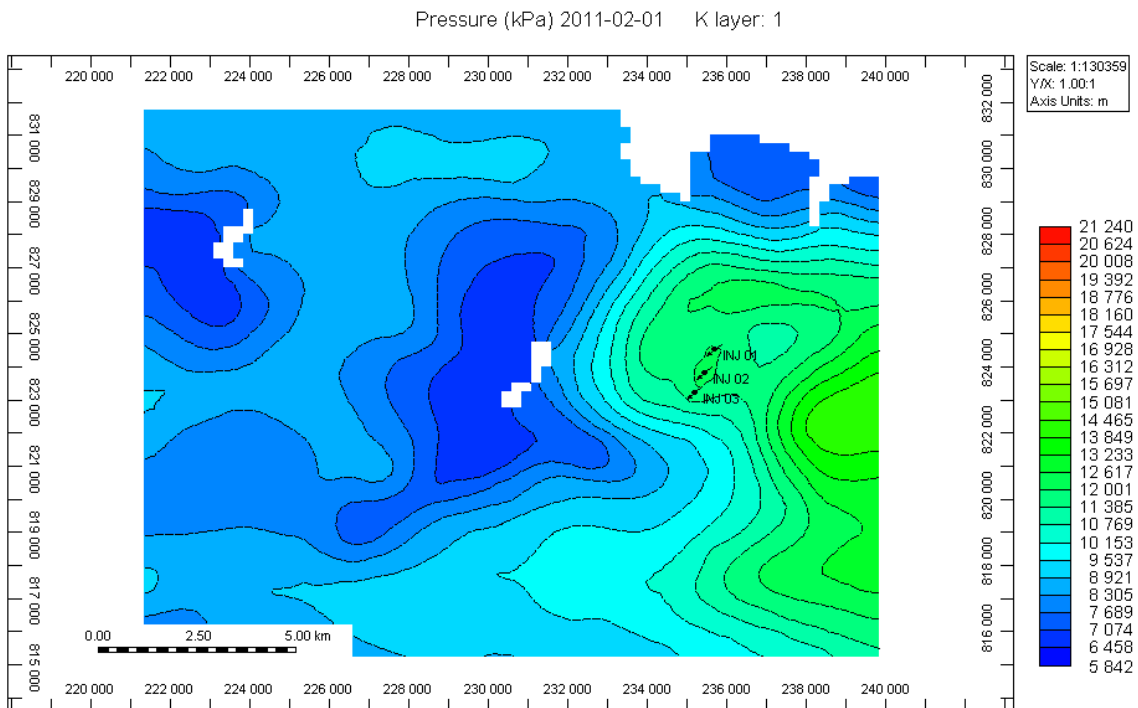


Fig. 1.1.16_100 Rozkład ciśnienia w stropie potencjalnego magazynu CO₂ – po roku zatłaczania

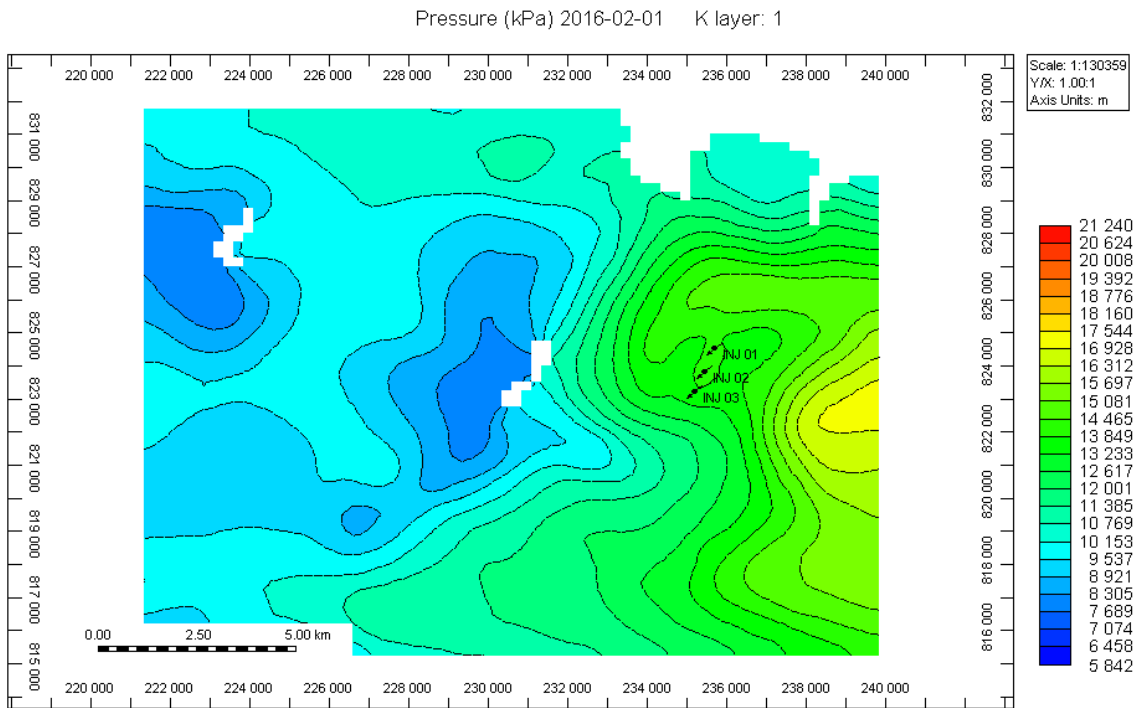


Fig. 1.1.16_101 Rozkład ciśnienia w stropie potencjalnego magazynu CO₂ – po 15 latach zatłaczania

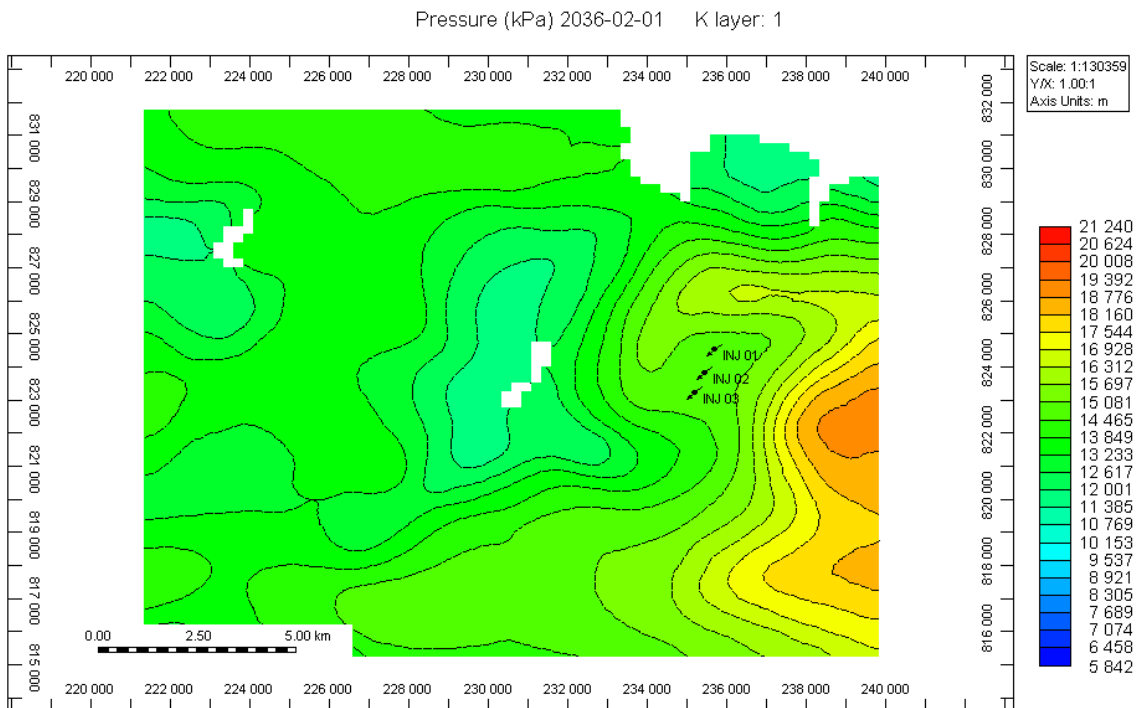


Fig. 1.1.16_102 Rozkład ciśnienia w stropie potencjalnego magazynu CO₂ – po 25 latach zatłaczania

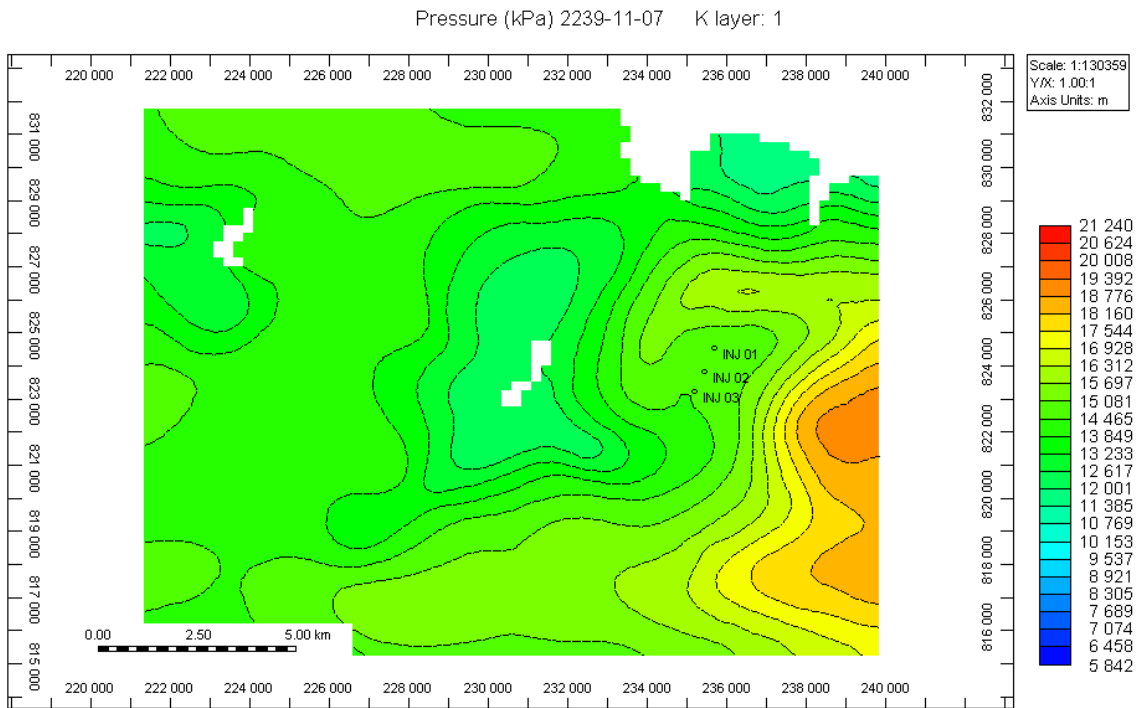


Fig. 1.1.16_103 Rozkład ciśnienia w stropie potencjalnego magazynu CO₂ – po 28 latach zatłaczania

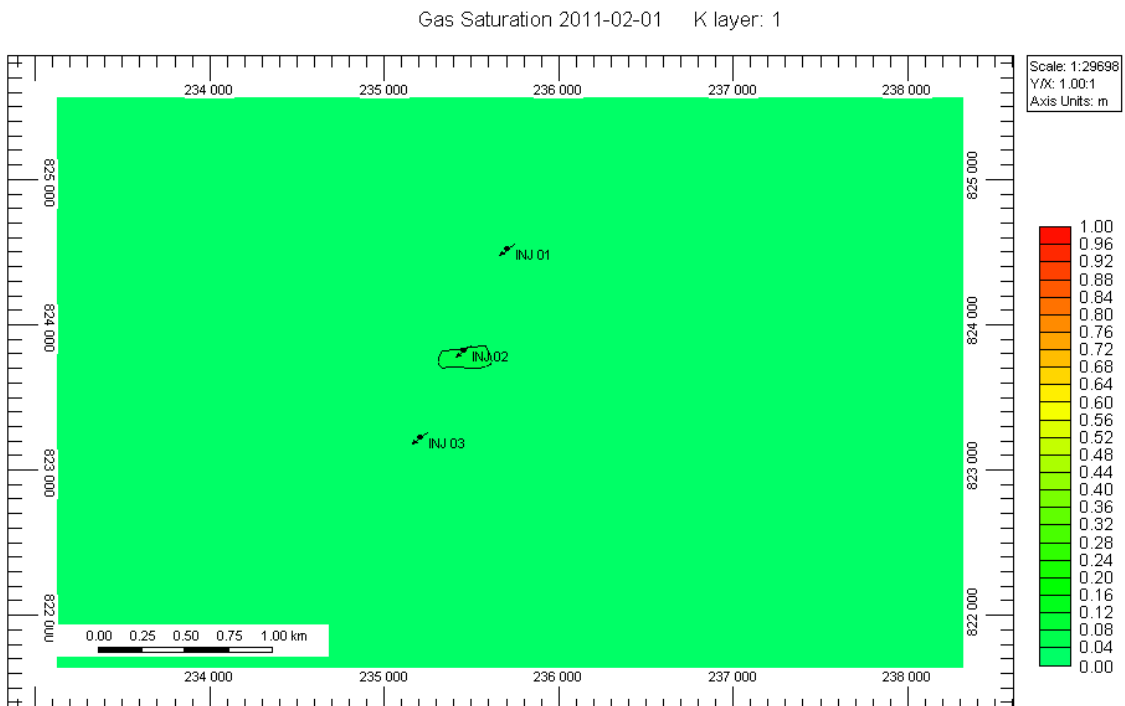


Fig. 1.1.16_104 Zmiana nasycenia CO₂ w warstwie stropowej po 1 roku eksploatacji

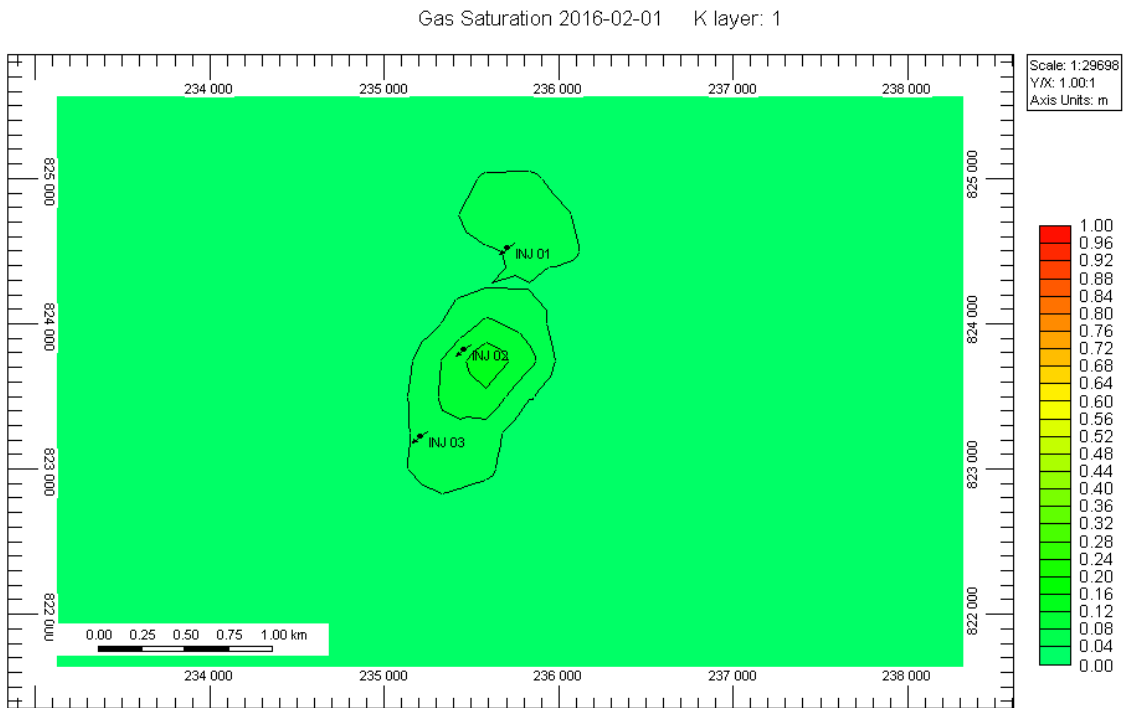


Fig. 1.1.16_105 Zmiana nasycenia CO₂ w warstwie stropowej po 6 latach eksploatacji

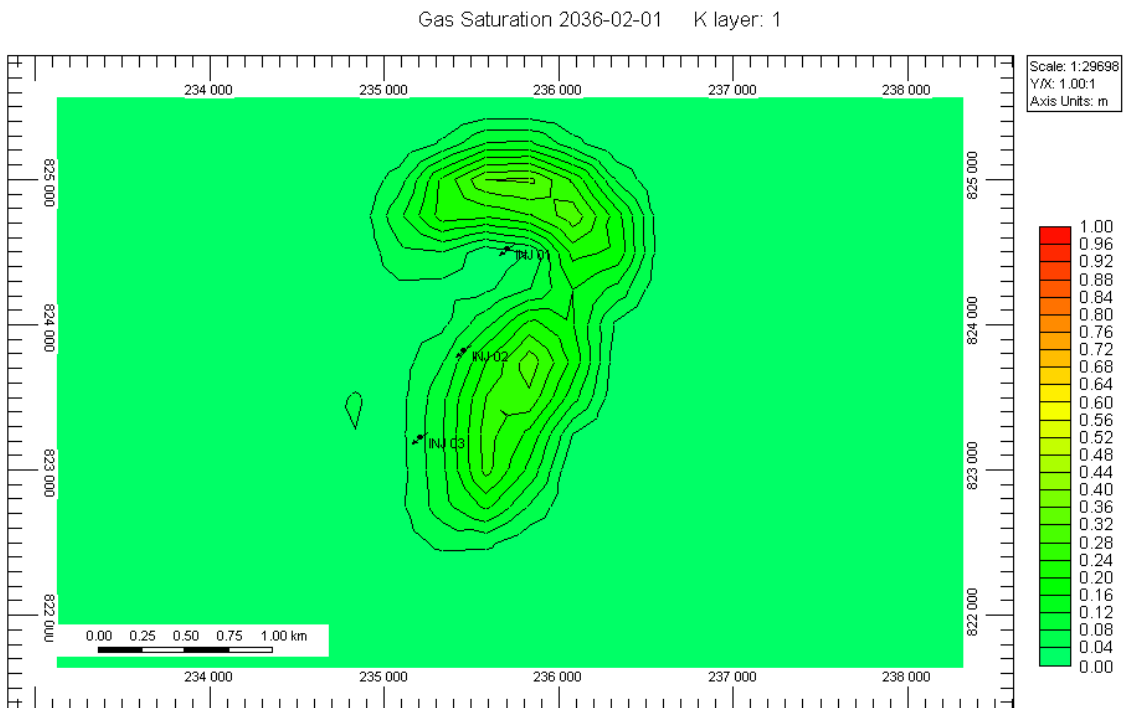


Fig. 1.1.16_106 Zmiana nasycenia CO₂ w warstwie stropowej po 26 latach eksploatacji

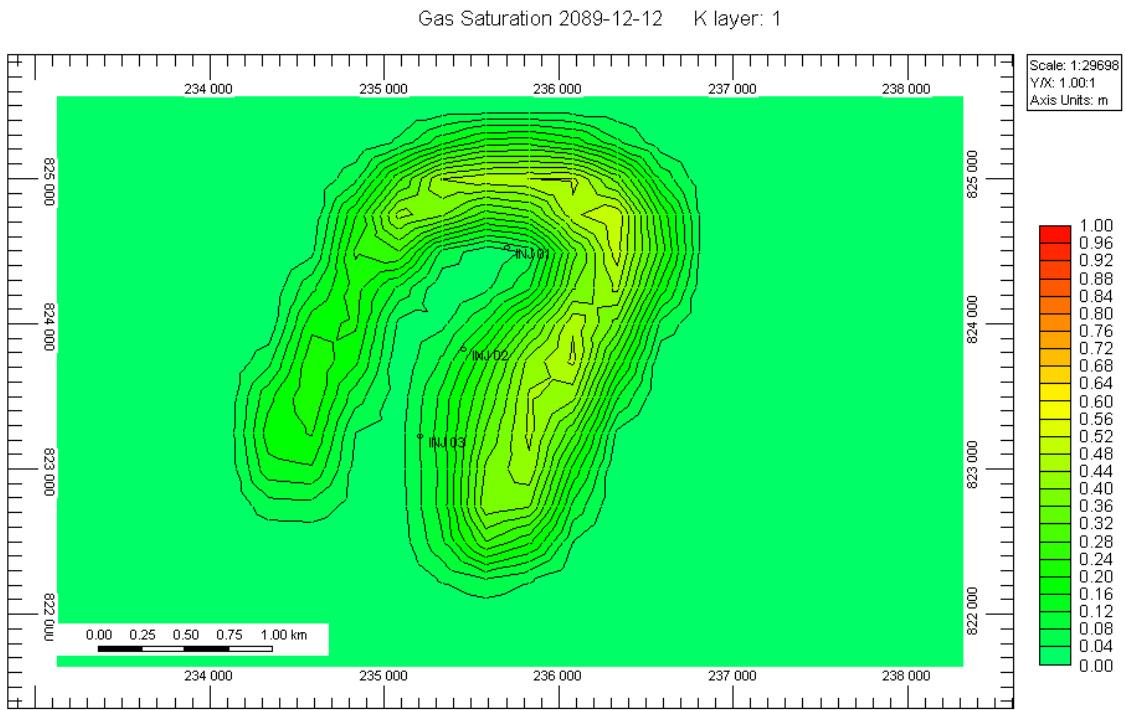


Fig. 1.1.16_107 Zmiana nasycenia CO₂ w warstwie stropowej po 78 latach eksploatacji

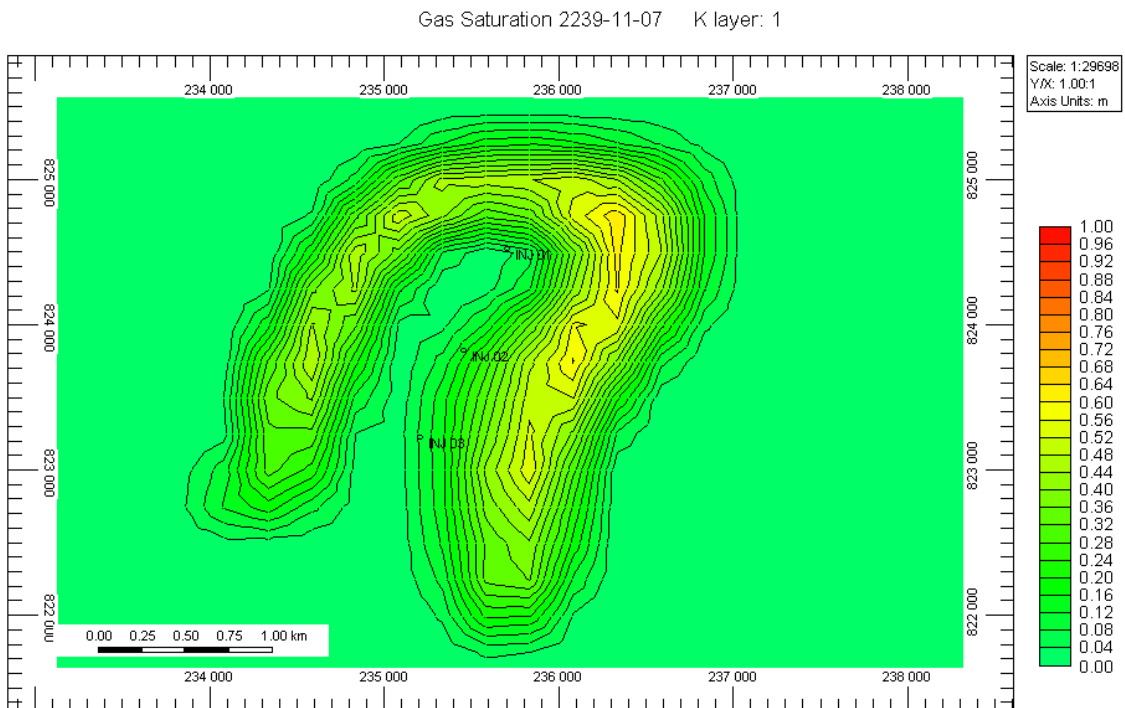


Fig. 1.1.16_108 Zmiana nasycenia CO₂ w warstwie stropowej po 229 latach eksploatacji

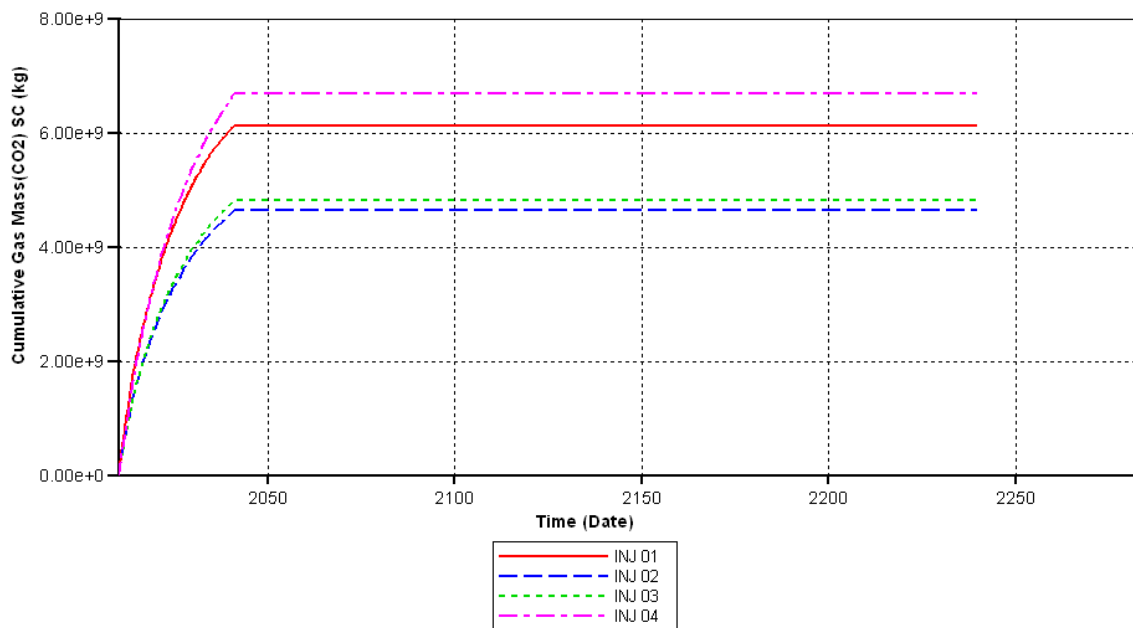


Fig. 1.1.16_109 Sumaryczna ilość zatłoczonego CO₂ do poszczególnych otworów w czasie

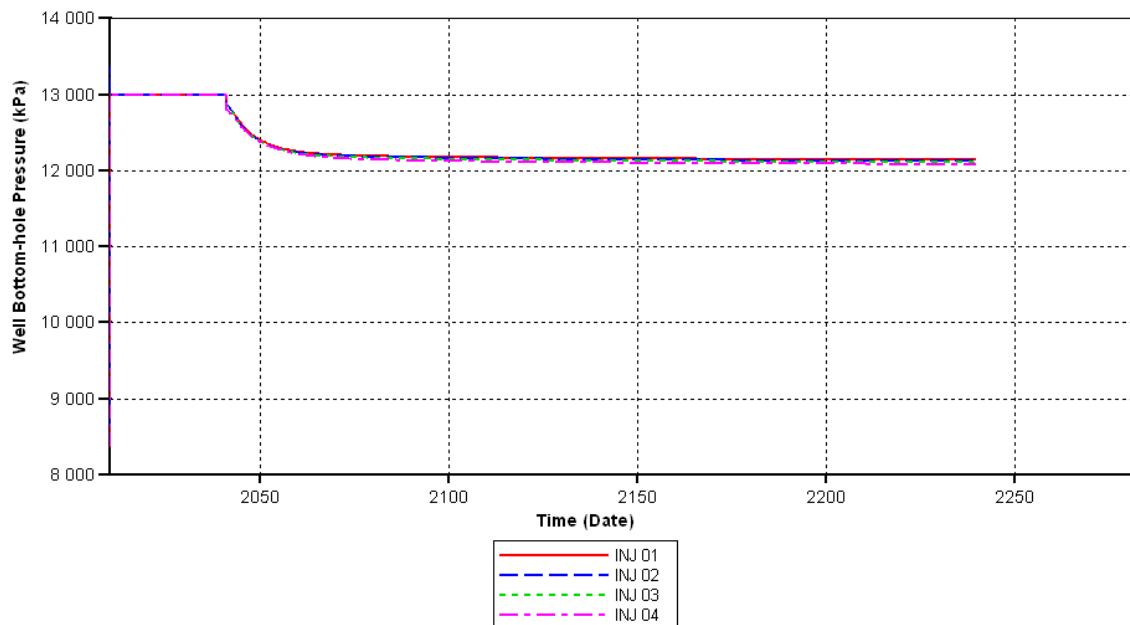


Fig. 1.1.16_110 Ciśnienie denne dynamiczne w otworze podczas zatłaczania i po jego zakończeniu

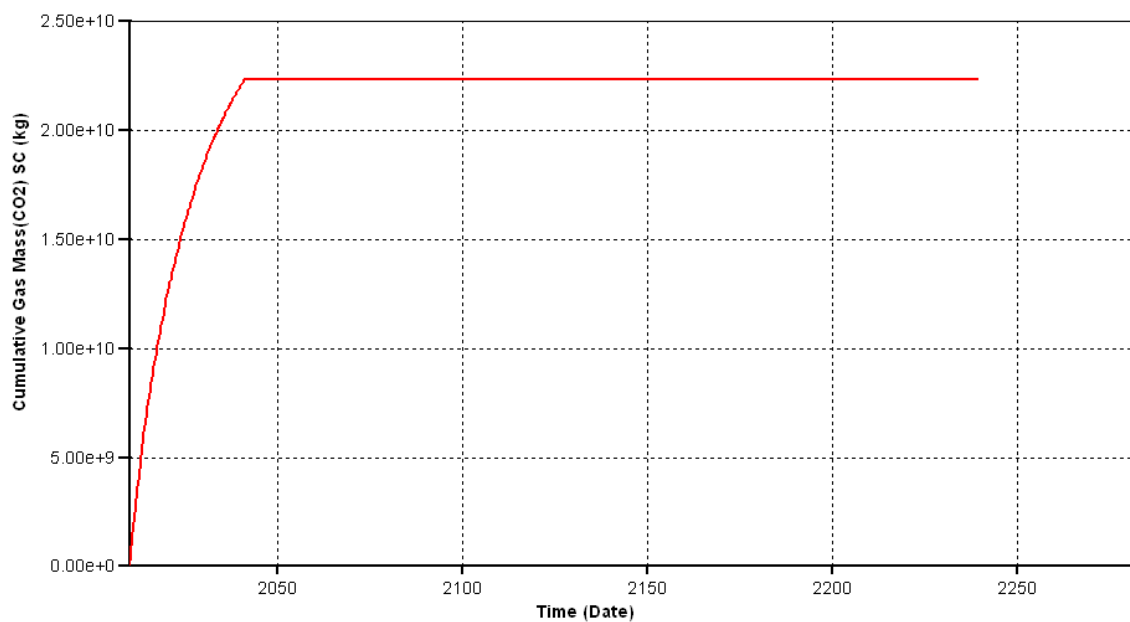


Fig. 1.1.16_111 Sumaryczna masa zatłoczonego CO₂ w czasie

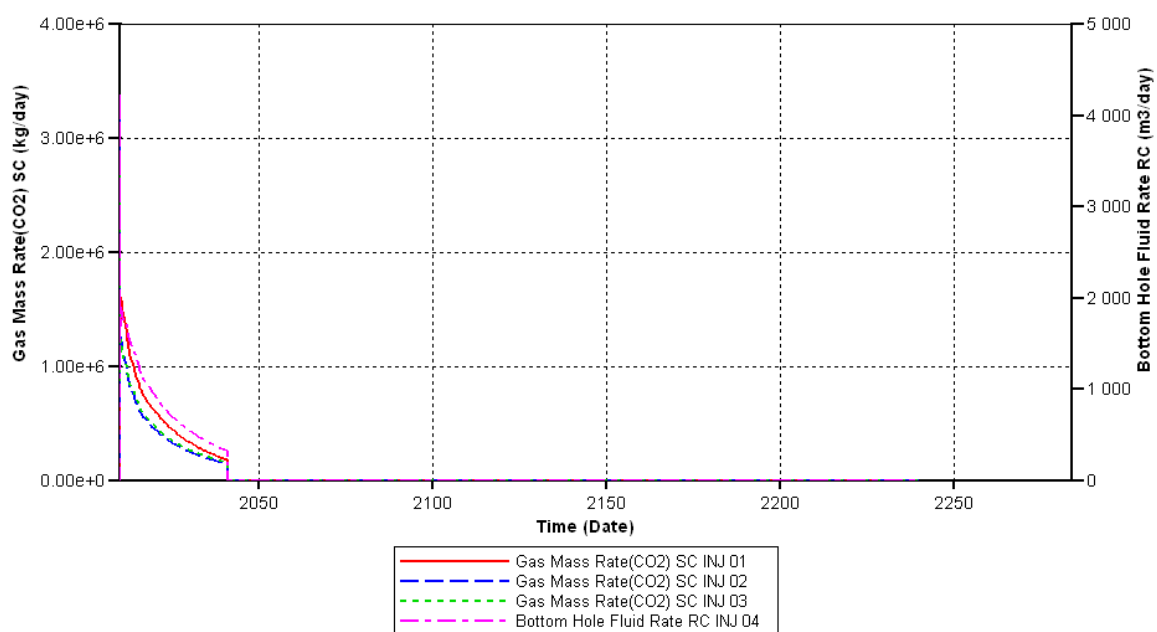


Fig. 1.1.16_112 Zmiana wydajności zatłaczania w poszczególnych otworach w funkcji czasu związana z ograniczeniem ciśnienia założowego

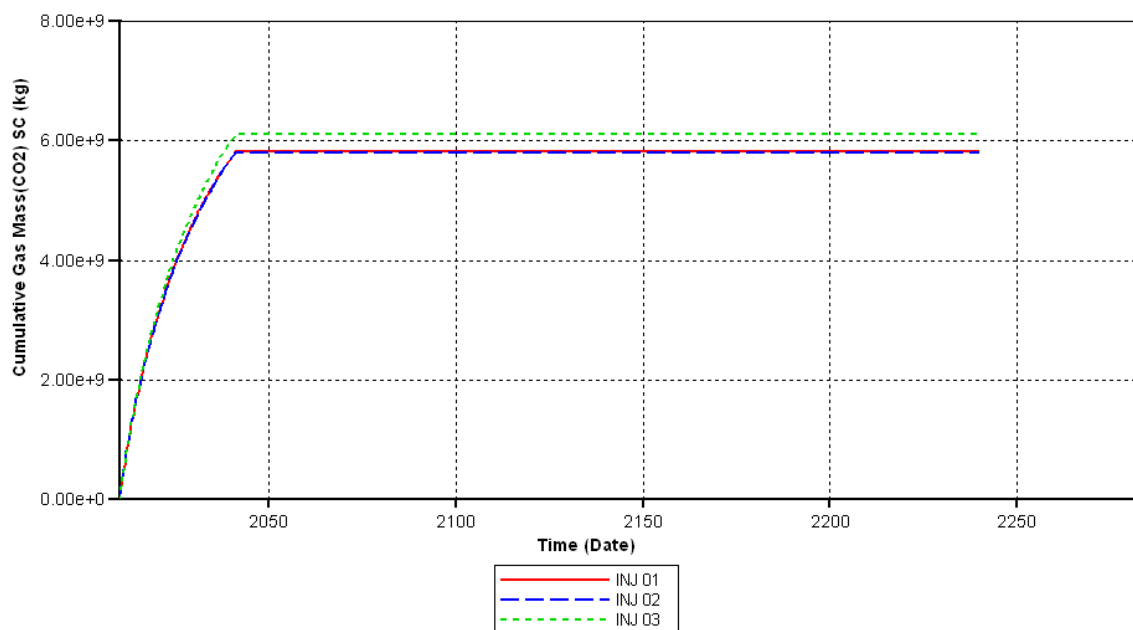


Fig. 1.1.16_113 Sumaryczna ilość CO₂ zatłoczonego do złoża do poszczególnych otworów w funkcji czasu (wariant 2)

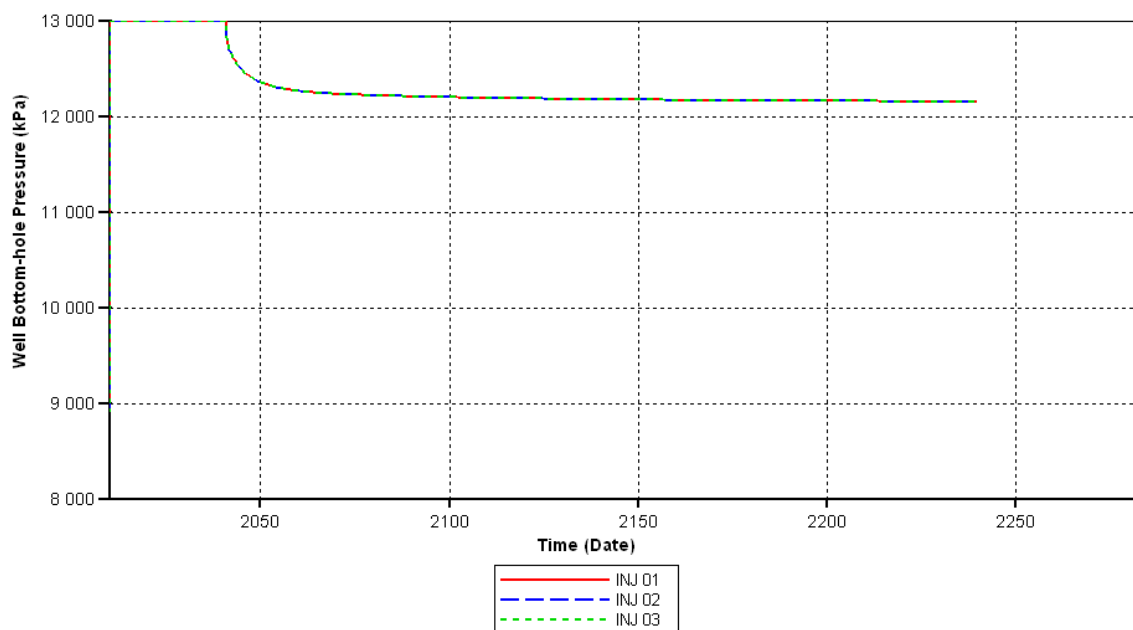


Fig. 1.1.16_114 Ciśnienie denne czasu dla poszczególnych otworów (wariant 2) w funkcji

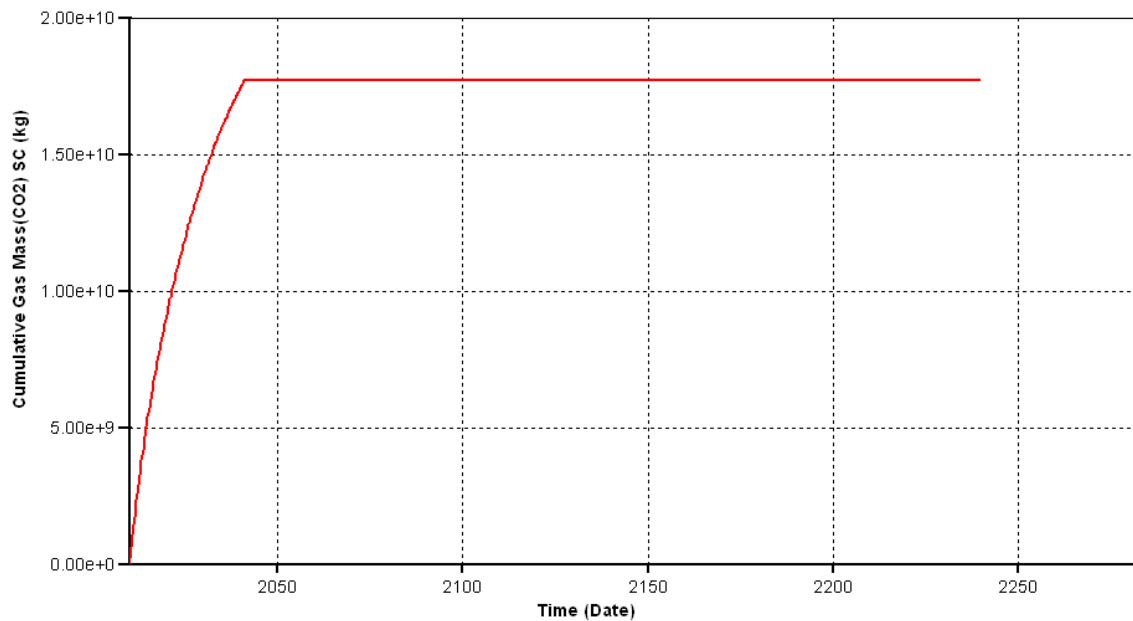


Fig. 1.1.16_115 Sumaryczna ilość CO₂ zatłoczona do złoża w funkcji czasu (wariant 2)

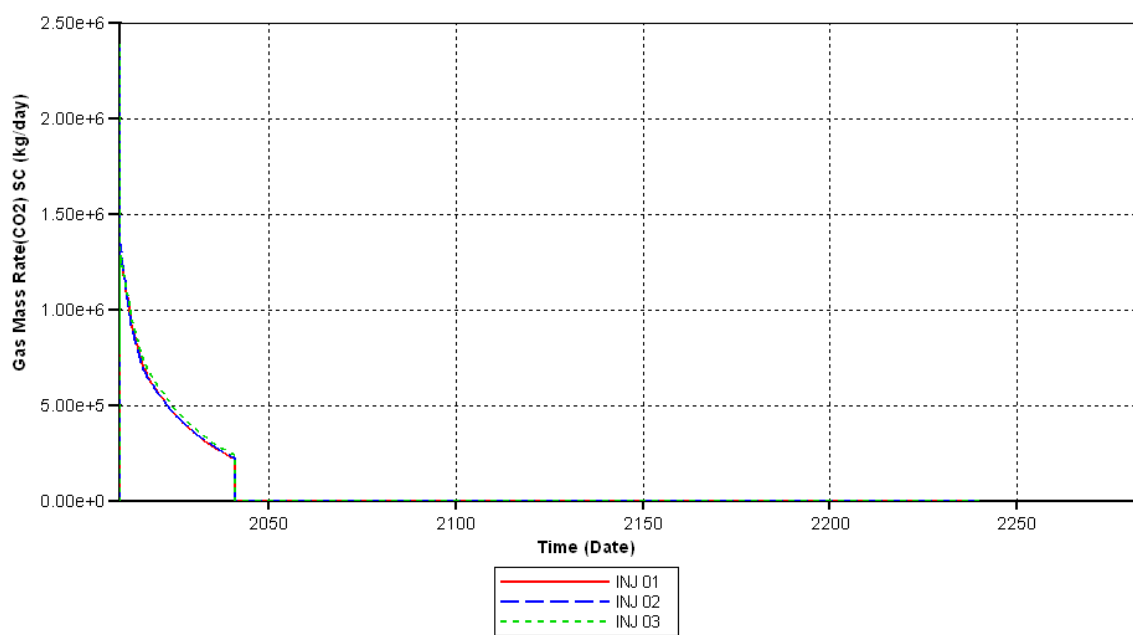


Fig. 1.1.16_116 Zmiana wydajności w otworach zatłaczających w funkcji czasu (wariant 2)

Wnioski

Bardzo mało danych geologicznych w tej strefie w szczególności w części wschodniej rejonu stawia pod znakiem zapytania rekomendacje tej lokalizacji.

Nie wydaje się, ażeby udało się uzyskać znaczne zwiększenie pojemności magazynowych CO₂ w tym rejonie, z uwagi na własności kolektorskie. Magazynowanie CO₂ w warstwach dębowieckich może być realizowane na mniejszą skalę – do ok. 20 mln t CO₂.

Podważa to sens budowy systemu rurociągów Kędzierzyn-Bielsko. Można mówić o składowaniu CO₂ w ilości 750 tys. t CO₂ – 1 mln t CO₂ rocznie – do zapełnienia struktury, pod warunkiem wykonania szeregu dodatkowych badań geologicznych, geofizycznych i hydrodynamicznych.

Trzeci obiekt solankowy

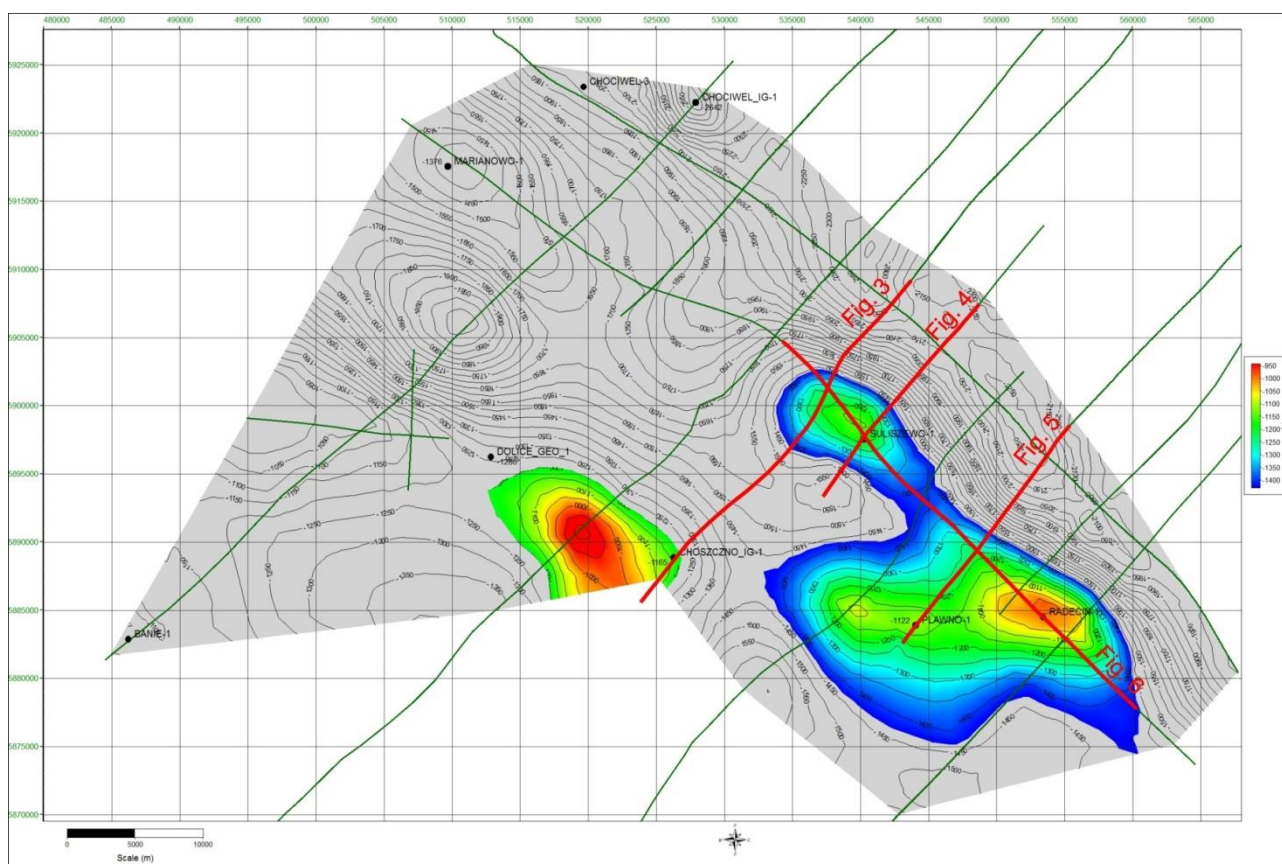
Prace zostały wykonane przez następujących partnerów konsorcjum: **AGH, INiG, GIG** oraz **PIG-PIB**).

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

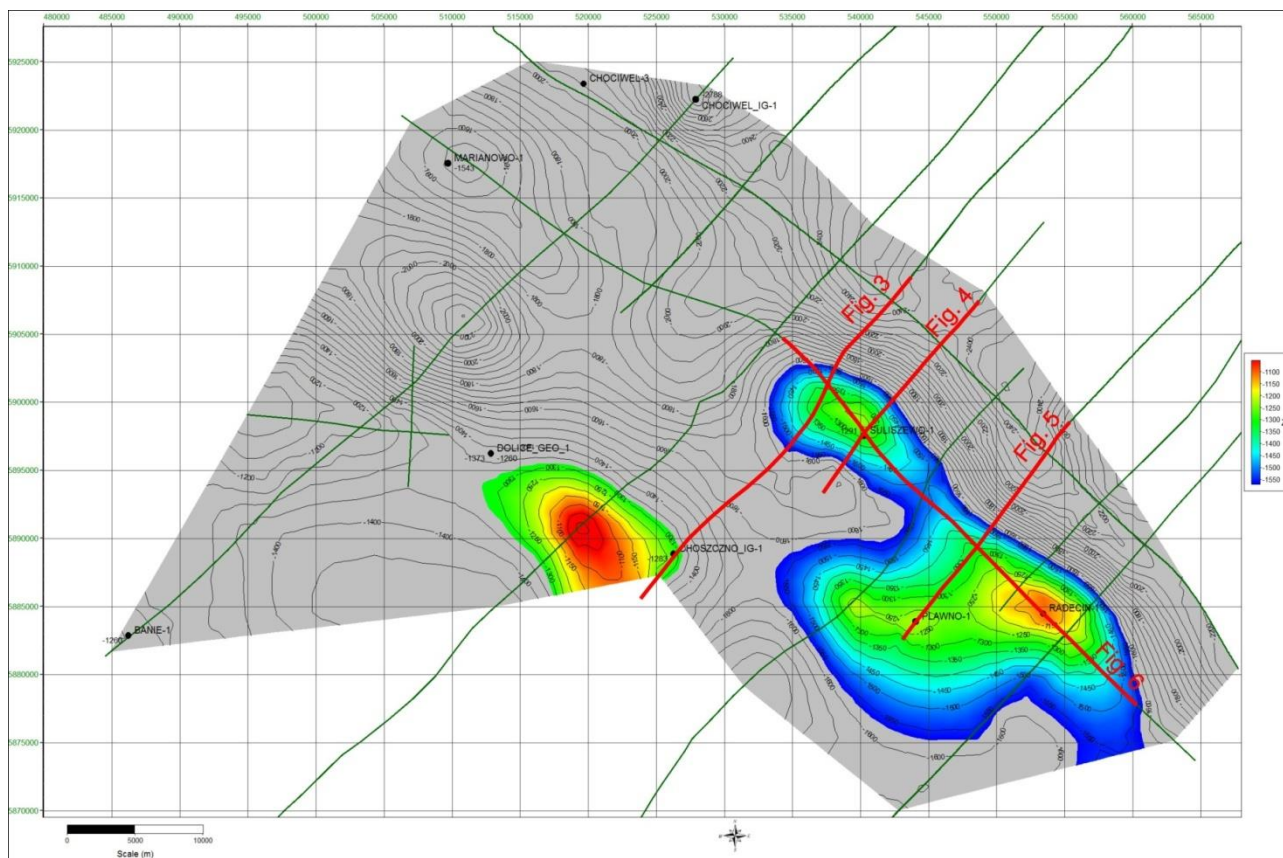
- Choszczno-Suliszewo w rejonie NW Polski, ewentualnie na potrzeby aglomeracji szczecińskiej
- Grodzisk-Ujazd-Bukowiec (Niecka Poznańska - megastruktura solankowa, w stropie której występują też złoża gazu) w rejonie Wielkopolski, ewentualnie na potrzeby aglomeracji poznańskiej.

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

W ramach niniejszego zadania przewidziano trzech wykonawców symulacji zatłaczania -AGH, GIG, INiG. AGH przeprowadziło symulacje zatłaczania do formacji piaskowcowych jury dolnej dla lokalizacji Choszczno, Suliszewo oraz Pławno i Radęcin w rejonie Choszczno-Suliszewo (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, na zachód od otworu Choszczno-1, oddzielona jest od pozostałych przegięciem - **Rys. 1**)z wykorzystaniem oprogramowania GEM.



Rys. 1 Mapa głębokościowa stropu kolektora górnego piensbachu wraz z zaznaczoną lokalizacją zinterpretowanych profili sejsmicznych kulminacji - potencjalnych lokalizacji składowisk (**G. Wróbel**)

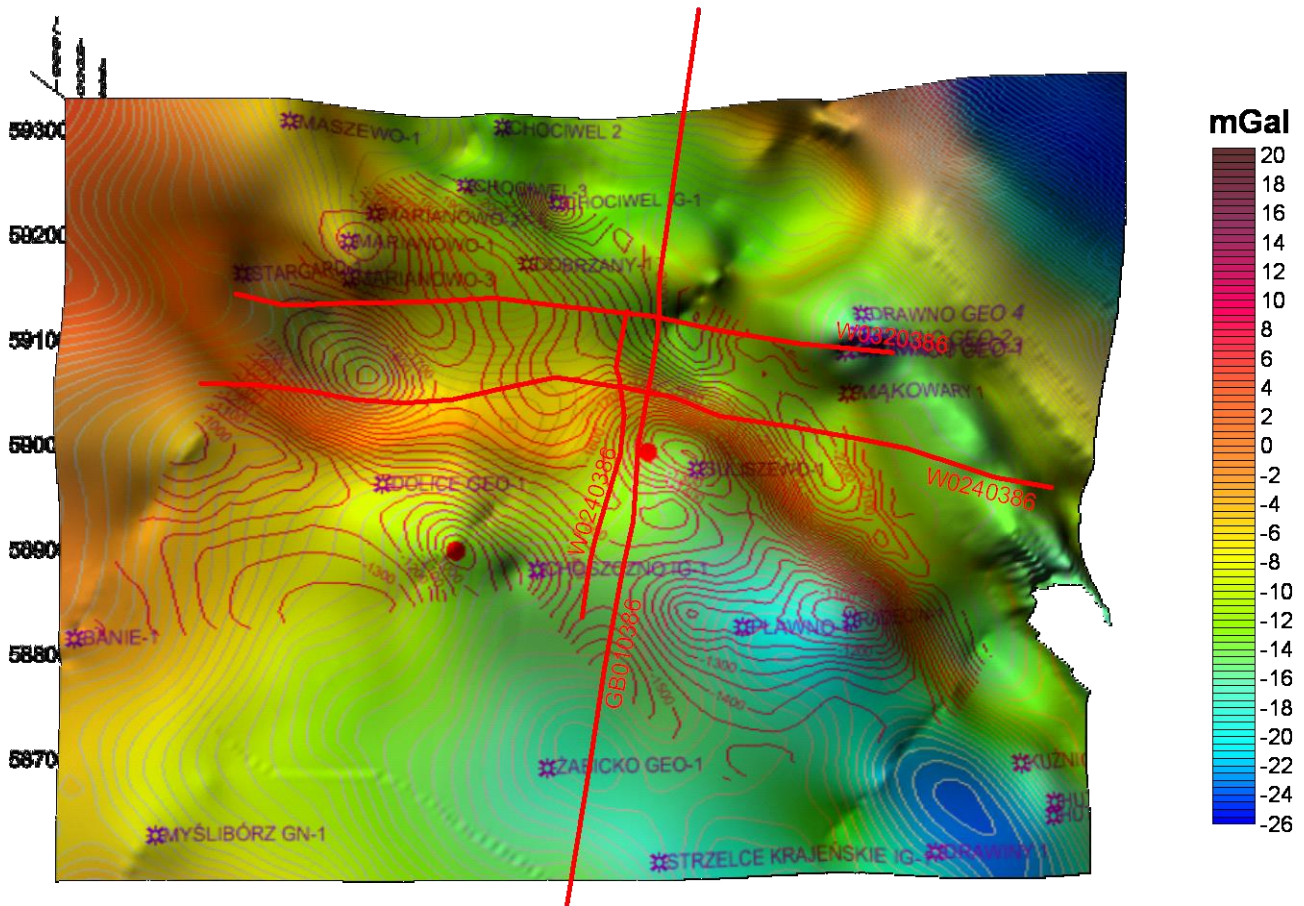


Rys. 2 Mapa głębokościowa stropu kolektora synemuru i hettangu wraz z zaznaczoną lokalizacją zinterpretowanych profili sejsmicznych i kulminacji i kulminacji - potencjalnych lokalizacji składowisk (G. **Wróbel**)

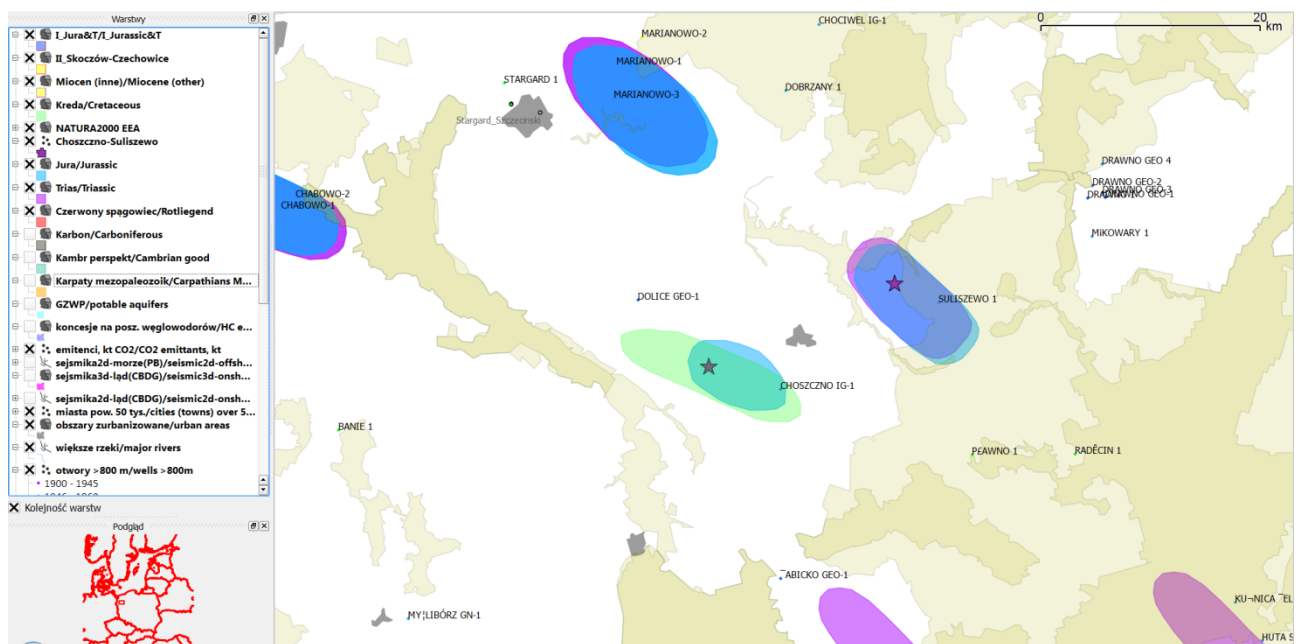
GIG wykonał symulacje zatłaczania do formacji piaskowcowych jury dolnej dla lokalizacji Choszczno, Suliszewo z wykorzystaniem oprogramowania Petrel/Eclipse.

Praca PIG-PIB polegała na przygotowaniu założeń dla 2 wariantów komputerowych modeli dynamicznych procesów zatłaczania dwutlenku węgla do struktury w poziomach solankowych Choszczno-Suliszewo z wykorzystaniem modeli statycznych z **1.1.15** (2 warianty dla jury), charakteryzujących efektywność i bezpieczeństwo składowania. Obejmowało to określenie bezpiecznych wydajności zatłaczania dla fazy pilotowej i fazy demonstracyjnej, określenie ilości otworów zatłaczających a także przygotowanie danych wejściowych dla wykonawców symulacji zatłaczania dla tej struktury (AGH i GIG). To ostatnie obejmowało reinterpretację danych sejsmicznych w rejonie Choszczno-Suliszewo celem uszczegółowienia obrazu strukturalnego stropu kolektora pliensbachu (**Rys. 1**) oraz synemuru i hettangu (**Rys. 2**) a także analizę zdjęcia grawimetrycznego celem kontroli wyników sejsmiki (**Rys. 3**).

Jako optymalny wariant zatłaczania dwutlenku węgla do struktury w poziomach solankowych Choszczno-Suliszewo przyjęto lokalizację dwóch otworów zatłaczających - jeden na kulminacji Choszczno, 7-8 km na zachód od Choszczno IG-1, drugi na kulminacji Suliszewo, około 5 km na zachód od otworu Suliszewo 1 i 3-4 km na zachód od kulminacji Suliszewo (**Rys 1 i 2**) co wynika z omięcia obszaru chronionego NATURA 2000 (**Rys. 4**). Natomiast najbardziej perspektywiczna kulminacja Pławno-Radęcin znajduje się w obrębie obszarów NATURA2000 (**Rys. 4**).



Rys. 3 Optymalna lokalizacja otworów zatłaczających (czerwone kółka) na tle mapy grawimetrycznej anomalii Bouguera (barwne wypełnienie) i izolunii stropu piensbachu (kolor czerwony) (**Adam Wójcicki**)



Rys. 4 Optymalna lokalizacja otworów zatłaczających (gwiazdki) na tle obszarów NATURA2000 (**Adam Wójcicki**)
16-113

Z uwagi na doskonałe własności kolektorów dolnojurajskich i ich dobre uszczelnienie przyjęto zatłaczanie w podstawowym wariantcie po 1 mln ton CO₂ rocznie na otwór (jeden na kulminacji Choszczna i jeden na kulminacji Suliszewa - patrz **Rys. 1 - 4**). Przyjęto dla symulacji zatłaczania jednoczesne wykorzystanie podstawowego kolektora synemuru-hettangu i drugorzędnego - pliensbachu.

Dla otworu na kulminacji Suliszewa przewidziano dodatkowo drugi wariant, obejmujący zatłaczanie 2 mln ton rocznie celem uzyskania przepływu do jeszcze bardziej perspektywicznej kulminacji Radęcin-Pławno położonej na obszarze NATURA2000, co raczej wykluczałoby tam lokalizację instalacji zatłaczania CO₂.

Natomiast INiG wykonał 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.

Modelowania dynamiczne dla formacji jury dolnej struktur Choszczna i Suliszewa (AGH; symulator GEM)

(Stanisław Nagy, Jakub Siemek, Łukasz Klimowski)

Model statyczny

Modele dla symulacji dynamicznych zatłaczania dwutlenku węgla przygotowano na bazie statycznego modelu regionalnego opracowanego w ramach zadania **1.1.17**. W pierwszej kolejności model ten, o stosunkowo dużej rozdzielczości pionowej (175 warstw) i skomplikowanym warstwowaniu, poddano procesowi uplayeringu, czyli redukcji ilości warstw wydzielonych na etapie modelowania geologicznego. Komputerowa symulacja zatłaczania jest procesem dynamicznym, w trakcie którego rozwiązywane są numerycznie złożone równania przepływu płynów w ośrodku porowatym, w odróżnieniu od statycznego procesu modelowania geologicznego. W związku z tym złożony model wyjściowy o bardzo dużej ilości wyklinowujących się bloków o niewielkiej miąższości nie był odpowiedni dla prowadzenia analiz symulacyjnych (zbyt długi czas trwania symulacji oraz istotne problemy obliczeniowe ze strony symulatora). W oparciu o wydajny i szybki algorytm obliczeniowy liczbę warstw modelu zredukowano do 25, zachowując przy tym granice wyróżnionych jednostek geologicznych. Następnie z tak przygotowanego modelu wydzielono sub-modele dla struktur Choszczna i Suliszewa. Ich zasięg przedstawiono poniżej na tle mapy strukturalnej stropu Pliensbachu.

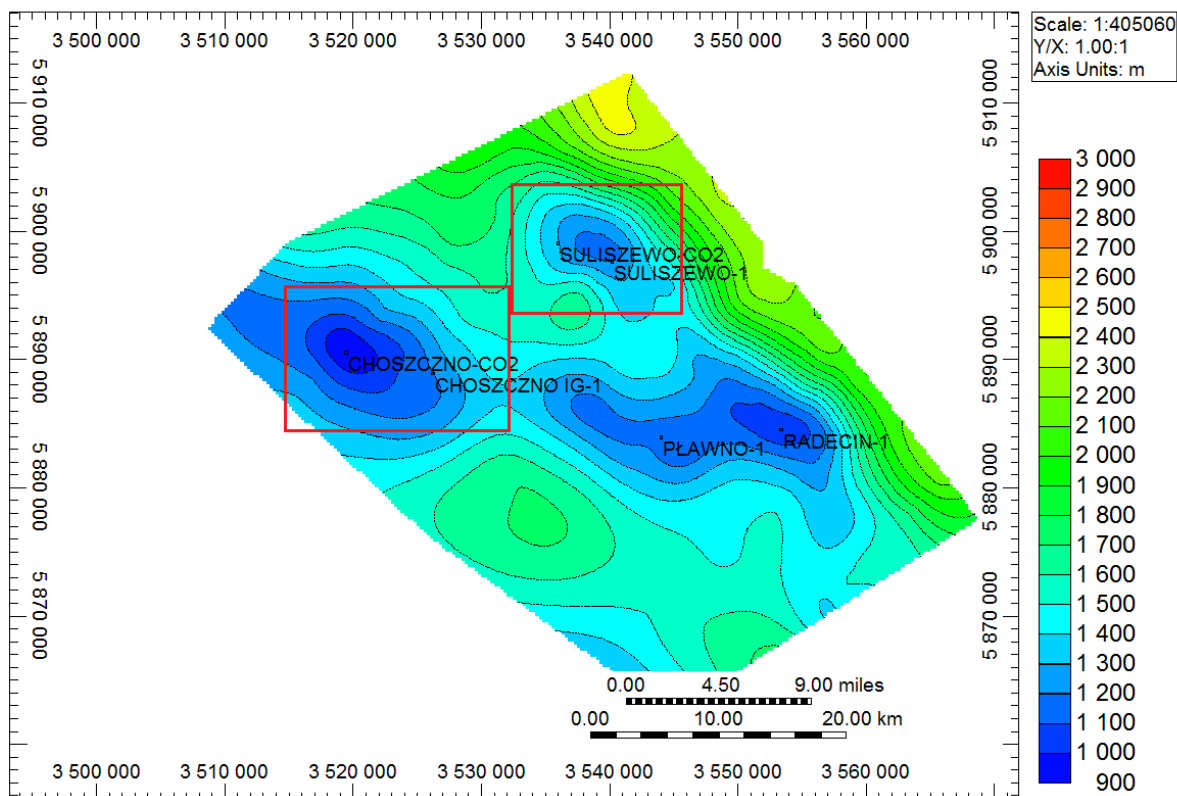


Fig. 1.1.16_117 Mapa stropu modelu regionalnego z zaznaczonymi strefami struktur Choszczna i Suliszewa objętymi modelem symulacyjnym

Obydwa modele, tak jak model wyjściowy, zbudowane są z wykorzystaniem siatki typu corner point. Model struktury Suliszewa ma wymiary 56x43 bloki, 250 m x 250 m każdy; w pionie wydzielono 25 warstw o zróżnicowanych miąższościach, obejmujących formacje wczesnej Jury: Pliensbach, Synemur i Hettang. W efekcie otrzymano 60200 bloków podstawowych, w tym, po zastosowaniu cut-offu na zailenie, przepuszczalność i porowatość oraz wyłączeniu bloków o niewielkiej miąższości (wyklinowujących się) i narożników modelu, liczba bloków aktywnych zredukowała się do 34714.

Zastosowane wartości parametrów odcięcia, mimo że można je określić, jako stosunkowo mało restrykcyjne (**Tab. 1.1.16_16**), skutkowały dezaktywacją słabo przepuszczalnej części warstw Pliensbachu, pozostawiając jednak w szczycie struktury (w pobliżu odwiertu zatłaczającego) połączenie z warstwami leżącymi wyżej. W związku z występowaniem tej „wyrwy” w uszczelniających warstwach Pliensbachu nie mogły one być przyjęte, jako uszczelnienie struktury i konieczna była analiza symulacyjna migracji CO₂ przez to połączenie.

Model Choszczna składa się z 70x46 bloków w poziomie oraz 25 warstw. Po zastosowaniu kryteriów odcięcia jak wyżej, również tutaj uwidoczniła się nieciągłość hydrodynamiczna w warstwach Pliensbachu, która w tym przypadku kontynuuje się w całej rozciągłości modelu. W związku z powyższym z modelu wyłączono zupełnie warstwy od 1 do 11, a w rezultacie liczba bloków aktywnych została ograniczona do 25005.

Tab. 1.1.16_16 Wartości parametrów odcięcia (cut-off)

Parametr	Cut-off
Zailenie	60%
Przepuszczalność	0,01 mD
Porowatość	0,005

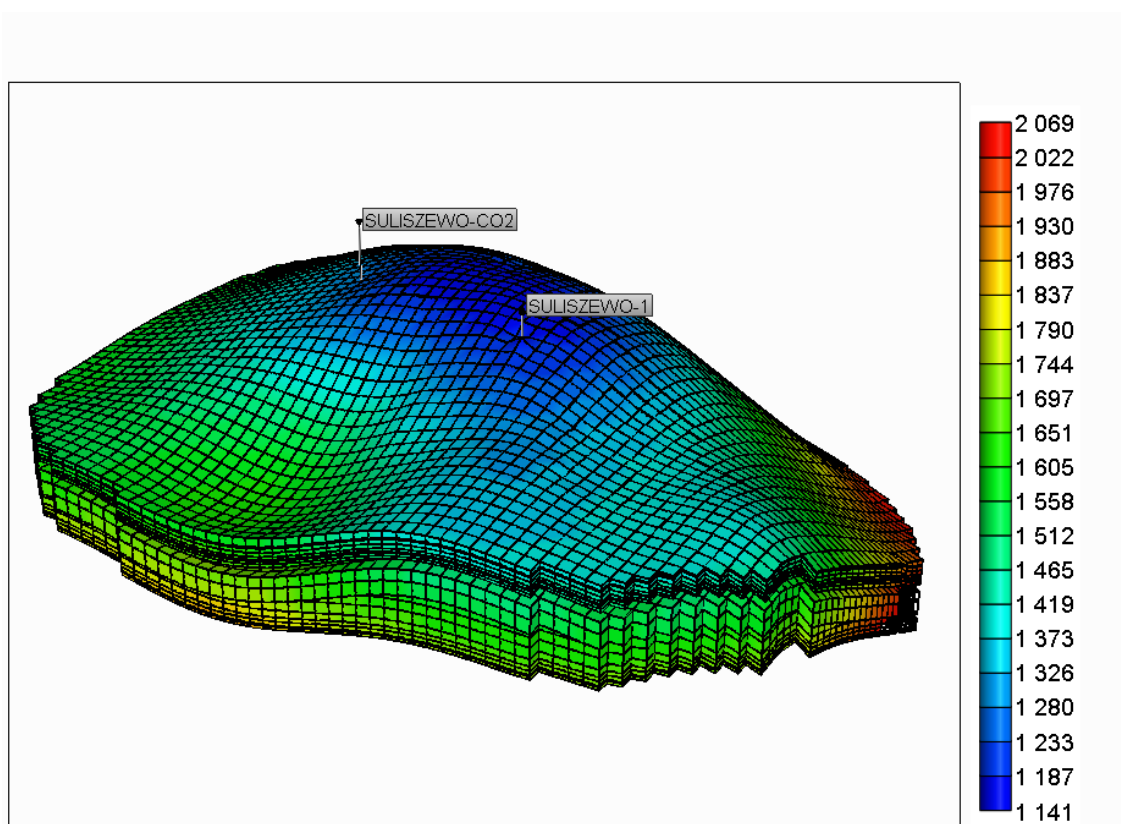


Fig. 1.1.16_118 Widok 3D modelu symulacyjnego struktury Suliszewa z siatką bloków

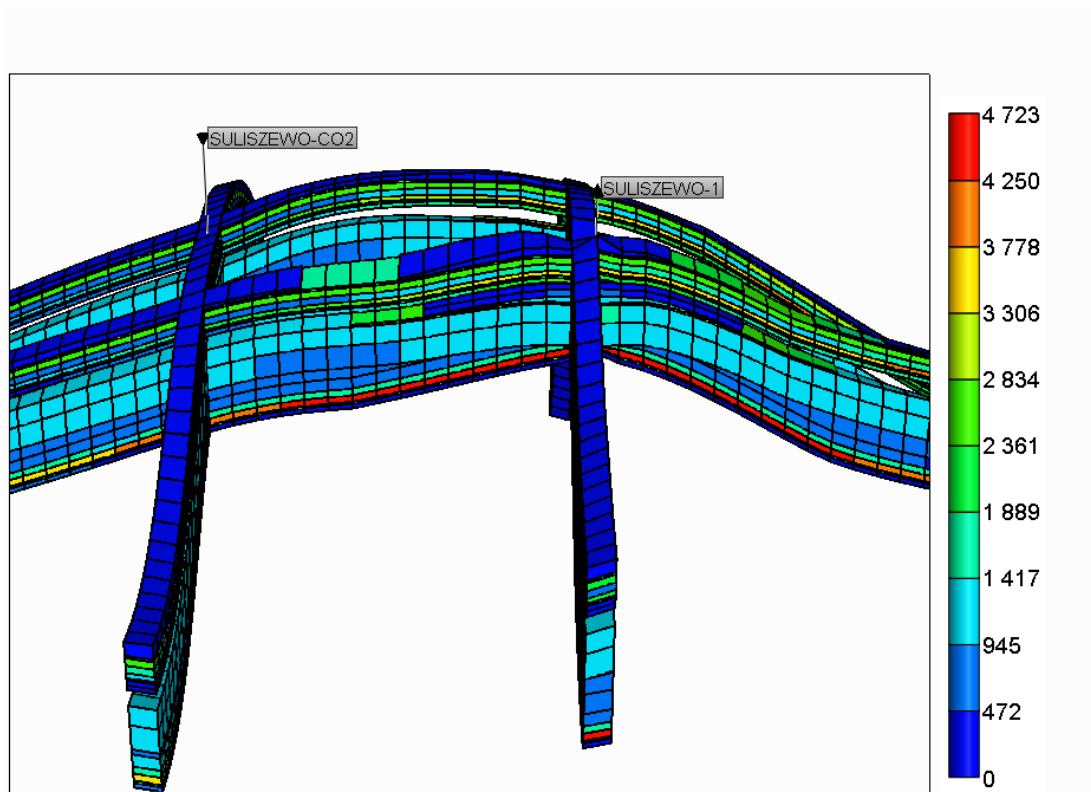


Fig. 1.1.16_119 Nieciągłość hydrodynamiczna w modelu symulacyjnym struktury Suliszewa

Odwiarty zatłaczające, oznaczone jako Suliszewo-CO2 i Choszczno-CO2, zlokalizowano zgodnie z otrzymanymi wytycznymi: Suliszewo-CO2 w kierunku zachodnim od szczytu; Choszczno-CO2 w szczycie antykliny Choszczna. Interwał otwarcia dla Suliszewa wynosi 30 m i obejmuje warstwy symulacyjne 22 i 23, dla Choszczna natomiast 40 m i obejmuje warstwy 21-22.

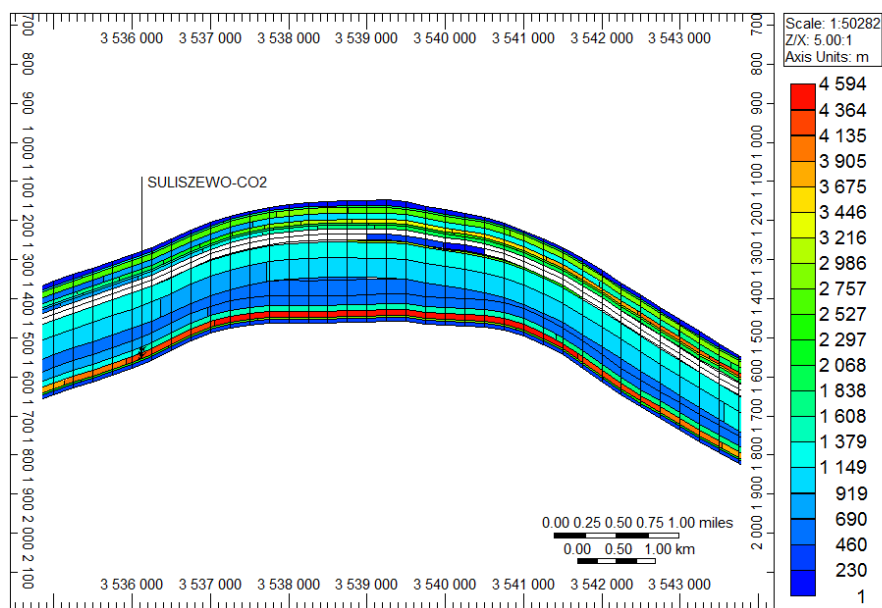


Fig. 1.1.16_120 Przekrój (IK 25) przez odwiert zatłaczający Suliszewo-CO2 z zaznaczoną perforacją (na przekroju pokazano rozkład przepuszczalności)

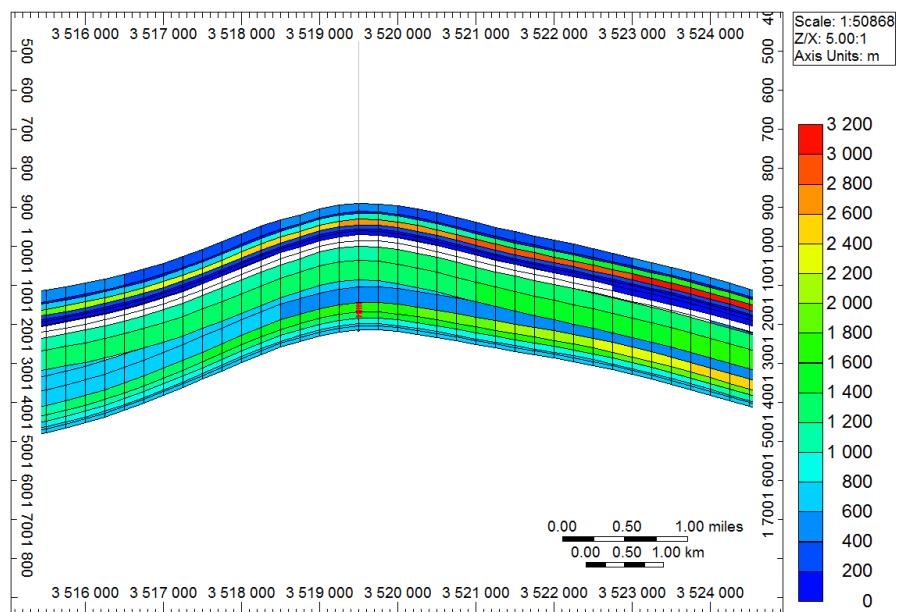


Fig. 1.1.16_121 Przekrój (IK 25) przez odwiert zatłaczający Choszczno-CO2 z zaznaczoną perforacją (na przekroju pokazano rozkład przepuszczalność

Model dynamiczny

Przepuszczalności względne

Przepływ CO₂ w warstwach nasyconych wodą (solanką) kontrolowany jest przez krzywe przepuszczalności względnych. W zawiązku z tym, że autorzy nie dysponowali wynikami badań na rdzeniach, w omawianej analizie przyjęto krzywe przepuszczalności względnych wygenerowane na podstawie korelacji Corey'a (Corey, 1976, Delshad, 2010):

$$k_{rw} = S_{wD}^4$$

$$k_{rCO_2} = 0,4(1 - S_{wD}^2)(1 - S_{wD})^2,$$

gdzie przez S_{wD} oznaczono bezwymiarowe (znormalizowane) nasycenie fazą zwilżającą:

$$S_{wD} = \frac{S_w - S_{wr}}{1 - S_{wr}}.$$

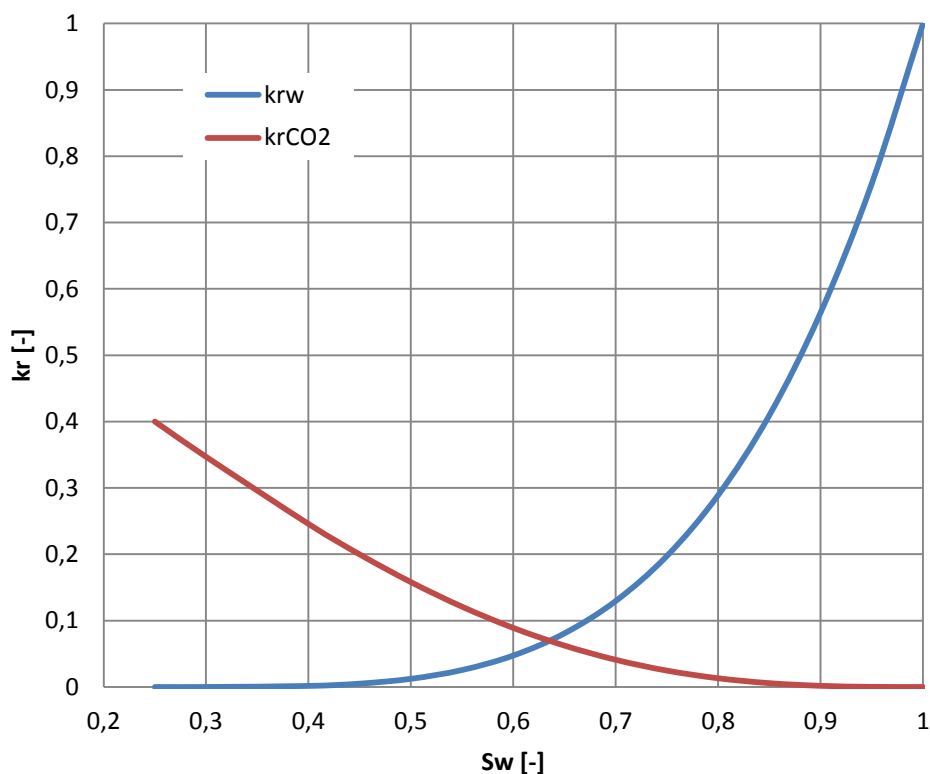


Fig. 1.1.16_122 Wykres zastosowanych przepuszczalności względnych

Istotny wpływ na "pułapkowanie" CO₂ ma efekt histerezy przepuszczalności względnej w trakcie fazy nasiąkania (imbibition) po zakończeniu zatłaczania, kiedy to wyparta przez CO₂ woda zaczyna wracać i wypierać dwutlenek węgla, odcinając jednocześnie mniejsze kanały porowe nasycone nadkrytycznym płynem. W prezentowanej analizie proces ten modelowano dla założonej wartości maksymalnego

rezydującego nasycenia CO₂ równej $S_{gir} = 0,3$ w oparciu o zaimplementowany w symulatorze model Landa (CMG-GEM). Nasycenie wodą związaną w analizowanym modelu wynosi $S_{wc} = 0,25$.

Płyny złożowe i inicjalizacja modelu

Początkowo model jest w 100% nasycony solanką (kontur gaz-woda zdefiniowany powyżej minimalnej głębokości modelu) o zasoleniu 12.9 g/dm³ i gęstości 1009,3 kg/m³. Lepkość fazy wodnej modelowana jest w oparciu o korelację Kestin'a jako funkcja ciśnienia, temperatury i zasolenia, natomiast jej gęstość wyznaczana jest z korelacji Rowe-Chou (CMG-GEM).

Rozpuszczalność dwutlenku węgla w wodzie w zastosowanym symulatorze modelowana jest na podstawie prawa Henry'ego z wykorzystaniem korelacji Harvey'a. Dzięki zastosowaniu tej opcji przy obliczaniu stałej Henry'ego dla CO₂ uwzględniane są wpływy ciśnienia, temperatury oraz zasolenia (CMG-GEM).

Numeryczny model symulacyjny zdefiniowany został jako otwarty, co umożliwi nieograniczony odpływ i/lub dopływ płynów. W tym celu wykorzystano akifer analityczny na bazie modelu Cartera-Tracy o nieograniczonym zasięgu i parametrach (przepuszczalność, porowatość, miąższość) odpowiadających wartościom średnim modelu numerycznego.

Model symulacyjny został zainicjowany przy średnim ciśnieniu złożowym 13,5 MPa i temperaturze 38°C na głębokości 1000 m z gradientem 0,03 °C/m.

Warianty zatłaczania

Symulację zatłaczania CO₂ do analizowanych struktur prowadzono w oparciu o scenariusz zakładający wydajność zatłaczania na poziomie 1 [Mt CO₂/rok] przez okres 25 lat dla każdego z potencjalnych składowisk. Dodatkowo dla struktury Suliszewa przeprowadzono symulację zatłaczania z podwojoną wydajnością (2 [Mt CO₂/rok]), a iniekcja prowadzona była do momentu osiągnięcia przez zakumulowany dwutlenek węgla poziomu spill point. Drugi scenariusz zatłaczania miał na celu dynamiczne określenie maksymalnej pojemności składowania. W przeprowadzonych symulacjach nie uwzględniano stójek; zatłaczanie prowadzone jest w sposób ciągły.

Wyniki symulacji

Geologiczna sekwestracja dwutlenku węgla polega na zatłoczeniu wychwyconego gazu do odpowiednio głębokich, zapewniających nadkrytyczne warunki ciśnienia i temperatury, i szczelnych warstw geologicznych oraz jego długoterminowe unieruchomienie (ewentualnie - możliwie jak najbardziej przewidywalną migrację). W celu oceny efektywności procesu sekwestracji w analizowanych strukturach, wyznaczono wskaźniki określające ilość CO₂ pozostającą w danym momencie w poszczególnych fazach sekwestracyjnych: CO₂ rozpuszczonego w wodzie (STI - Solution Trapping Index) oraz unieruchomionego w wyniku działania efektu histerezy przepuszczalności (RTI - Residual Trapping Index). Indeks całkowitej efektywności "pułapkowania" CO₂, określony przez sumę STI i RTI, oznaczono jako TEI - Trapping Efficiency Index. Pułapkowanie CO₂ jest procesem dynamicznym - całkowita ilość, jak i proporcje między różnymi formami składowania zmieniają się w czasie. Przeprowadzone symulacje pozwalają obserwować te zmiany w ciągu kilkuset lat po zakończeniu zatłaczania.

Scenariusz 1 (1Mt CO₂/rok; 25 lat zatłaczania)

Odpowiednio dobrane interwały otwarcia odwiertów zatłaczających (wysokie wartości iloczynów kxh) oraz uzasadnione przyjęcie modeli otwartych (nieograniczony akifer modelowany analitycznie) pozwoliły na bezproblemowe osiągnięcie zadanych wydajności zatłaczania bez istotnego wpływu na ciśnienie denne w odwiertach zatłaczających. Przebiegi tych ciśnień przedstawiono na poniższych figurach.

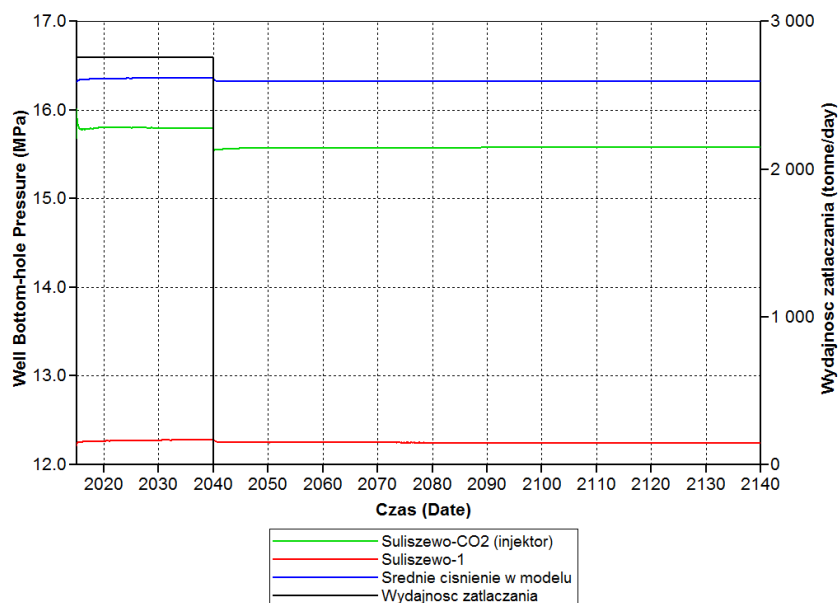


Fig. 1.1.16_123 Wydajność zatłaczania oraz przebiegi zmian ciśnienia w odwiertach oraz ciśnienia średniego – Suliszewo

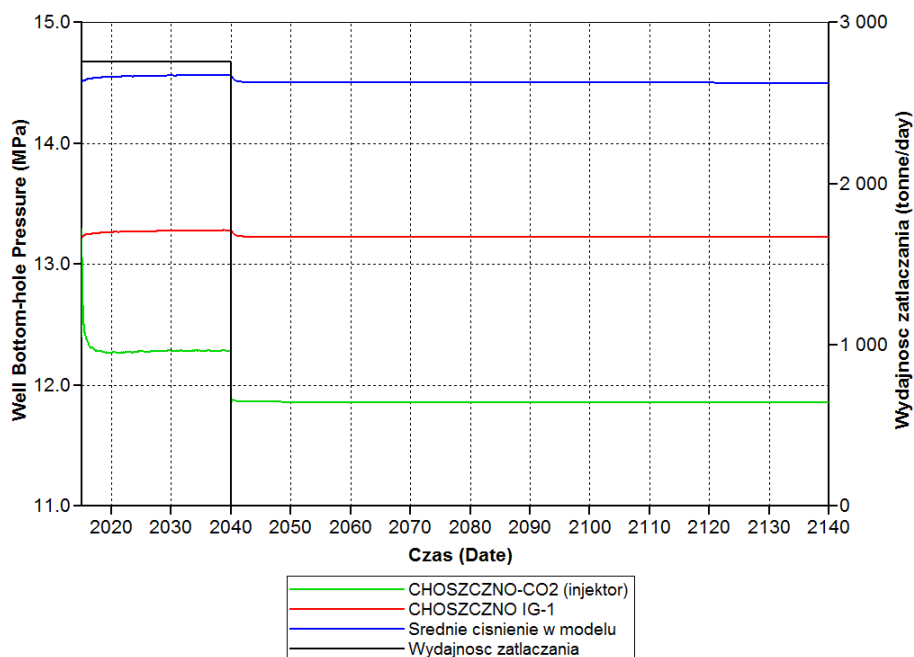


Fig. 1.1.16_124 Wydajność zatłaczania oraz przebiegi zmian ciśnienia w odwiertach oraz ciśnienia średniego – Choszczno

Suliszewo

Kluczowe dla przebiegu procesu sekwestracji CO₂ w strukturze Suliszewa są: lokalizacja odwiertu zatłaczającego w oddaleniu od szczytu antykliny (w kierunku zachodnim) oraz interwał otwarcia w spągowej części składowiska. Takie warunki wymuszają grawitacyjną migrację zatłaczanego płynu najpierw ku

warstwow stropowym, a następnie ku szczytowi antykliny. Zapewnia to długi kontakt CO₂ z wodą i jego intensywne rozpuszczanie. Następnie, po zakończeniu zatłaczania, powracająca woda (imbibition), w wyniku działania efektu histerezy przepuszczalności, zamyka część CO₂ nasycającą kanały porowe o najmniejszych średnicach zwiększając efektywność całego procesu. Proces ten intensyfikowała również migracja do stropu Pliensbachu poprzez wspomnianą w opisie ciągłość hydrodynamiczną w warstwach częściowo uszczelniających.

Charakterystycznym jest, że największe tempo proces pułapkowania utrzymuje w pierwszym stuleciu od zakończenia zatłaczania. Po tym czasie swoje maksimum osiąga wskaźnik RTI określający część CO₂ zatrzymanego w efekcie histerezy przepuszczalności - RTI = 51% (w tym czasie 27% pozostaje rozpuszczone w wodzie). Następnie udział CO₂ rezydualnego zaczyna wyraźnie spadać na rzecz rozpuszczania, przy czym całkowita efektywność pułapkowania (TEI) stale rośnie w niewielkim tempie, osiągając w 200 lat od zakończenia zatłaczania poziom niemal 80%. Tempo wzrostu TEI w okresie 2240 - 2840 stabilizuje się i wynosi średnio ok. 44.9 [kt CO₂/100yr]. W efekcie w ciągu kolejnych 600 lat wskaźnik całkowitej efektywności zatłaczania wzrasta jedynie o 1% osiągając wartość blisko 81% całej masy zatłoczonego gazu, czyli ok. 20.3 [Mt CO₂], z czego 12.7 [Mt CO₂] jest rozpuszczone w wodzie, 7.6 [Mt CO₂] odcięte w porach a reszta pozostaje w gęstej fazie nadkrytycznej (brak wolnej fazy gazowej).

Przebiegi zmian wartości wskaźników STI, RTI oraz TEI, jak również zmiany wyrażone masowo, przedstawiono na wykresach poniżej (Fig. 1.1.16_125 i Fig. 1.1.16_126). Dynamikę migracji chmury CO₂ w trakcie i po zakończeniu zatłaczania przedstawiono na sekwencji grafik dla okresu zatłaczania i po zakończeniu zatłaczania (Fig. 1.1.16_127 i Fig. 1.1.16_128).

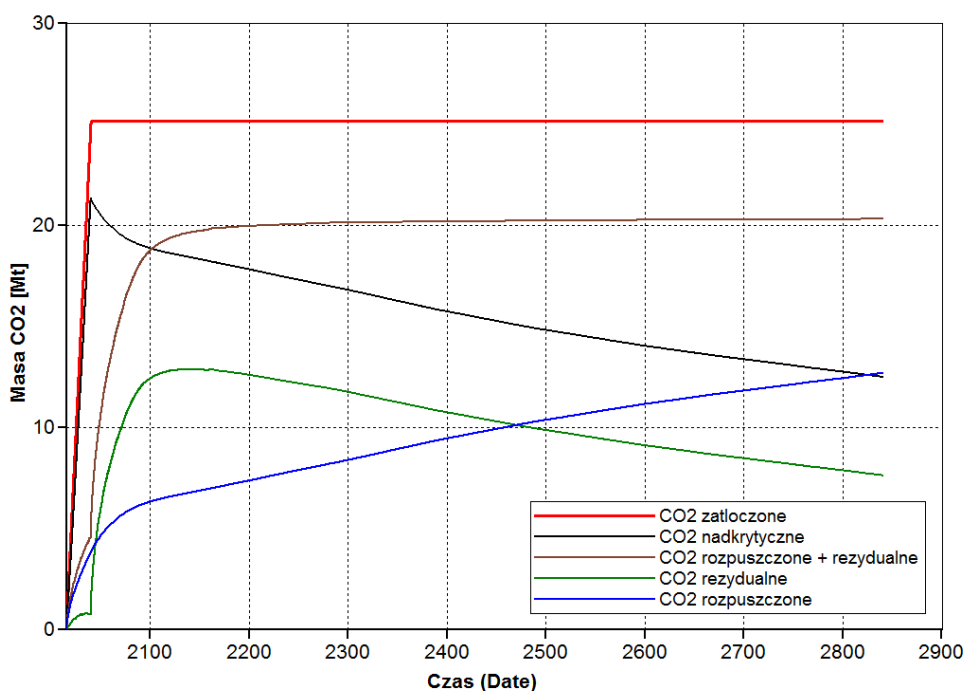


Fig. 1.1.16_125 Dynamika procesu pułapkowania CO₂ w strukturze Suliszewa wyrażona masowo (w milionach ton)

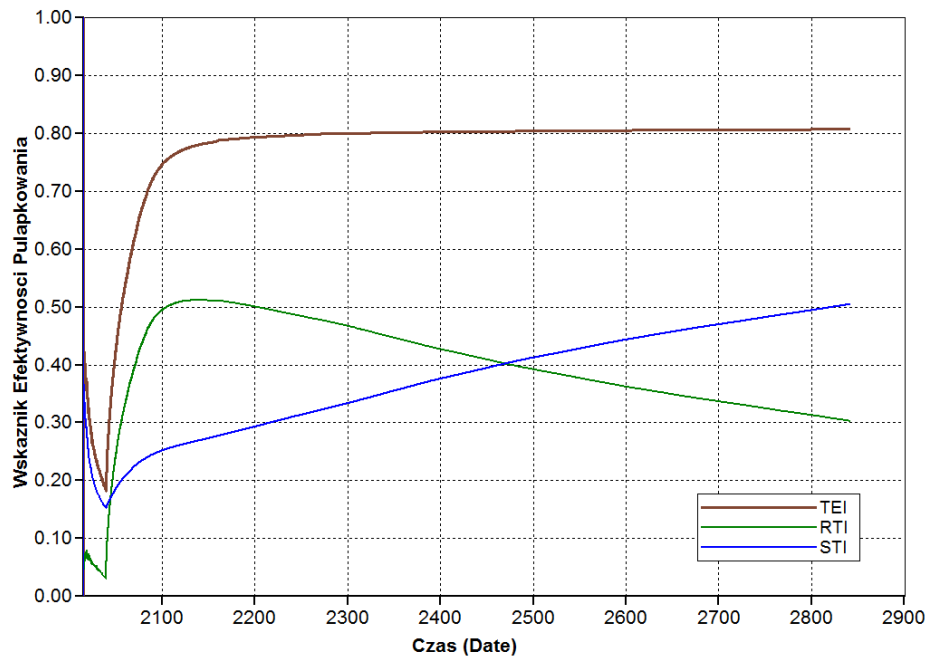


Fig. 1.1.16_126 Wskaźniki efektywności geologicznego składowania CO₂ w strukturze Suliszewa

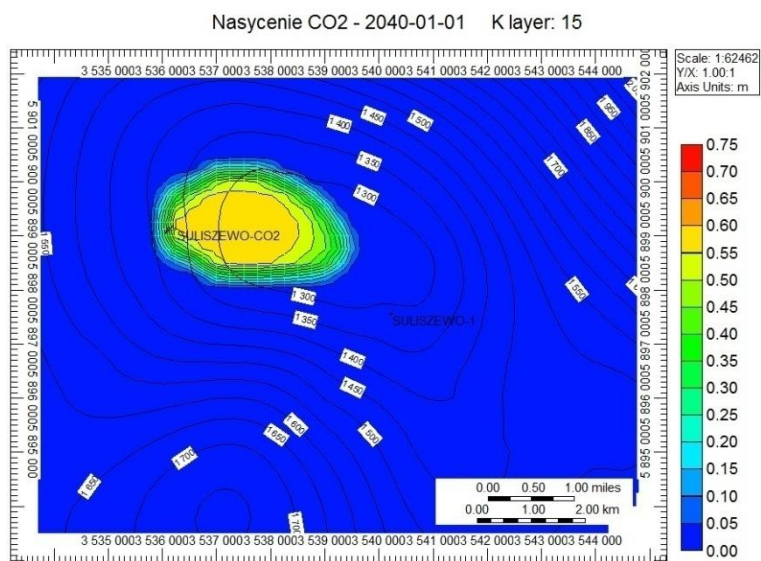
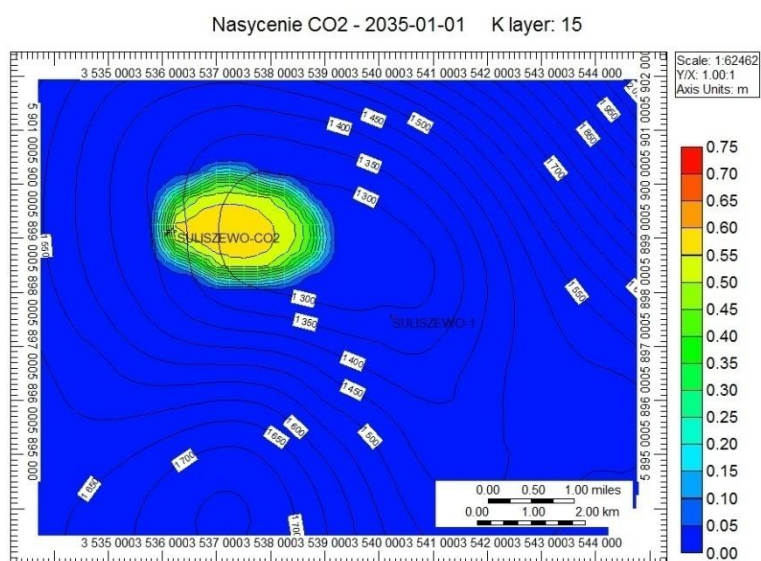
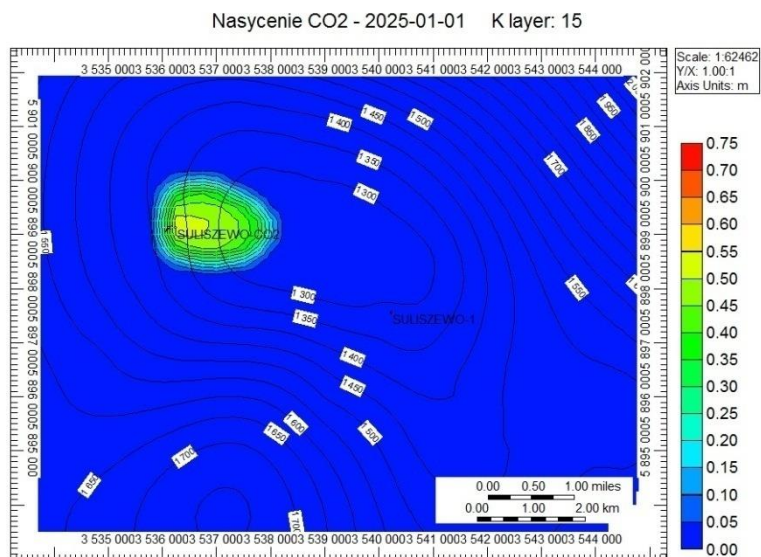


Fig. 1.1.16_127 Suliszewo - Zmiana nasycenia CO₂ w trakcie zatłaczania (10, 20 i 25 lat zatłaczania) (zdjęte warstwy ponad nieciągłością)

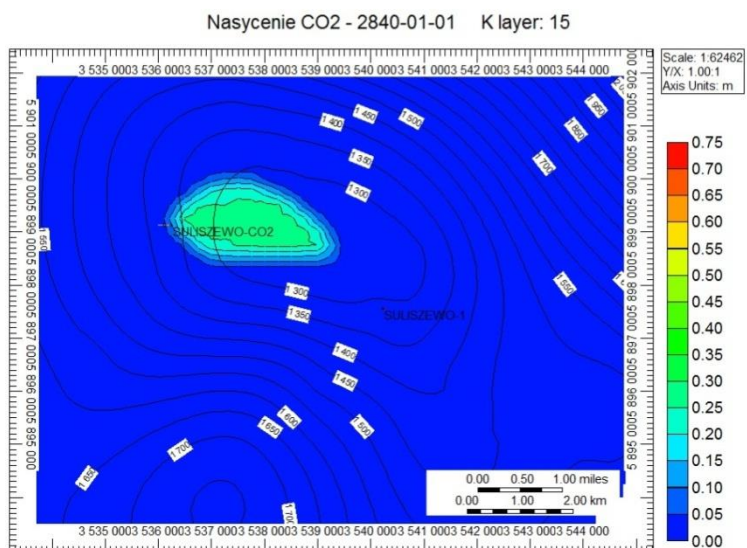
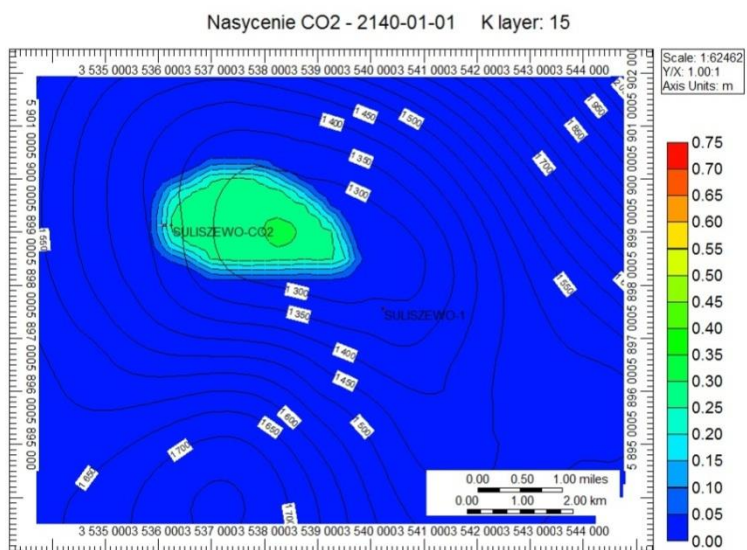
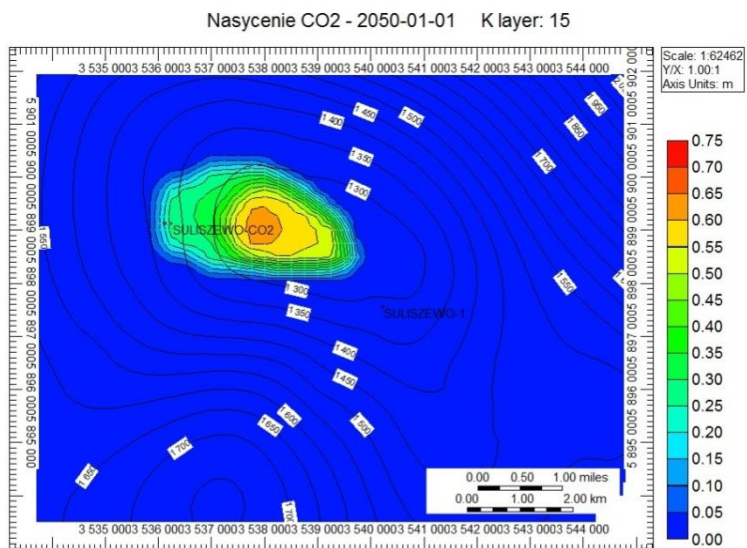


Fig. 1.1.16_128 Suliszewo - Zmiana nasycenia CO₂ po zakończeniu zatlaczania (10, 100 i 800 lat) (zdjęte warstwy ponad nieciągłością)

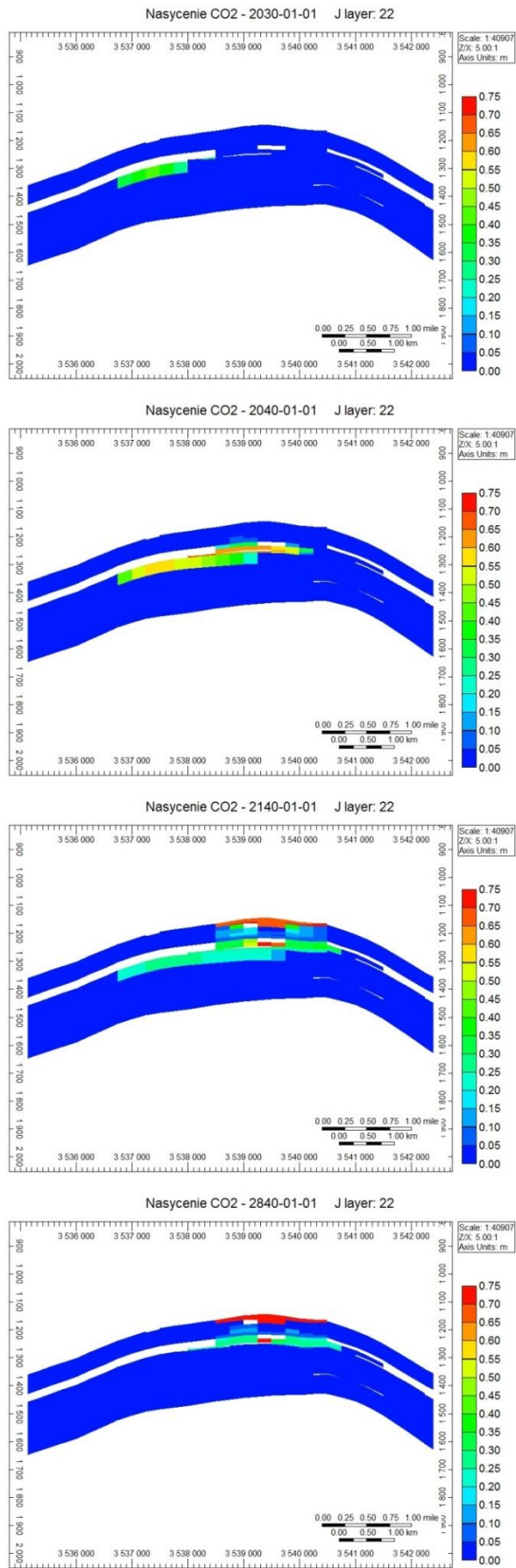


Fig. 1.1.16_129 Migracja CO₂ do stropu Pliensbachu poprzez w szczycie antykliny Suliszewa

Nasylenie CO₂ - 2140-01-01 K layer: 2

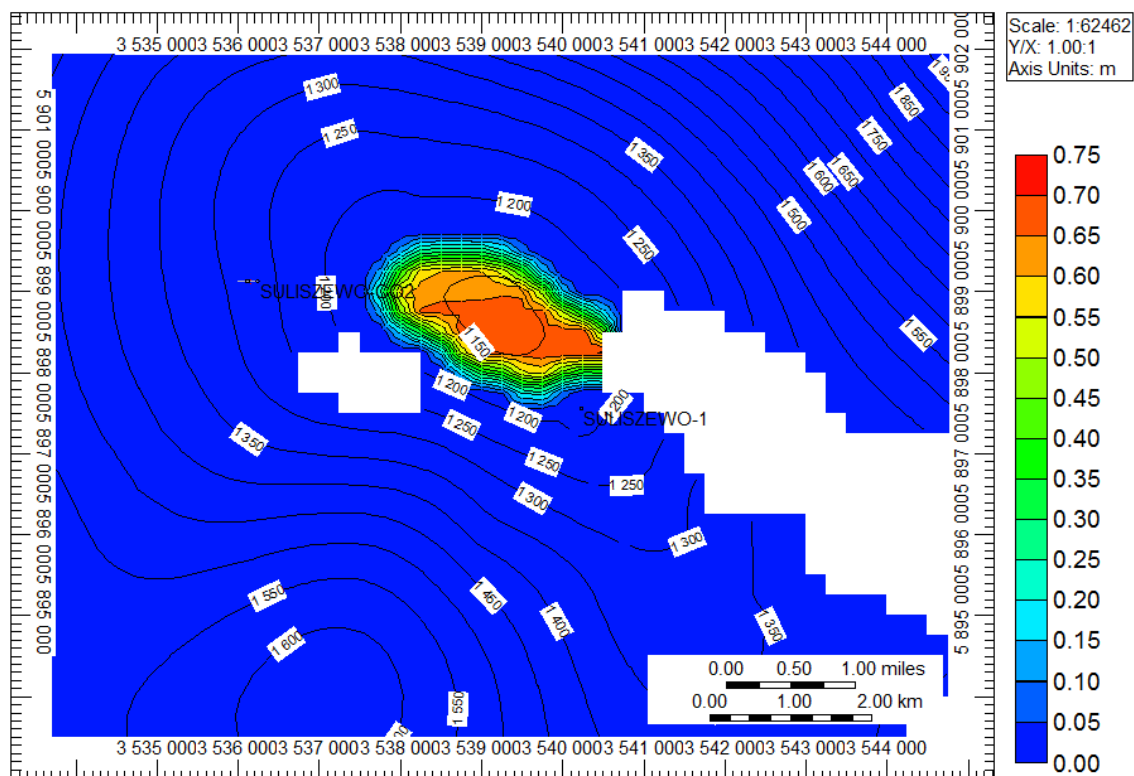


Fig. 1.1.16_130 Nasylenie CO₂ w szczycie antykliny Choszczna (Pliensbach) po 100 latach od zakończenia zatłaczania

Na powyższych figurach przedstawiono na przekrojach poprzez zachowaną ciągłość pionową w modelu (w warstwach Pliensbachu) migrację CO₂ do stropu. Porównując nasycenie w warstwach poniżej i powyżej zaburzenia ciągłości widzimy, że znaczna część zatłoczonego CO₂ akumuluje się powyżej.

Choszczno

Porównując wyniki zatłaczania CO₂ do antyklin Choszczna i Suliszewa zauważamy bardzo dużą dysproporcję w efektywności sekwestracji dla obu przypadków, z przewagą na rzecz Suliszewa. Mimo takich samych założeń, w przypadku symulacji dla Choszczna otrzymano dla analogicznego momentu (rok 2840) całkowitą efektywność pułapkowania rzędu 31% (dla Suliszewa 81%). Tak niska wartość wskaźnika TEI wynika w głównej mierze z założonej lokalizacji odwiertu zatłaczającego w szczycie struktury, co znacznie ograniczyło migrację CO₂ w składowisku, a z tym możliwość pułapkowania. **Fig. 1.1.16_134 i Fig. 1.1.16_135** bardzo dobrze obrazują akumulację zatłoczonego dwutlenku węgla w szczycie antykliny i brak migracji lateralnej chmury CO₂. Oczywiście nie bez znaczenia na wynik pozostają różnice w warunkach p-T panujących w obu potencjalnych składowiskach (antykлина Choszczna zalega na mniejszej głębokości). Warunki te są jednak wystarczające aby całość nie rozpuszczonego dwutlenku węgla pozostawała w gęstym stanie nadkrytycznym.

Zmiany efektywności pułapkowania CO₂ w czasie przedstawiono na **Fig. 1.1.16_131-133**.

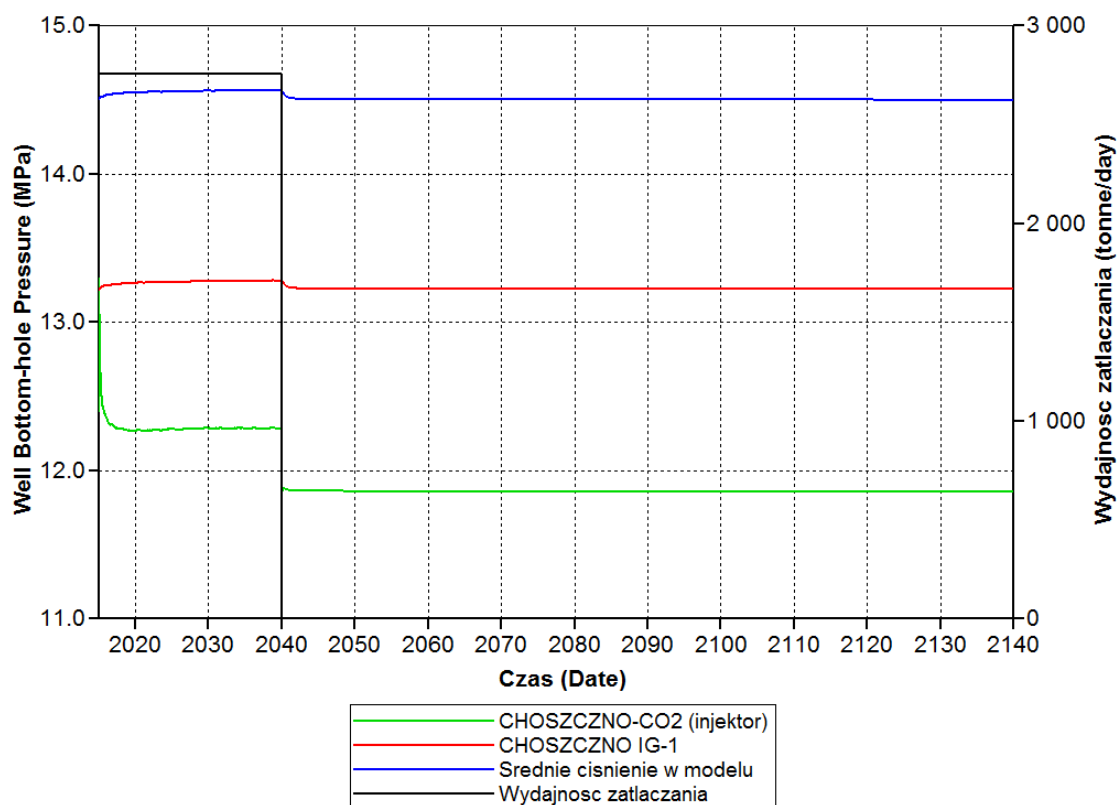


Fig. 1.1.16_131 Wydajność zatłaczania oraz przebiegi zmian ciśnienia w odwiertach oraz ciśnienia średniego (Choszczno)

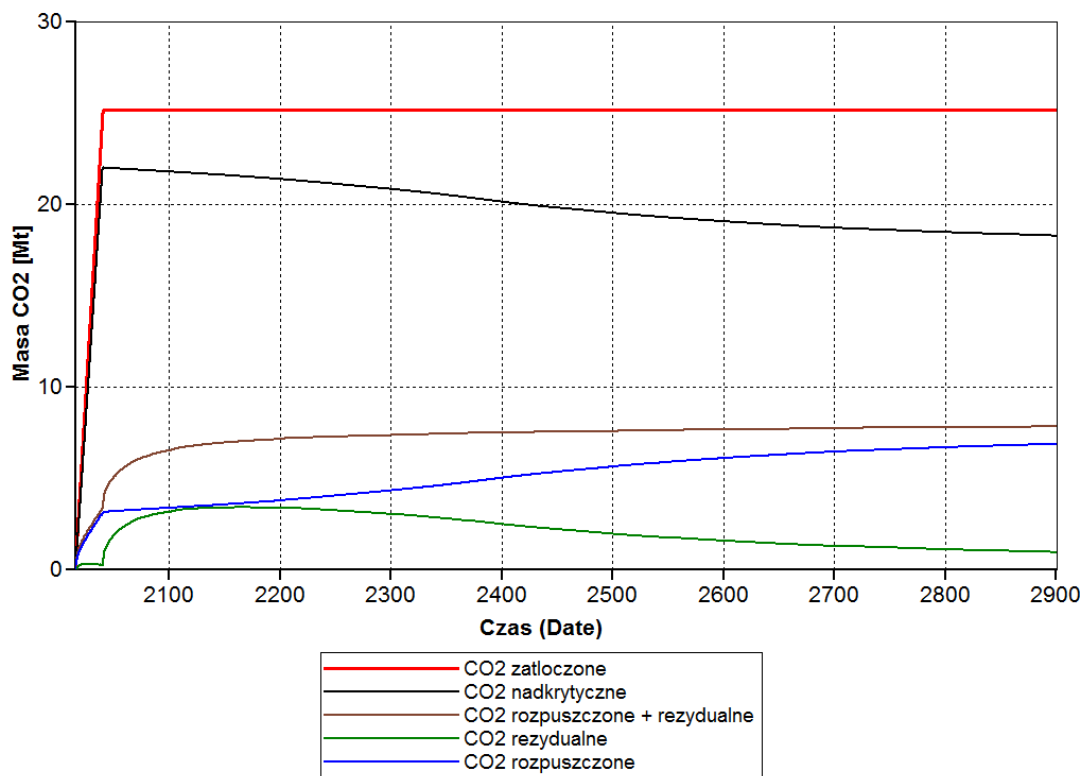


Fig. 1.1.16_132 Dynamika procesu pułapkowania CO₂ w strukturze Choszczna wyrażona masowo (w milionach ton)

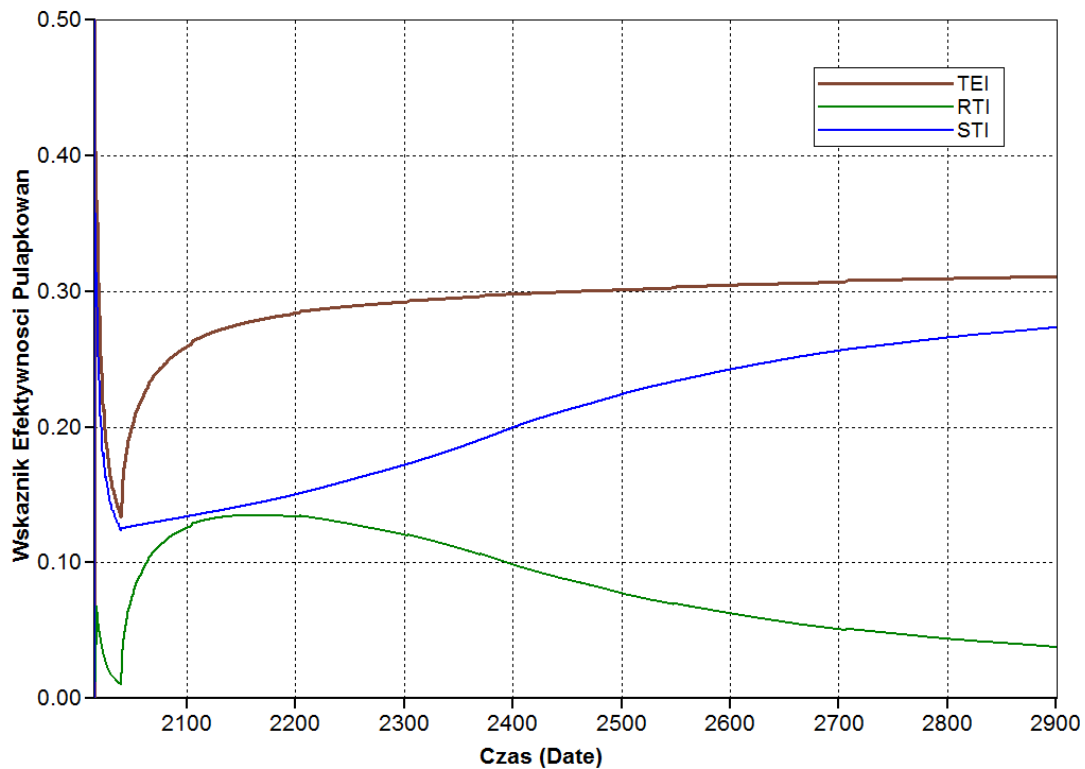
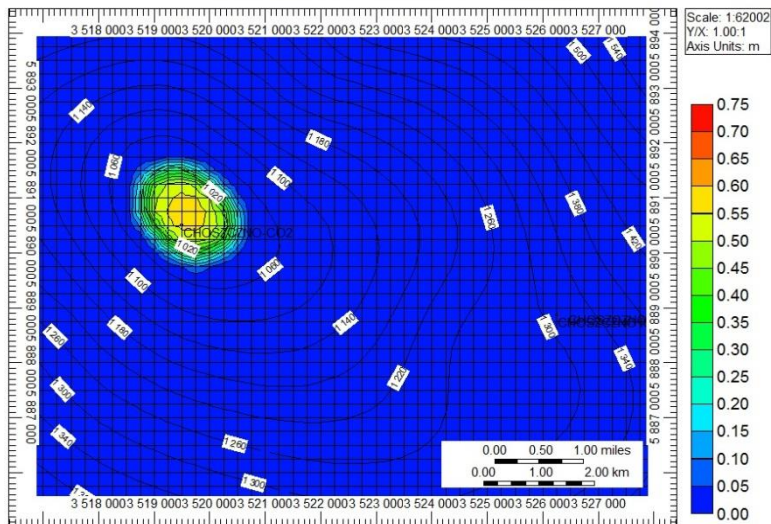
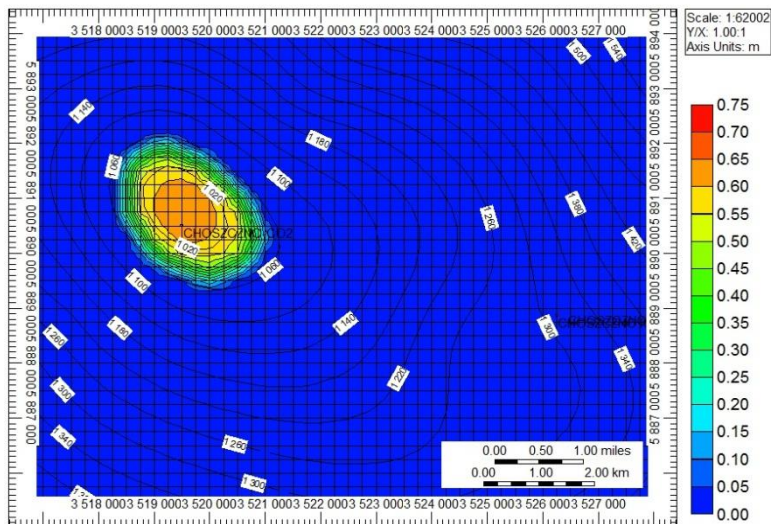


Fig. 1.1.16_133 Wskaźniki efektywności geologicznego składowania CO₂ s strukturze Choszczna

Nasylenie CO₂ - 2025-01-01 K layer: 15



Nasylenie CO₂ - 2035-01-01 K layer: 15



Nasylenie CO₂ - 2040-01-01 K layer: 15

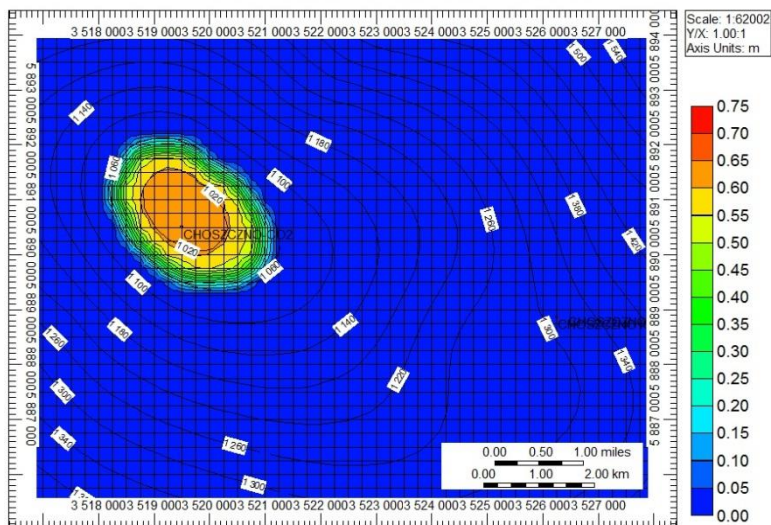


Fig. 1.1.16_134 Choszczno - Zmiana nasycenia CO₂ w trakcie zatłaczania (10, 20 i 25 lat zatłaczania) (zdjęte warstwy ponad nieciągłością)

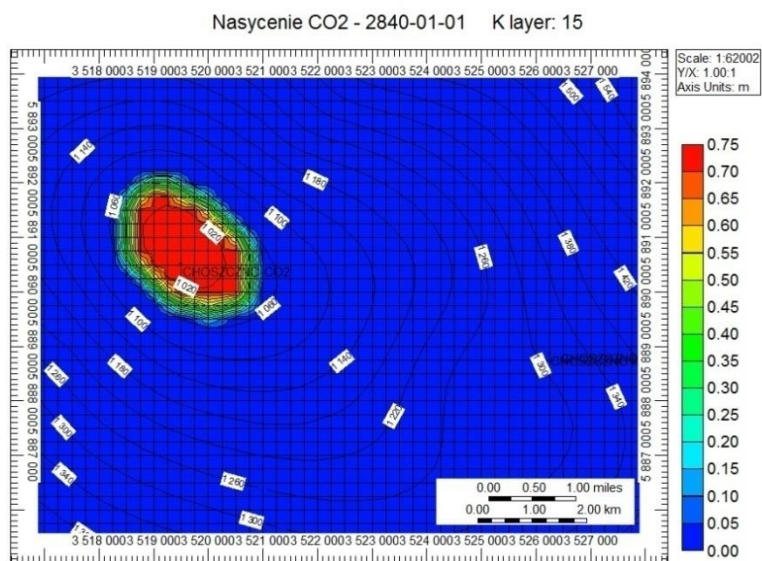
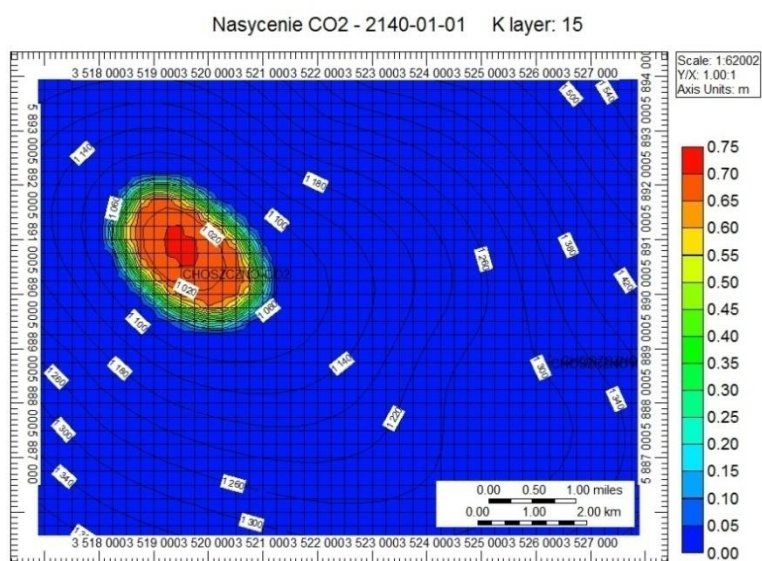
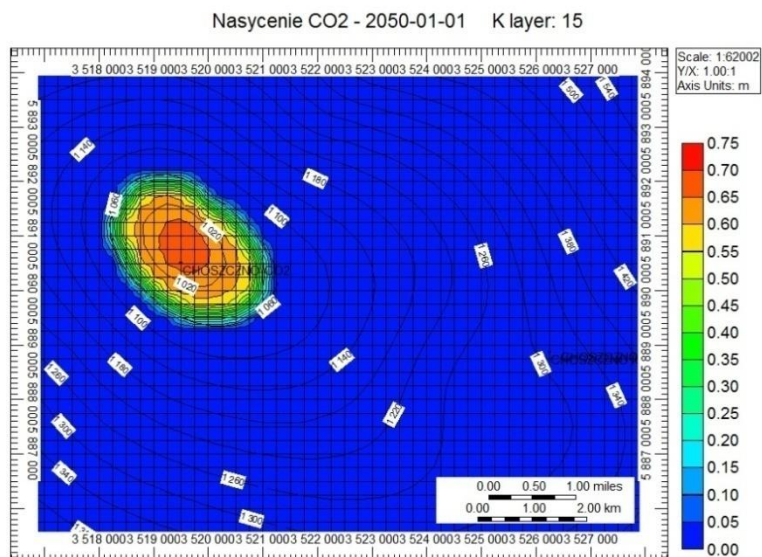


Fig. 1.1.16_135 Choszczno - Zmiana nasycenia CO₂ po zakończeniu zatłaczania (10, 100 i 800 lat) (zdjęte warstwy ponad nieciągłością)

Scenariusz 2 (2 [Mt CO₂/rok])

Zatłaczanie dwutlenku węgla odwiertem Suliszewo-CO₂ z wydajnością 2 [Mt/rok] przez okres 315 lat spowodowało wypełnienie struktury nadkrytycznym CO₂ do poziomu spill pointu na południowy-wschód od odwiertu. W tym czasie całkowita masa zatłoczonego dwutlenku węgla wyniosła 634 [Mt]. Ogromna większość (596 [Mt]) pozostaje w stanie nadkrytycznym i jest mobilna.

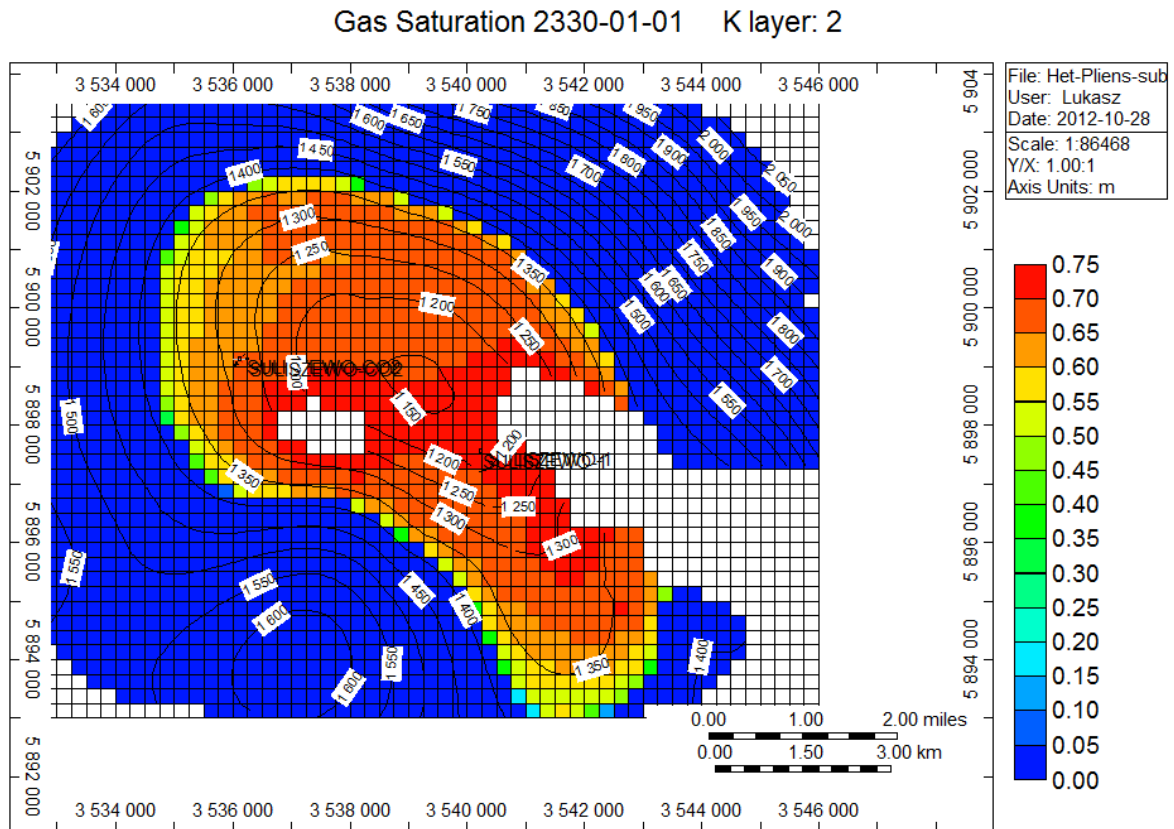


Fig. 1.1.16_136 Suliszewo - zasięg chmury CO₂ po 315 latach zatłaczania z wydajnością 2 [Mt CO₂/rok]

Modelowania dynamiczne dla formacji jury dolnej struktury Pławno-Radęcin (AGH; symulator GEM)

(Jakub Siemek, Stanisław Nagy, Łukasz Klimowski, Rafał Smulski)

Na podstawie zbudowanego regionalnego modelu statycznego rejonu Choszczna dla dolnej jury (zad. 1.1.15, I etap) oraz na podstawie nowego wstępnego modelu statycznego po dodaniu nowych danych stworzono model numeryczny do zatłaczania CO₂. Do realizacji zadania wykorzystano symulator GEM (Computer Modelling Group).

Zbudowany model dynamiczny został zaimportowany do programu GEM z programu PETREL (AGH WGGiOŚ) a następnie zmodyfikowany celem przeprowadzenia symulacji procesu zatłaczania – pokazano warianty zatłaczania dla założeń przygotowanych przez koordynatora

Model statyczny

Punktem wyjścia do budowy modelu symulacyjnego był statyczny model regionalny opracowany w ramach zadania 1.1.15. Z modelu o zasięgu 58200 m x 60219 m wydzielono submodel oznaczony na **Fig. 1.1.16_137** czerwoną ramką o rozciągłości 18000 m x 14000 m. Na wybór tej lokalizacji decydujący wpływ miał kształt struktury, tworzący typową pułpkę strukturalną oraz parametry zbiornikowe i uszczelnieniające. Nie bez znaczenia jest również fakt istnienia w tym rejonie dwóch odwiertów: PŁAWNO-1 i RADEĆCIN-1. W tak wydzielonym modelu zmodyfikowano siatkę pod względem wymiarów bloków, orientacji linii siatki (SE-NW) jak i liczby warstw.

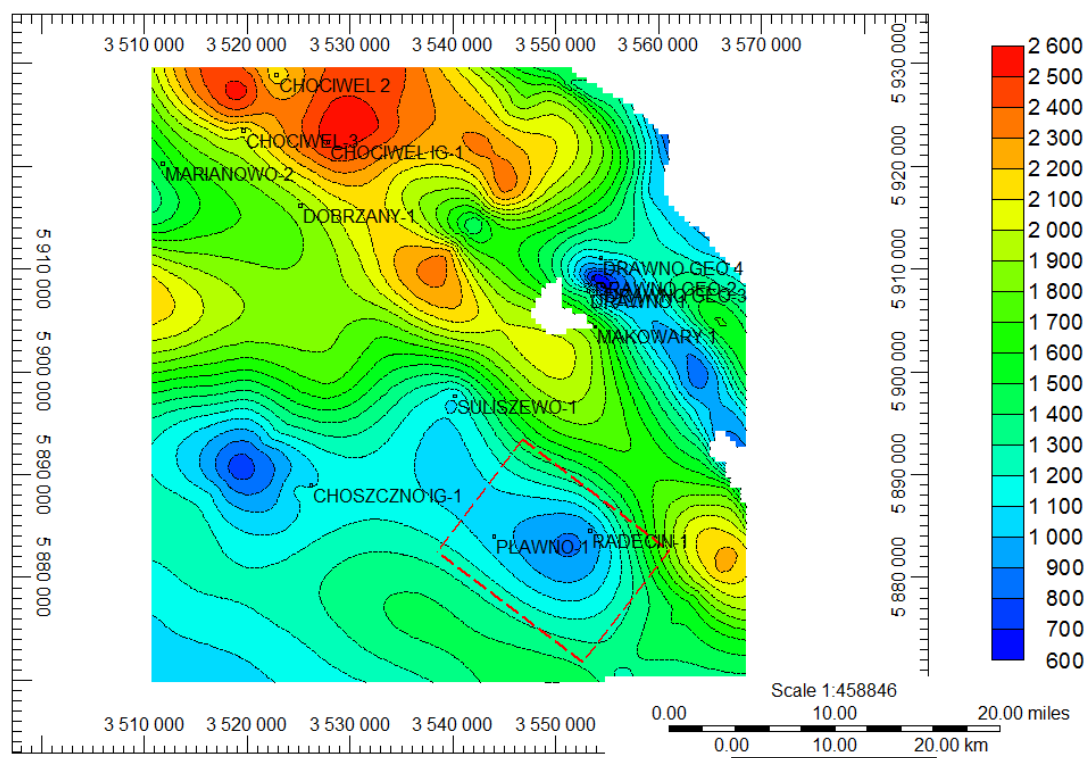


Fig. 1.1.16_137 Mapa stropu modelu regionalnego z zaznaczoną strefą objętą modelem symulacyjnym (czerwona ramka)

Model zbudowany jest na siatce typu corner point o wymiarach 72x56 bloków, 250 m x 250 m każdy. W pionie wydzielono 18 warstw o zróżnicowanych miąższościach, obejmujących formacje wczesnej Jury: Toark, Pliensbach, Synemur i Hettang. W efekcie otrzymano 72873 bloki podstawowe. W blokach, w których umiejscowione są odwierty zastosowano lokalne zagęszczenie siatki. Po zastosowaniu cut-offu na zailenie i przepuszczalność liczba bloków aktywnych zredukowała się o 4457. Po dodatkowym wyłączeniu bloków narożnych, dla lepszego odwzorowania kształtu struktury pod kątem oddziaływania akifera analitycznego (11052 bloki nieaktywne w narożnikach modelu), ostateczna liczba bloków aktywnych uwzględnianych w symulacji wynosi 58264.

Zastosowane wartości cut-off, mimo że można je określić jako stosunkowo mało restrykcyjne (**Tab. 1.1.16_17**), wykazały nieciągłość hydrodynamiczną w warstwach Pliensbachu (**Fig. 1.1.16_139**). Ze względu na konieczność zbadania możliwości migracji CO₂ ponad tę strefę częściowo uszczelniającą, zdecydowano się nie przyjmować tej warstwy jako zamknięcia stropu.

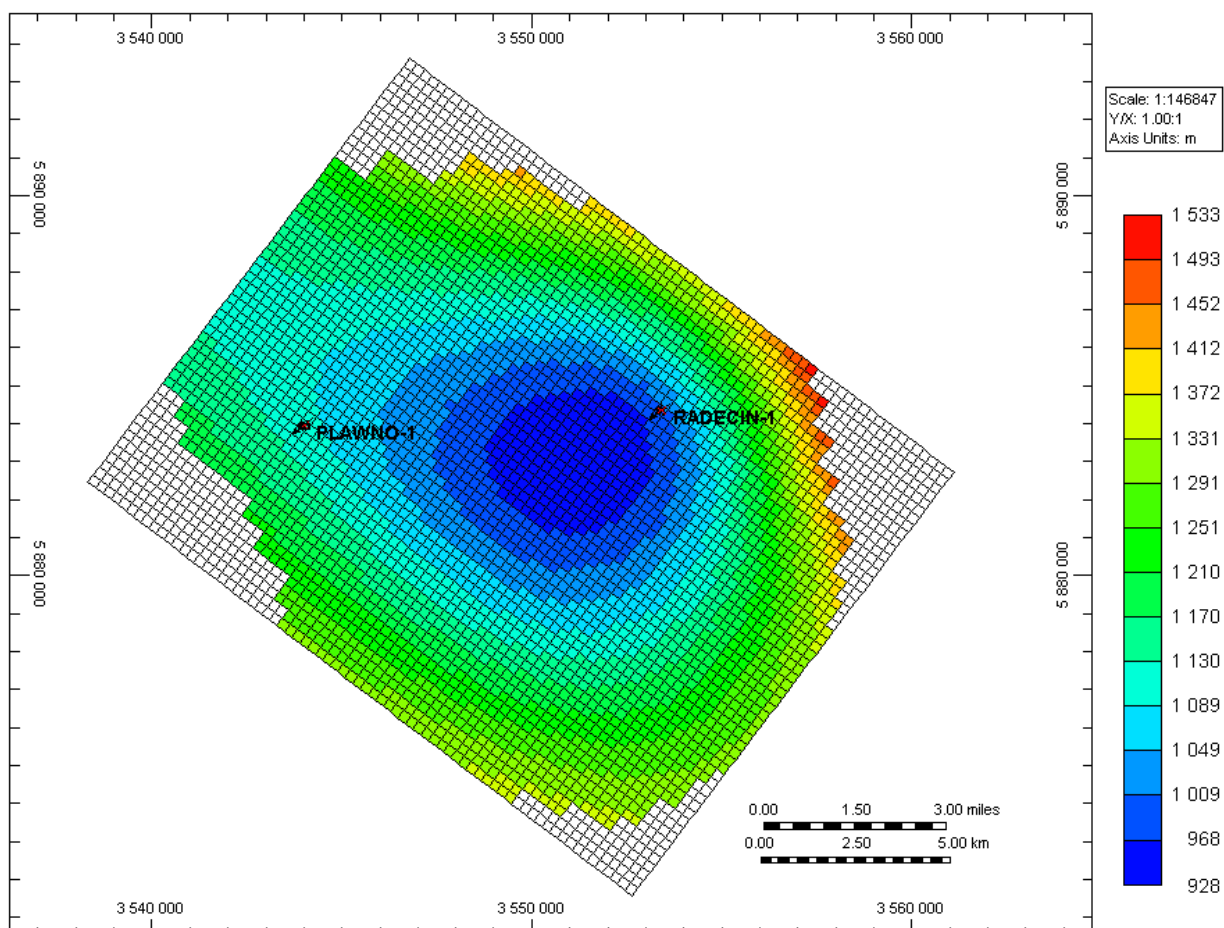


Fig. 1.1.16_138 Mapa strukturalna stropu (Toark) z siatką bloków modelu symulacyjnego

Tab. 1.1.16_17 Parametry cut-off

Parametr	Cut-off	Liczba bloków nieaktywnych
Zailenie	70%	429
Przepuszczalność	0,01 mD	4446
Razem		4457

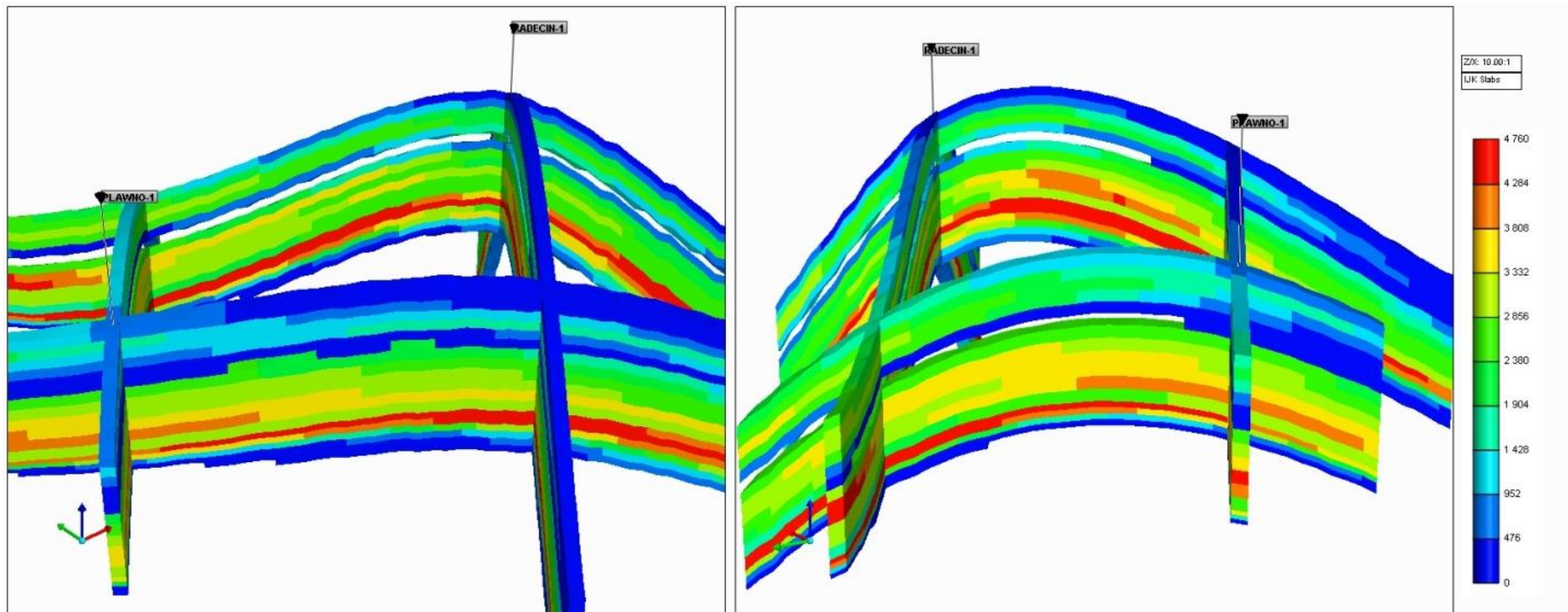


Fig. 1.1.16_139 Nieciągłość hydrodynamiczna w modelu symulacyjnym w przekrojach odwiertów zatłaczających

Model dynamiczny

Przepuszczalności względne

Proces zatłaczania CO₂ do warstwy nasyconej wodą (solanką) kontrolowany jest przez krzywe przepuszczalności względnych. W zawiązku z tym, że autorzy nie dysponowali wynikami badań na rdzeniach, w omawianej analizie przyjęto krzywe przepuszczalności względnych wygenerowane na podstawie korelacji Corey'a (Corey, 1976, Delshad, 2010):

$$k_{rw} = S_{wD}^4$$

$$k_{rCO_2} = 0,4(1 - S_{wD}^2)(1 - S_{wD})^2,$$

gdzie przez S_{wD} oznaczono bezwymiarowe (znormalizowane) nasycenie fazą zwilżającą:

$$S_{wD} = \frac{S_w - S_{wr}}{1 - S_{wr}}.$$

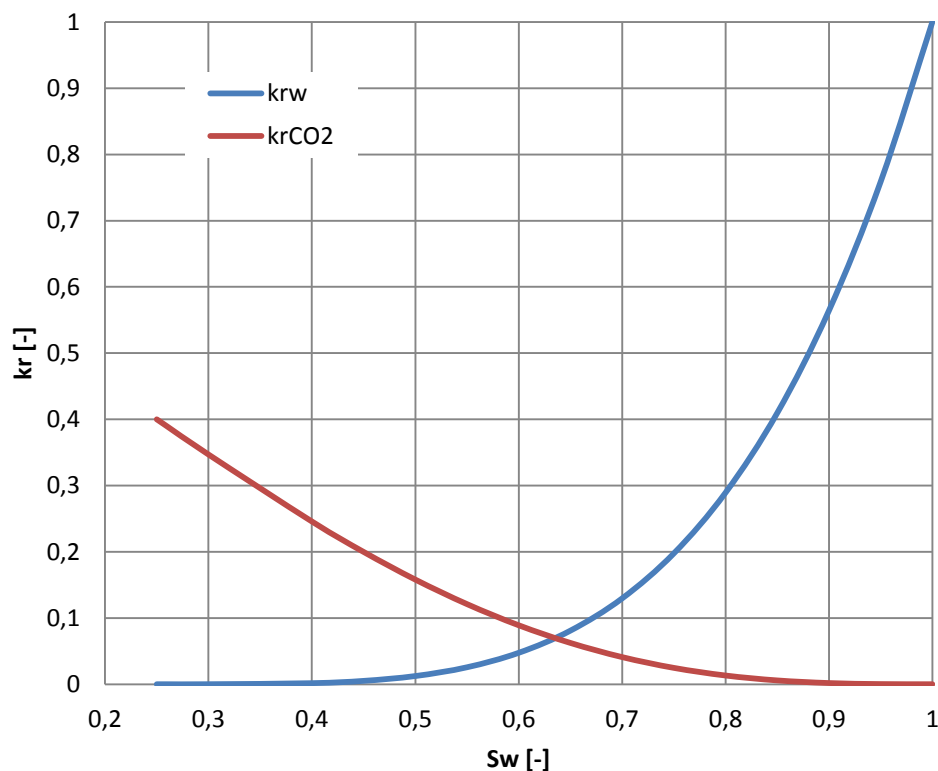


Fig. 1.1.16_140 Wykres zastosowanych przepuszczalności względnych

Istotny wpływ na "pułapkowanie" CO₂ ma efekt histerezy przepuszczalności względnej w trakcie fazy nasiąkania po zakończeniu zatłaczania. Modelowany jest dla założonej wartości maksymalnego rezydualnego nasycenia CO₂ równej $S_{gir} = 0,3$ zgodnie z zaimplementowanym w symulatorze modelem Landa (CMG-GEM). Nasycenie wodą związaną w analizowanym modelu wynosi $S_{wc} = 0,25$.

Płyny złożowe i inicjalizacja modelu

Początkowo model jest w 100% nasycony solanką (kontur gaz-woda zdefiniowany powyżej minimalnej głębokości modelu) o zasoleniu 12.9 g/dm^3 i gęstości $1009,3 \text{ kg/m}^3$. Lepkość fazy wodnej modelowana jest w oparciu o korelację Kestin'a jako funkcja ciśnienia, temperatury i zasolenia, natomiast jej gęstość wyznaczana jest z korelacji Rowe-Chou (CMG-GEM).

Rozpuszczalność dwutlenku węgla w wodzie w zastosowanym symulatorze modelowana jest na podstawie prawa Henry'ego z wykorzystaniem korelacji Harvey'a. Dzięki zastosowaniu tej opcji przy obliczaniu stałej Henry'ego dla CO_2 uwzględniane jest wpływ ciśnienia, temperatury oraz zasolenia (CMG-GEM).

Numeryczny model symulacyjny zdefiniowany został jako otwarty, co umożliwia nieograniczony odpływ i/lub dopływ płynów. W tym celu wykorzystano akifer analityczny na bazie modelu Cartera-Tracy o nieograniczonym zasięgu i parametrach odpowiadających wartościom średnim modelu numerycznego.

Model symulacyjny został zainicjowany przy średnim ciśnieniu złożowym $13,55 \text{ MPa}$ i temperaturze 38°C na głębokości 1000 m z gradientem $0,03 \text{ }^\circ\text{C/m}$.

Warianty zatłaczania

Przyjęto dwa podstawowe scenariusze symulacji zatłaczania CO₂ do analizowanej struktury, zróżnicowane ze względu na wydajność zatłaczania. W pierwszym (1) przyjęto wydajność rzędu 1 Mt CO₂/rok, w drugim (2) wydajność zatłaczania podwójono (2 Mt CO₂/rok). Przy przyjętym 25-letnim okresie zatłaczania docelowa ilość zatłoczonego dwutlenku węgla w obu scenariuszach wynosi odpowiednio 25 i 50 Mt. w trakcie symulacji zatłaczania nie uwzględniono stójek; zatłaczanie prowadzone jest w sposób ciągły, jedynie w trakcie "rozruchu" i zatrzymania zatłaczania zastosowano stopniową zmianę wydajności.

Dodatkowo analizie poddano efektywność procesu sekwestracji ze względu na wybór odwiertów zatłaczających. I tak w ramach scenariuszy 1 i 2 wydzielono warianty A, B i C, w których zatłaczanie całej założonej ilości CO₂ prowadzone jest jednym odwiertem PŁAWNO-1 (A) lub RADĘCIN-1 (B) lub obydwojoma odwiertami równocześnie z równym podziałem wydajności (C). Dokładne wartości wydajności zatłaczania w poszczególnych wariantach przedstawia **Tab. 1.1.16_18**.

Tab. 1.1.16_18 Zestawienie wydajności zatłaczania w poszczególnych wariantach symulacji

scenariusz	odwiert	wydajność zatłaczania [nm ³ /d]		
		wariant A	wariant B	wariant C
1	PŁAWNO-1	1392970	0	696485
	RADĘCIN-1	0	1392970	696485
2	PŁAWNO-1	2785940	0	1392970
	RADĘCIN-1	0	2785940	1392970

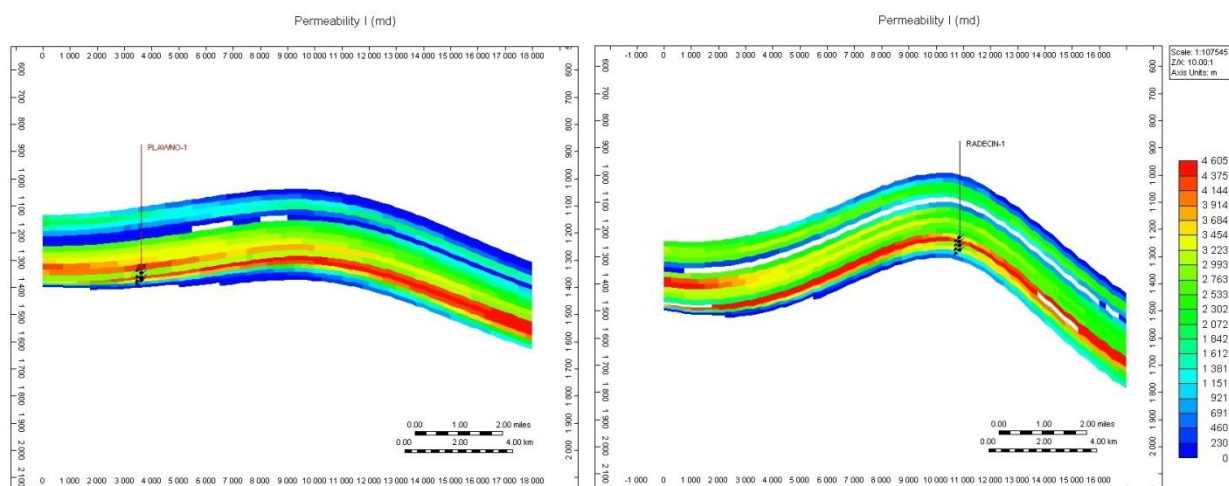


Fig. 1.1.16_141 Interwały otwarcia odwiertów PŁAWNO-1 i RADĘCIN-1

Wyniki symulacji

W celu oceny efektywności procesu sekwestracji dwutlenku węgla w analizowanej strukturze dla każdego wariantu symulacji wyznaczono wskaźniki określające ilość CO₂ pozostającą w danym momencie w poszczególnych fazach sekwestracyjnych: rozpuszczonego w wodzie (STI - Solution Trapping Index) oraz unieruchomionego w wyniku działania efektu histerezy przepuszczalności (RTI - Residual Trapping Index). Indeks całkowitej efektywności "pułapkowania" CO₂, określony przez sumę STI i RTI, oznaczono jako TEI - Trapping Efficiency Index.

Scenariusz 1 (1Mt CO₂/rok)

Na podstawie przeprowadzonych symulacji zatłaczania dwutlenku węgla do warstw wodonośnych dolnej jury można wysnuć następujące wnioski. We wszystkich trzech przypadkach osiągnięto założoną wydajność zatłaczania bez istotnego wpływu na ciśnienie denne w odwiertach zatłaczających (**Fig. 1.1.16_143**). Wynika to z dużych wartości iloczynu kh dla wybranych interwałów otwarcia odwiertów oraz przyjęcia modelu otwartego.

Z punktu widzenia efektywności procesu sekwestracji optymalnym z rozpatrzonych rozwiązań jest wariant A, czyli zatłaczanie odwiertem PŁAWNO-1. Wynika to z jego lokalizacji w oddaleniu od szczytu antykliny. Tuż po zakończeniu zatłaczania dominuje zjawisko pułapkowania rezydualnego, które po około 60 latach osiąga wartość maksymalną RTI = 49%. W tym czasie CO₂ rozpuszczone w wodzie stanowi 29% całej masy zatłoczonej, co daje TEI = 78%. Od tego momentu grawitacyjna migracja nadkrytycznego CO₂ w kierunku szczytu struktury intensyfikuje znacząco proces rozpuszczania CO₂ w solance. Po dwustu latach od zakończenia zatłaczania 82% zatłoczonego gazu jest zatrzymane. Od tej pory przyrost TEI jest niewielki i po 1000 latach od zakończenia zatłaczania nieznacznie przekracza 84%, przy czym ciągle trwa proces przechodzenia CO₂ ze stanu rezydualnego do rozpuszczonego.

Najmniejsze wartości STI i RTI, a w związku z tym TEI osiągnane są dla wariantu B, czyli zatłaczania z wykorzystaniem m odwiertu RADECIN-1. Jest to spowodowane jego umiejscowieniem tuż przy szczycie struktury magazynowej, a co za tym idzie ograniczonymi możliwościami rozpuszczania i zatrzymywania z przestrzeniami porowych (krótki czas i droga migracji). W tym wariantcie uzyskano TEI = 32%.

Wariantem pośrednim, będącym wypadkową omówionych wyżej procesów, jest zatłaczanie obydwoma odwiertami. Taki scenariusz pozwala uzyskać całkowity wskaźnik wydajności sekwestracji blisko 72%.

Dokładny przebieg zmian poszczególnych wskaźników (STI, RTI i TEI) przedstawiono na **Fig. 1.1.16_146**. W **Tab. 1.1.16_19** zestawiono natomiast masowe ilości CO₂ rozpuszczonego, rezydualnego i sumy tych wartości. Pozostała część pozostaje w stanie nadkrytycznym (brak fazy gazowej).

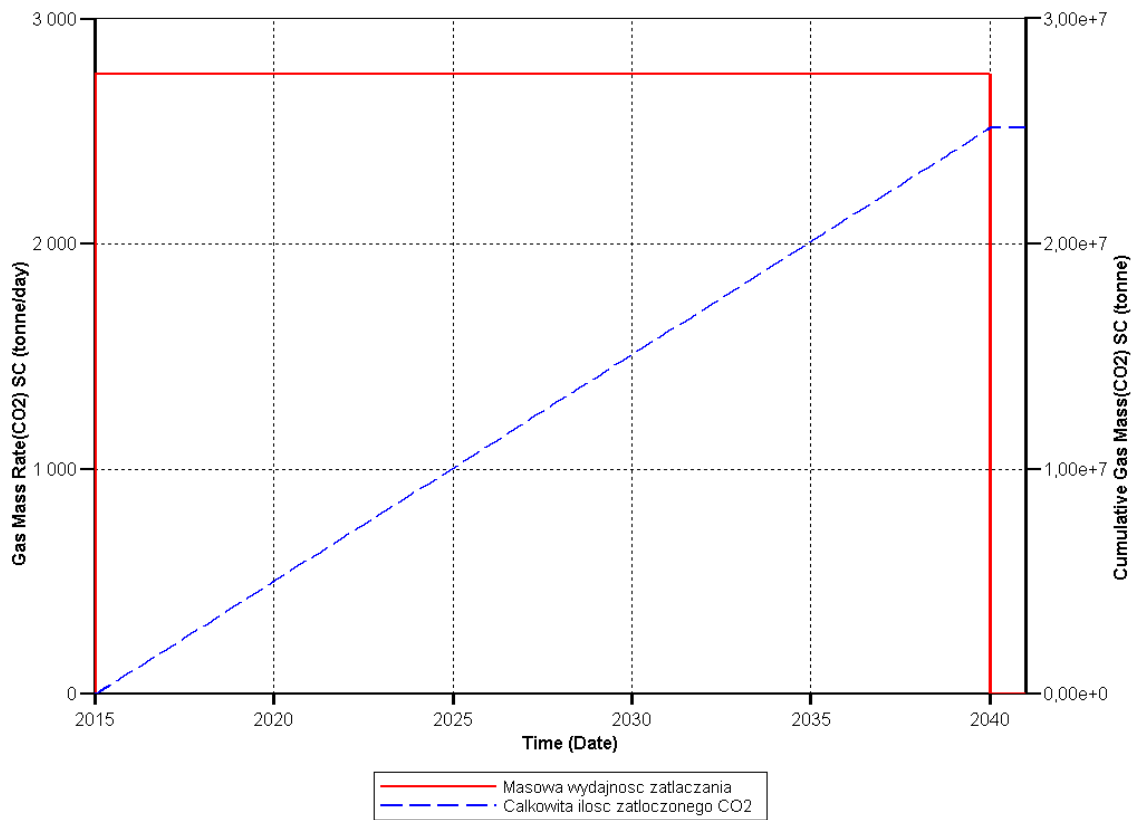


Fig. 1.1.16_142 Wydajność zatłaczania i całkowita ilość zatłoczonego CO₂ dla scenariusza 1 (niezależnie od wariantu)

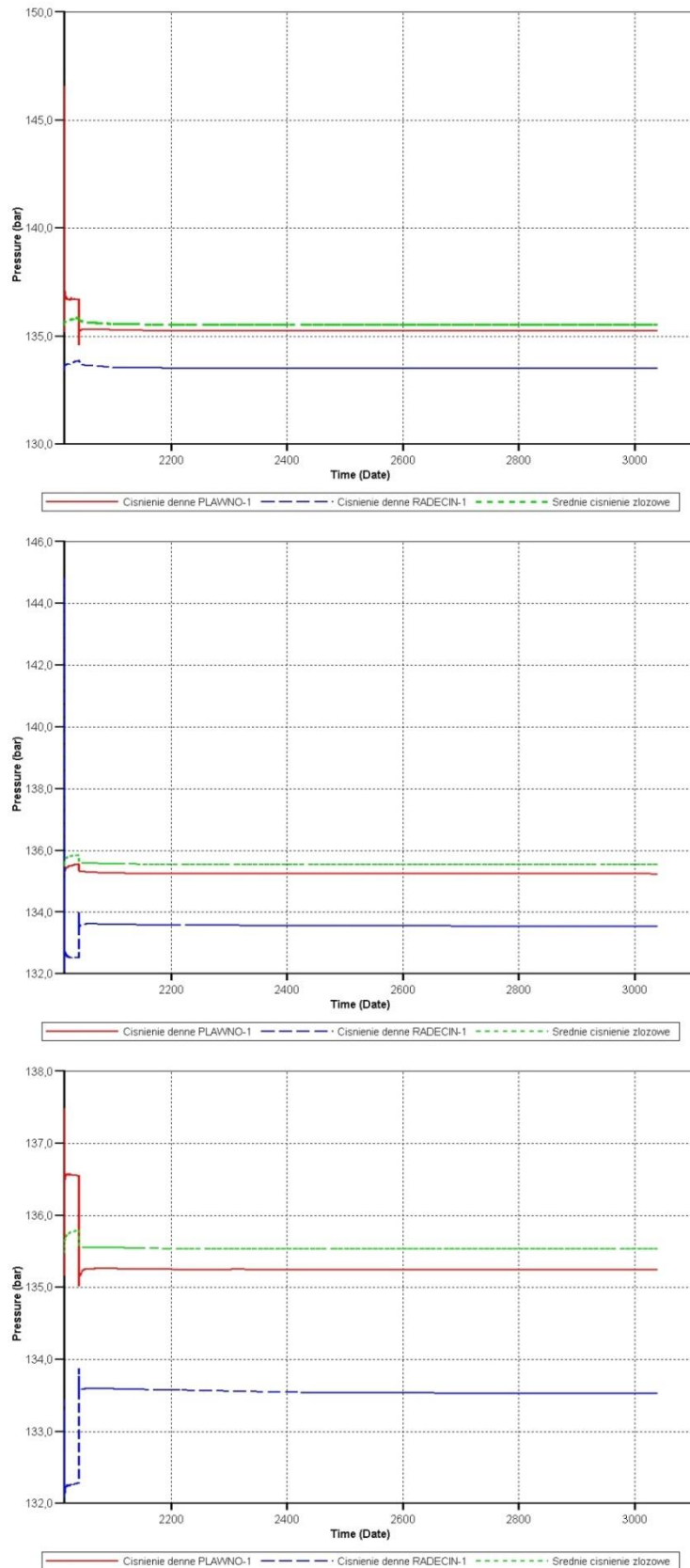


Fig. 1.1.16_143 Ciśnienie denne w odwiertach zatłaczających i średnie ciśnienie złożowe w trakcie zatłaczania i po jego zakończeniu (od góry: warianty A, B, C)

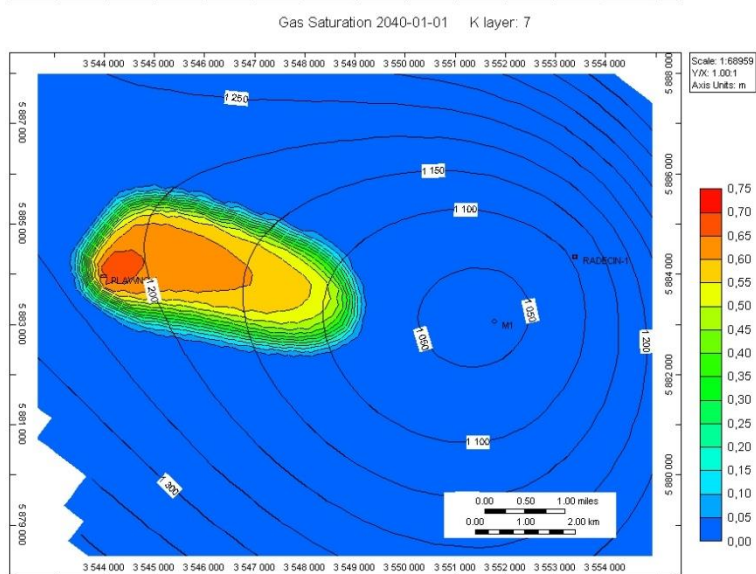
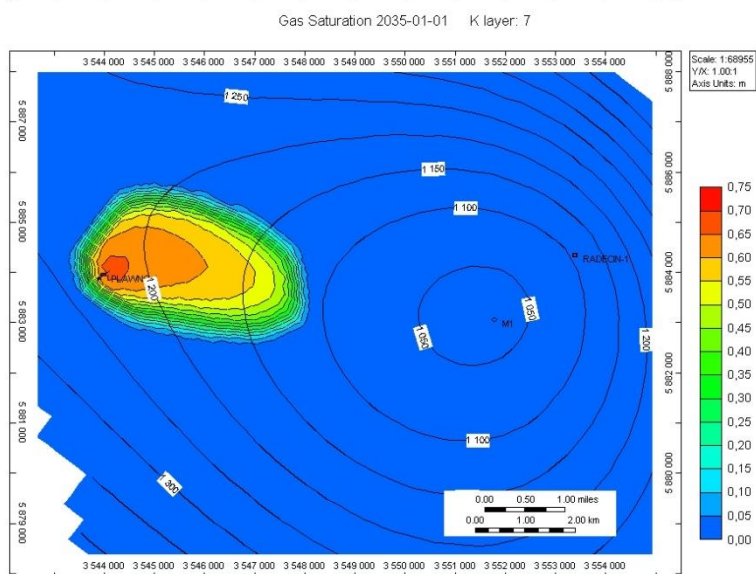
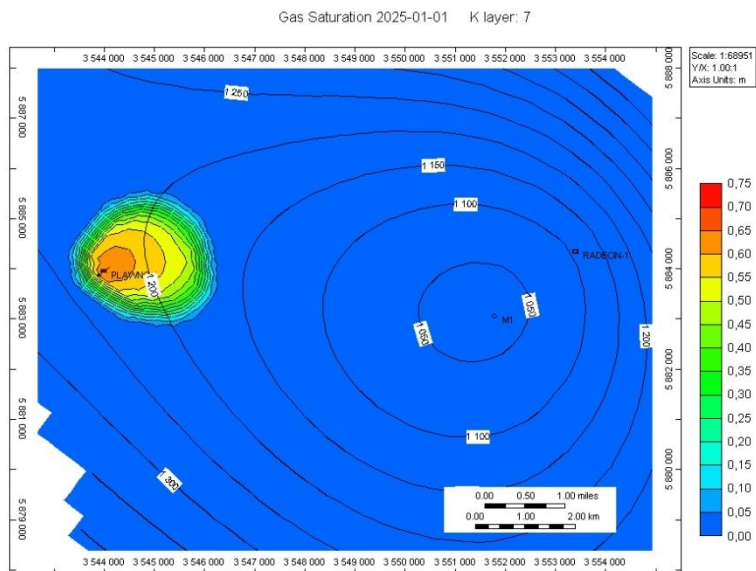


Fig. 1.1.16_144 Zmiana nasycenia CO₂ w trakcie zatłaczania wg scenariusza 1A (10, 20 i 25 lat zatłaczania) (zdjęte warstwy ponad nieciągłością)

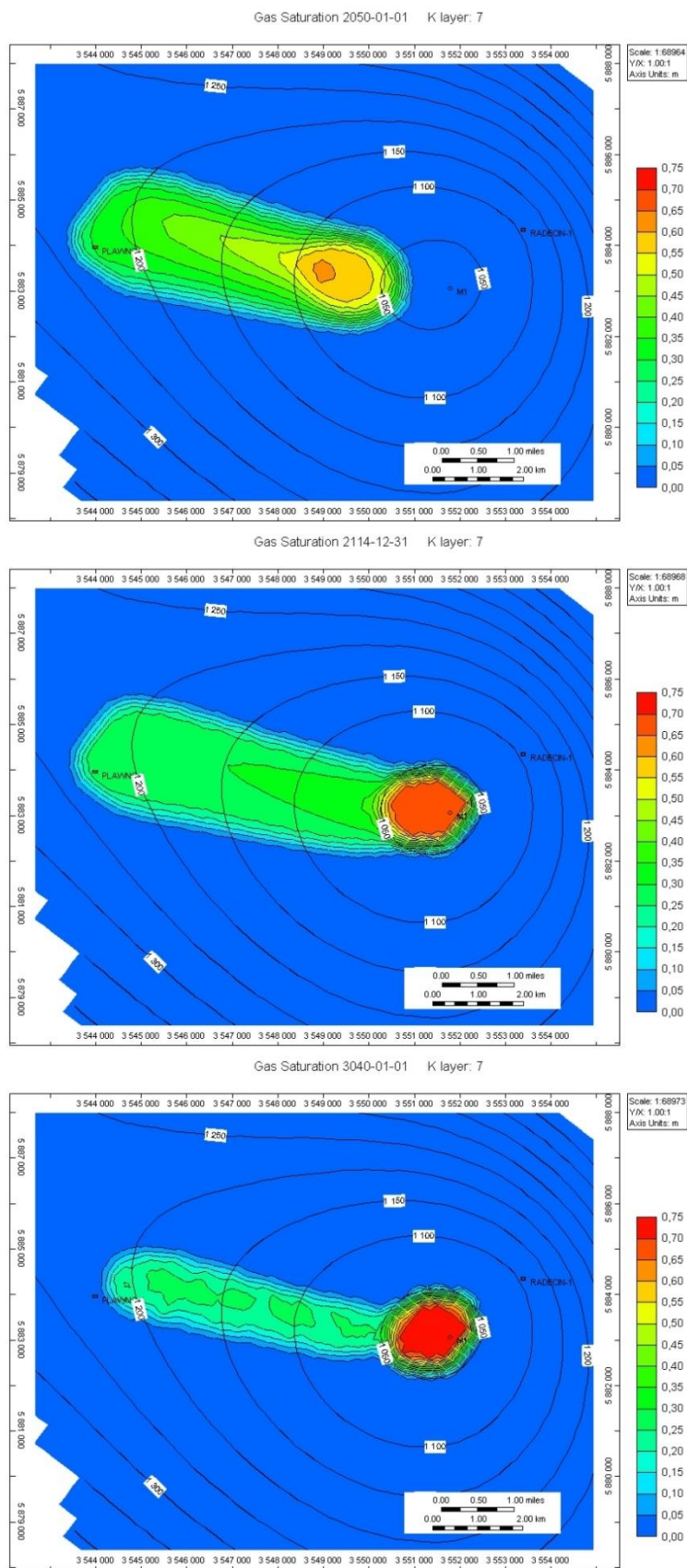


Fig. 1.1.16_145 Zmiana nasycenia CO₂ po zakończeniu zatłaczania wg scenariusza 1A (10, 75 i 100 lat po zakończeniu zatłaczania) (zdjęte warstwy ponad nieciągłością)

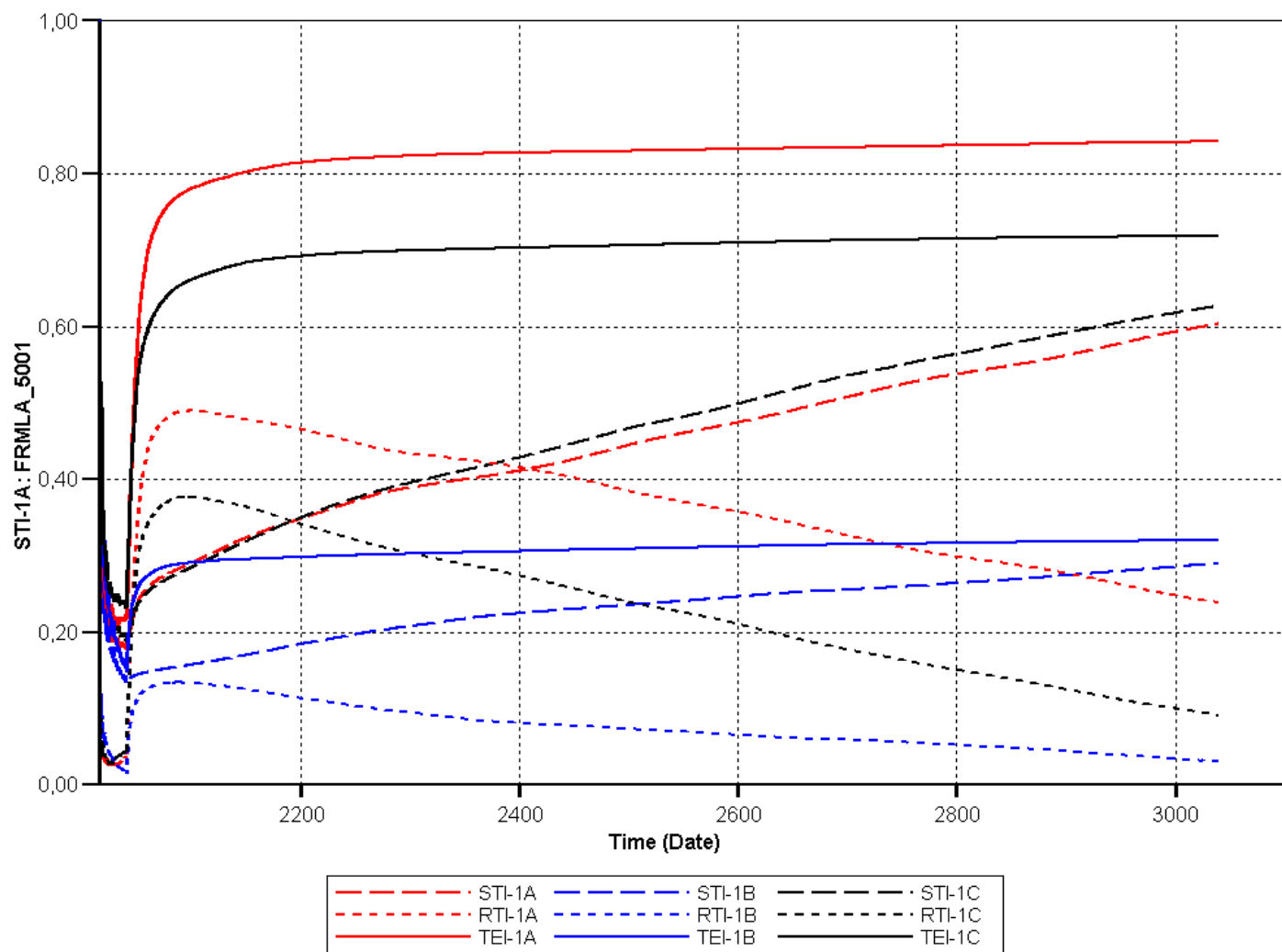


Fig. 1.1.16_146 Wskaźniki efektywności geologicznego składowania CO₂ w poszczególnych wariantach scenariusza 1

Tab. 1.1.16_19 Masa CO₂ rozpuszczonego, rezydualnego i masa sumaryczna

Czas		CO ₂ rozpuszczone w wodzie [Mt]			CO ₂ rezydualne [Mt]			suma [Mt]		
data zgodnie z symulacją	w latach od zakończenia zatłaczania	A	B	C	A	B	C	A	B	C
2040-01-01	0	4,46	3,34	4,74	1,06	0,46	1,19	5,52	3,80	5,93
2045-01-01	5	5,40	3,56	5,53	5,79	2,40	5,47	11,19	5,96	10,99
2090-01-01	50	7,16	3,91	7,02	12,29	3,38	9,46	19,46	7,29	16,48
2240-01-01	200	9,25	4,90	9,34	11,36	2,65	8,17	20,60	7,56	17,51
2540-01-01	500	11,51	6,03	12,05	9,38	1,77	5,75	20,90	7,81	17,80
3040-01-01	1000	15,19	7,29	15,78	6,00	0,78	2,30	21,19	8,07	18,08

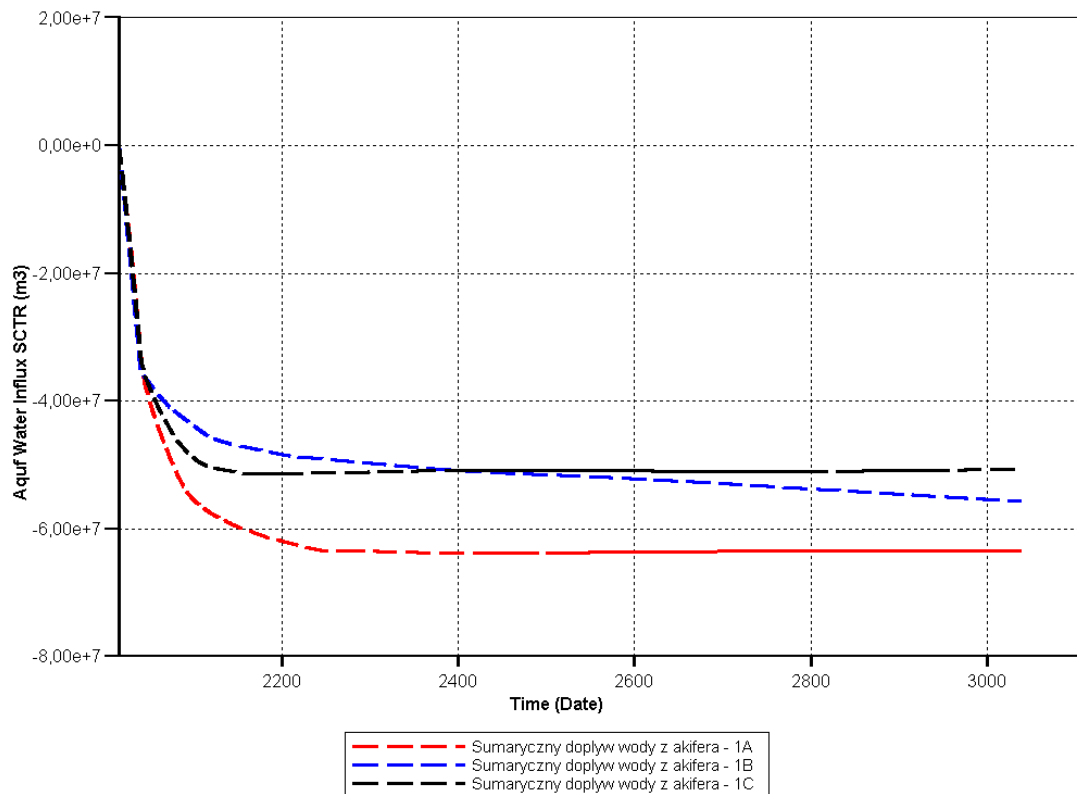


Fig. 1.1.16_147 Dopływ wody z akifera analitycznego (znak minus oznacza odpływ wody z modelu)

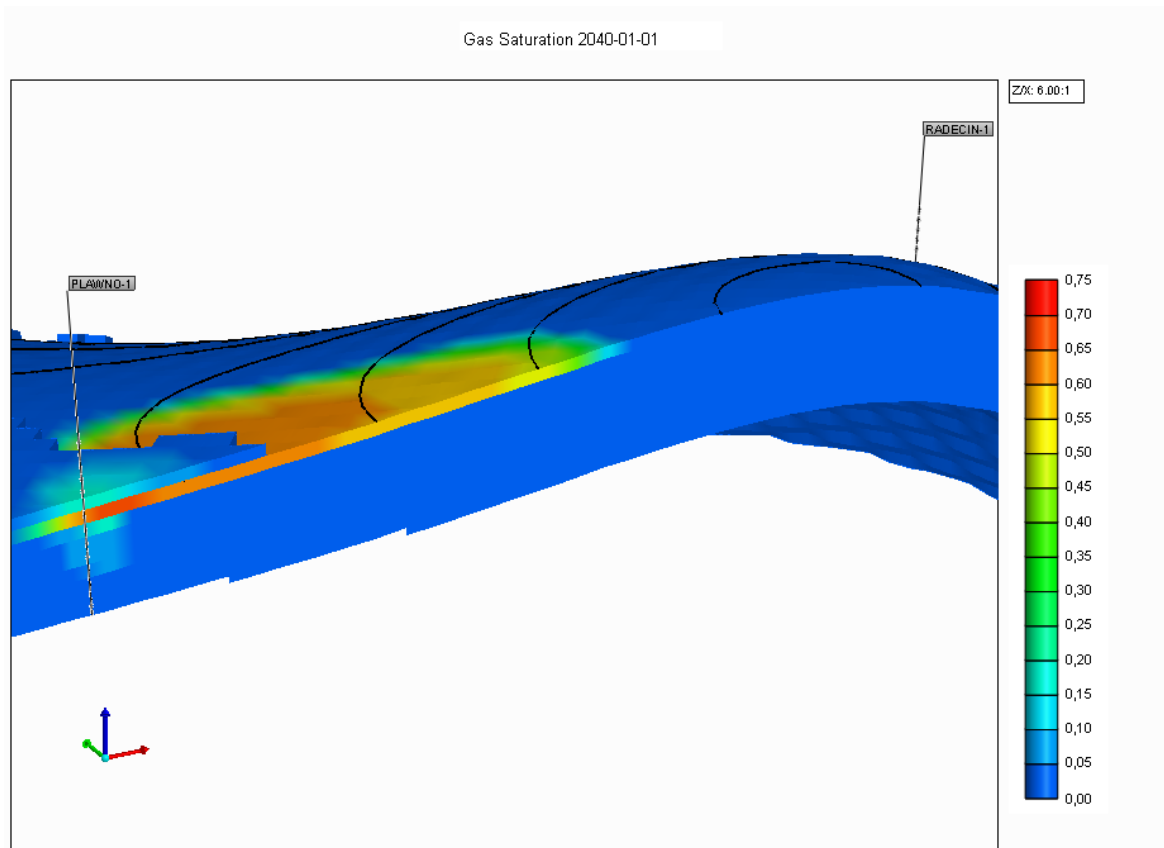


Fig. 1.1.16_148 Przenikanie CO₂ nad odwiertem PŁAWNÓ-1 do warstwy częściowo nieprzepuszczalnej

Na powyższej figurze(**Fig. 1.1.16_148**) przedstawiono przenikanie CO₂ do warstwy, która w większej części została wyłączona z symulacji poprzez cut-off. Pozostała część warstwy w strefie zatłaczania stanowi połączenie z pozostałymi warstwami pliensbachu.

Modelowanie dynamiczne procesów zatłaczania CO₂ do składowiska struktury Niecki Poznańskiej (INiG; Petrel/Eclipse)

(Andrzej Gołąbek, Wiesław Szott, Piotr Łętkowski, Krzysztof Miłek, Andrzej Rychlicki)

W ramach niniejszej pracy dokonano implementacji statycznego (geologicznego) modelu struktury Niecki i konstrukcji pełnoskalowego (o wymiarach ok. 18.9 km × 41.3 km), trójwymiarowego modelu złożowego tej struktury (w kompleksie skał czerwonego spągowca). Model geologiczny struktury uzupełniono o elementy niezbędne do przeprowadzenia wielowariantowych i długoczasowych symulacji eksploatacji złoża z równoczesną sekwestracją dwutlenku węgla tj. własności transportowe w układzie skała-płynы złożowe, termodynamiczne własności płynów złożowych i ich wzajemne oddziaływanie.

Celem pracy było zweryfikowanie możliwości wykorzystania struktury dla potrzeb sekwestracji dwutlenku węgla oraz zbadanie efektów wypierania metanu rozpuszczonego w solankach przez zatłaczany dwutlenek węgla.

W pracy przedstawiono prognozy sekwestracji CO₂ według następujących scenariuszy:

1. wariant z zatłaczaniem 300 tys. Nm³ CO₂ na dobę przez 50 lat 3 odwiertami z rejonu złóż: Sątopy i Paproć,
2. wariant z zatłaczaniem 700 tys. Nm³ CO₂ na dobę przez 50 lat 7 odwiertami z rejonu złóż: Sątopy, Bukowiec, Paproć i Kopanki.

W obu przypadkach symulowano również zachowanie się płynów złożowych w okresie relaksacji tj. 300 lat po zakończeniu zatłaczania.

W pracy przedstawiono analizę wpływu zatłaczania CO₂ do solanki na proces wypierania i migracji metanu naturalnie rozpuszczonego w wodach Niecki. W pracy wykorzystano narzędzia programistyczne do modelowania i symulacji z pakietów Petrel i Eclipse 300 firmy GeoQuest Schlumberger.

Budowa modelu symulacyjnego utworów czerwonego spągowca w omawianym rejonie Niecki Poznańskiej

Model symulacyjny omawianego rejonu niecki Poznańskiej skonstruowano w oparciu o model geologiczny zbudowany w ramach zadania 1.1.15. W celu skrócenia czasu obliczeń symulacyjnych zawężono obszar modelu geologicznego do obszaru obejmującego główne złoża gazu ziemnego znajdujące się w omawianym rejonie Niecki Poznańskiej (Fig. 1.1.16_149). Wyłączone z modelu symulacyjnego obszary nie mają wpływu na CO₂ składowany w wybranej części struktury.

Własności PVT płynów złożowych

Płyny złożowe obecne w omawianej strukturze to gaz ziemny oraz woda złożowa. Średni skład chemiczny gazu ziemnego wyliczony w oparciu o analizy próbek pobranych z kilku otworów (ze złoża Grodzisk) podano w Tab. 1.1.16_20. Ze względu na kompozycyjny charakter przygotowywanego modelu symulacyjnego przy użyciu programu PVTsim wygenerowano parametry równania stanu Penga-Robinsona, które przedstawiono w Tab. 1.1.16_21. Z potrzeby ograniczenia złożoności systemu płynów pogrupowano cięższe składniki węglowodorowe tj. C₂ i cięższe i zastąpiono je pseudo-składnikiem C₂₊. Parametry równania podano również dla H₂O i NaCl, ponieważ wymaga tego moduł uwzględniający rozpuszczalność gazu w wodzie. W równaniu stanu nie uwzględniono natomiast helu z powodu nieznaczącej jego obecności w składzie chemicznym omawianego gazu ziemnego.

Własności wody złożowej przyjęto na podstawie danych pochodzących ze złoża Grodzisk oraz wyniku kalibracji ciśnień początkowych panujących w złożach znajdujących się w omawianym rejonie. Założone własności solanki w warunkach złożowych tj. T_{zi}=97 °C, P_{zi}=30,8 MPa to:

- gęstość: $\rho_w=1205 \text{ kg / Nm}^3$,
- współczynnik objętościowy: $B_w=1.011 \text{ m}^3 / \text{m}^3$,
- ściśliwość: $c_w=4.50\text{E}-05$,
- lepkość: 0.66 cP

Własności transportowe w systemie płyny-skała złożowa

Oddziaływanie gazu i wody złożowej ze skałą scharakteryzowano poprzez podanie krzywych przepuszczalności względnych, k_{rg} i k_{rw} oraz krzywej ciśnień kapilarnych, P_{cgw} .

Dla przepuszczalności względnych, wobec braku odpowiednich pomiarów, użyto korelacji typu Coreya, postaci:

$$k_{rw} = (S_w^*)^2$$

$$k_{rg} = k_{rg,max} (S_g^*)^2$$

gdzie: zredukowane nasycenie wodą

$$S_w^* = \frac{S_w - S_{w, \min}}{1 - S_{w, \min}}$$

S_w – nasycenie wodą,

$S_{w, \min}$ – minimalne nasycenie wodą,

$S_{w, \min} = S_{wi}$ – nieredukowalne nasycenie wodą

$k_{rg, \max}$ – maksymalna przepuszczalność względna dla gazu

oraz zredukowane nasycenie gazem:

$$S_g^* = \frac{S_g - S_{gr}}{1 - S_{w, \min} - S_{gr}}$$

gdzie: S_{gr} – rezydualne nasycenie gazem

Użyte korelacje przedstawiono na **Fig. 1.1.16_150**.

Dla ciśnień kapilarnych natomiast przyjęto krzywą dla czerwonego spągowca występującego w rejonie złoża Grodzisk.

Rozpuszczalność gazów w wodzie

Dla poprawnego modelowania procesów zachodzących podczas składowania CO₂ w modelu symulacyjnym omawianego fragmentu Niecki Poznańskiej uwzględniono zarówno rozpuszczalność dwutlenku węgla jak i pozostałych komponentów zawartych w składzie gazu ziemnego. Wartości rozpuszczalności założono w oparciu o dane laboratoryjne wykonane w laboratorium PVT Instytutu Nafty i Gazu. W **Tab. 1.1.16_22** przedstawiono zmierzone w laboratorium rozpuszczalności gazu w wodzie. Zarówno woda złożowa jak i użyty w badaniach gaz ziemny pochodzą z modelowanego regionu Niecki Poznańskiej (próbki pobrane z odwiertów: Ujazd-15 i Porażyn-2a). Po uwzględnieniu zmian rozpuszczalności wraz ze zmianą ciśnienia i temperatury w modelu symulacyjnym w warunkach złożowych, tj. $T_{zi} = 97^\circ\text{C}$ i $P_{zi} = 30,8 \text{ MPa}$ założono:

- rozpuszczalność metanu: $R_{s, C_1} = 1.89 \text{ Nm}^3/\text{m}^3$,
- rozpuszczalność dwutlenku węgla: $R_{s, CO_2} = 16.50 \text{ Nm}^3/\text{m}^3$.

Rozpuszczalność azotu natomiast zgodnie z literaturą założono na poziomie kilkakrotnie mniejszym od rozpuszczalności metanu.

Przed rozpoczęciem kalibracji modelu symulacyjnego omawianej struktury, w celu uzyskania równowagi hydrodynamicznej w złożach, założono nasycenie wody złożowej gazem ziemnym według obliczonych rozpuszczalności.

Tab. 1.1.16_20 Struktura Niecki Poznańskiej. Skład chemiczny gazu ziemnego

Składnik	% obj.
CH ₄	80.5150
C ₂ H ₆	0.5060
C ₂ H ₇	0.0250
i-C ₄ H ₁₀	0.0020
n-C ₄ H ₁₀	0.0020
i-C ₅ H ₁₂	0.0010
n-C ₅ H ₁₂	0.0008
C ₆ +	0.0010
N ₂	18.5422
CO ₂	0.2500
H ₂ S	0.0000
H ₂	0.0000
He	0.1550

Tab. 1.1.16_21 Struktura Niecki Poznańskiej
a) Parametry równania stanu PR, b) Współczynniki binarne

a)

Składnik	T _{kryt} [k]	P _{kryt} [MPa]	w	Mw	Z _{kryt}
N ₂	126.20	3.394	0.0400	28.0135	0.29
CO ₂	304.20	7.376	0.2250	44.0098	0.27
C ₁	190.60	4.600	0.0080	16.0429	0.29
C ₂	305.40	4.884	0.0980	30.0698	0.28
NaCl	700.00	3.550	1.0000	58.0000	0.29
H ₂ O	647.30	22.120	0.3434	18.0000	0.29

b)

Składnik	N ₂	CO ₂	C ₁	C ₂	NaCl	H ₂ O
N ₂	-	-	-	-	-	-
CO ₂	-0.0315	-	-	-	-	-
C ₁	0.0278	0.1200	-	-	-	-
C ₂	0.0407	0.1200	0.0000	-	-	-
NaCl	2.0200	2.0100	2.0200	2.0200	-	-
H ₂ O	0.4850	0.1986	0.4850	0.4920	-0.2169	-

Tab. 1.1.16_22 Struktura Niecki Poznańskiej. Wyniki badań rozpuszczalności gazów złożowych z odwiertów Ujazd-15 i Porążyn-2a oraz CO₂ w solankach złożowych i wodzie destylowanej

Układ	Gaz - Ujazd-15 Solanka - Ujazd-15		Gaz - Porążyn-2a Solanka - Porążyn-2a		CO ₂ Solanka - Porążyn 2a		CO ₂ woda destylowana	Gaz – Porążyn-2a woda destylowana
	30	100	30	100	30	100	30	30
T [°C]	30	100	30	100	30	100	30	30
P [MPa]	Rozpuszczalność gazu w wodzie m³/m³							
40	2.44	2.12	2.58	2.35	21.20	18.50	39.88	5.16
30	2.02	1.82	2.06	1.92	20.30	16.80	38.99	4.55
20	1.61	1.45	1.64	1.55	18.50	14.70	36.61	3.80
10	0.87	0.73	0.91	0.86	16.70	9.20	33.43	2.21
5	0.49	0.42	0.50	0.47	12.20	5.10	24.43	1.24
0.1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

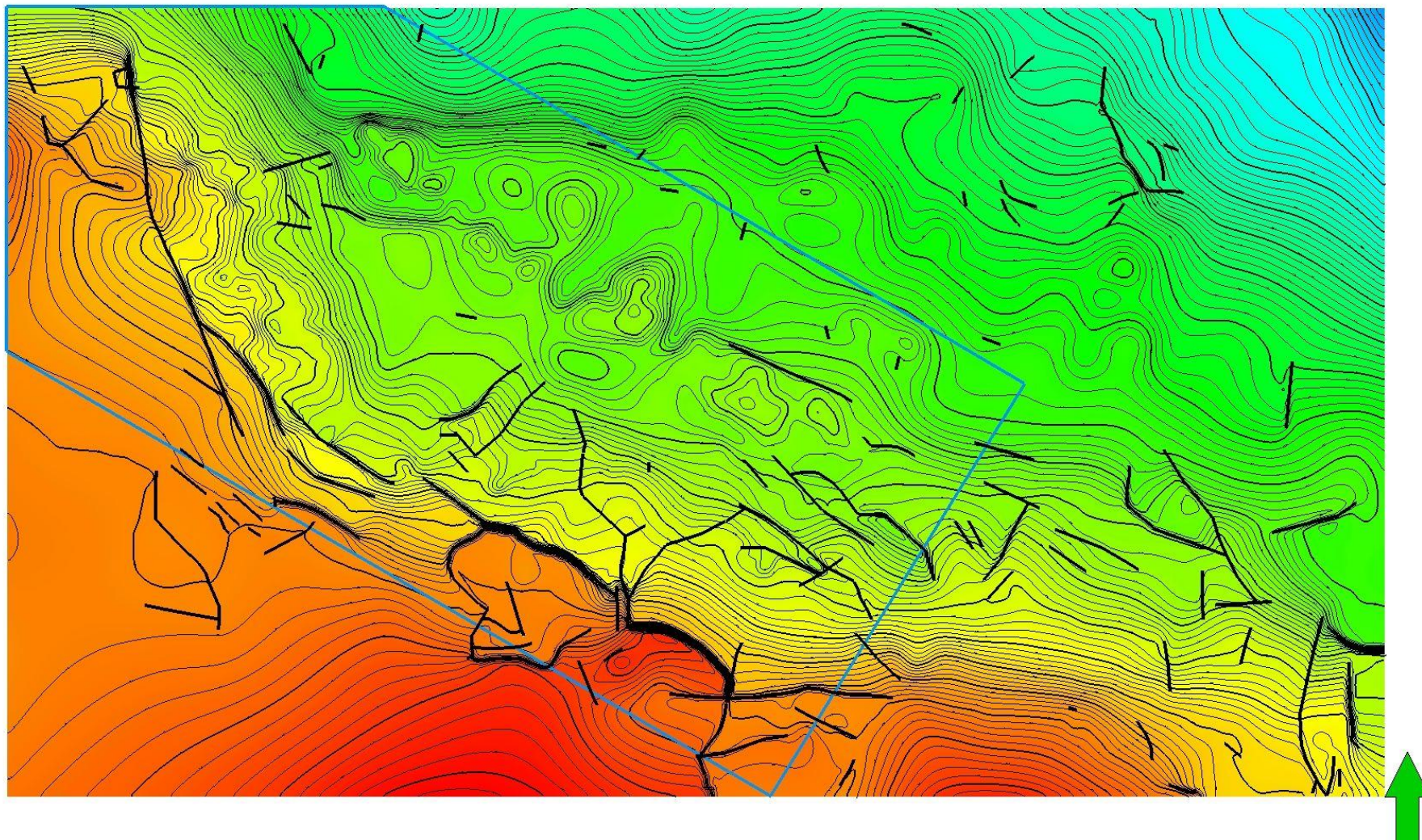


Fig. 1.1.16_149 Struktura Niecki Poznańskiej. Zwężenie obszaru obliczeń symulacyjnych

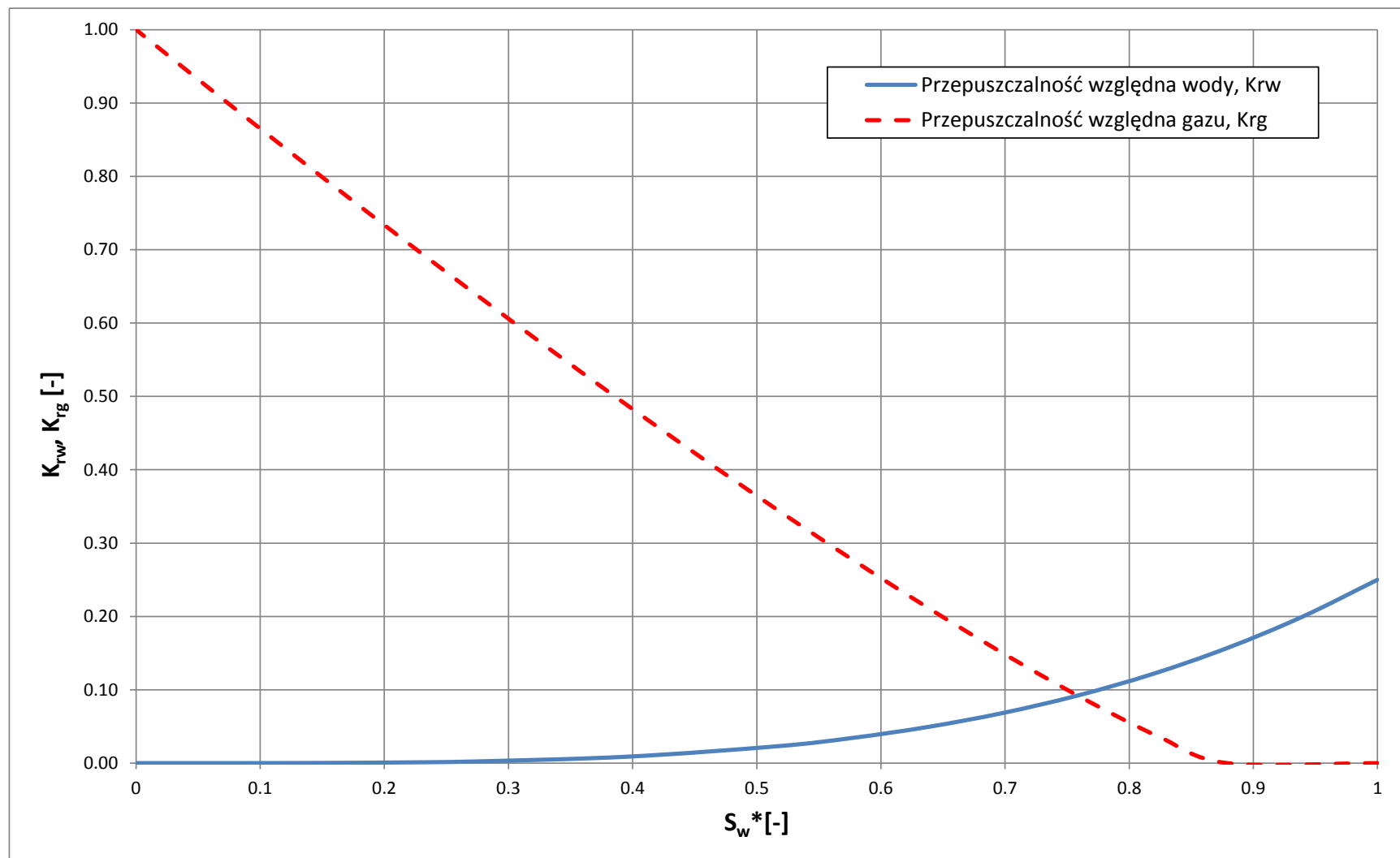


Fig. 1.1.16_150 Struktura Niecki Poznańskiej. Przepuszczalność względna wody, k_{rw} i gazu, k_{rg} , w funkcji zredukowanego nasycenia wodą S_w^*

Weryfikacja modelu symulacyjnego struktury

Model symulacyjny omawianego fragmentu Niecki Poznańskiej obejmuje siedem złóż gazu ziemnego (Bukowiec, Grodzisk, Kopanki elementy: W i E, Paproć, Porążyn, Sątopy, Ujazd), które odkrywano i eksploatowano w różnym czasie dlatego do weryfikacji modelu użyto danych eksploatacyjnych z okresów odpowiadających pracy poszczególnych złóż. Wykorzystane w modelu struktury dane w postaci miesięcznego wydobycia gazu, miesięcznego zatłaczania wody, czasu pracy odwiertów oraz ciśnień dennych statycznych (pomierzonych lub obliczonych z ciśnień głowicowych) obejmują prawie 34 lata eksploatacji struktury w okresie od 12.1978 do 08.2011r. Do odtworzenia historii eksploatacji poszczególnych złóż użyto danych z okresów:

- od 07.1979r do 12.2007r – złóż Bukowiec,
- od 12.1978r do 12.2003r – złóż Grodzisk,
- od 01.1979r do 10.2004r – złóż Kopanki,
- od 09.1985r do 04.2007r – złóż Paproć,
- od 01.1984r do 12.2007r – złóż Porążyn,
- od 06.1982r do 04.1992r – złóż Sątopy,
- od 11.1978r do 08.2011r – złóż Ujazd.

W pierwszym kroku kalibracji zbudowanego modelu symulacyjnego struktury odtworzono zatwierdzone zasoby geologiczne wyżej wymienionych złóż oraz panujące w nich ciśnienia początkowe. W kolejnym kroku natomiast kalibrowano model w celu uzyskania jak najlepszego dopasowania ciśnień dennych statycznych poszczególnych odwiertów eksploatacyjnych. Podczas kalibracji modelu symulacyjnego wprowadzono kilka zmian w modelu geologicznym oraz modyfikowano parametry dotyczące wydajności i czasu dopływu wody z akifera podścielającego złoża. Wprowadzone zmiany dotyczyły przede wszystkim nieznacznych zmian objętości porów w strefach gazonośnych, modyfikacji przewodności uskoków znajdujących się w strukturze oraz modyfikacji przebiegu krzywej przepuszczalności względnej dla wody w strefach wodonośnych.

Wyniki dopasowania modelu symulacyjnego struktury przedstawiono na **Fig. 1.1.16_151 - Fig. 1.1.16_186**. Omawiane figury przedstawiają wyniki kilku wybranych odwiertów poszczególnych złóż. Dotyczą one ciśnień panujących na spodzie tych odwiertów, uzyskanych w wyniku kalibracji, w porównaniu z danymi pomiarowymi (ciśnieniami dennymi statycznymi). Dla większości odwiertów eksploatacyjnych uzyskano dobrą jakość dopasowania ciśnień. Różnica pomiędzy ciśnieniami zmierzonymi a obliczonymi sięga maksymalnie kilku dziesiątych MPa, natomiast w większości przypadków wynosi ona mniej niż 0,3 MPa. Najlepiej odtworzono ciśnienia na spodzie odwiertów eksploatujących złóż Bukowiec (**Fig. 1.1.16_151 - Fig. 1.1.16_157**). W odwiertach wydobywających gaz ze złoża Paproć (**Fig. 1.1.16_168 - Fig. 1.1.16_180**) poprawnie dopasowano ciśnienia panujące w końcowych fazach ich eksploatacji oraz podczas odbudowy ciśnienia po zakończeniu pracy poszczególnych odwiertów. Poprawne odtworzenie odbudowy ciśnienia świadczy o dobrze dobranych parametrach akifera. Najgorzej zostało dopasowane ciśnienie panujące w jedynym odwiercie eksploatującym złóż Porążyn (**Fig. 1.1.16_181**). Miejscami duża rozbieżność bierze się z

błędów pomiarowych, widocznych w przyrostach ciśnienia pomimo względnie intensywnej eksploatacji złoża.

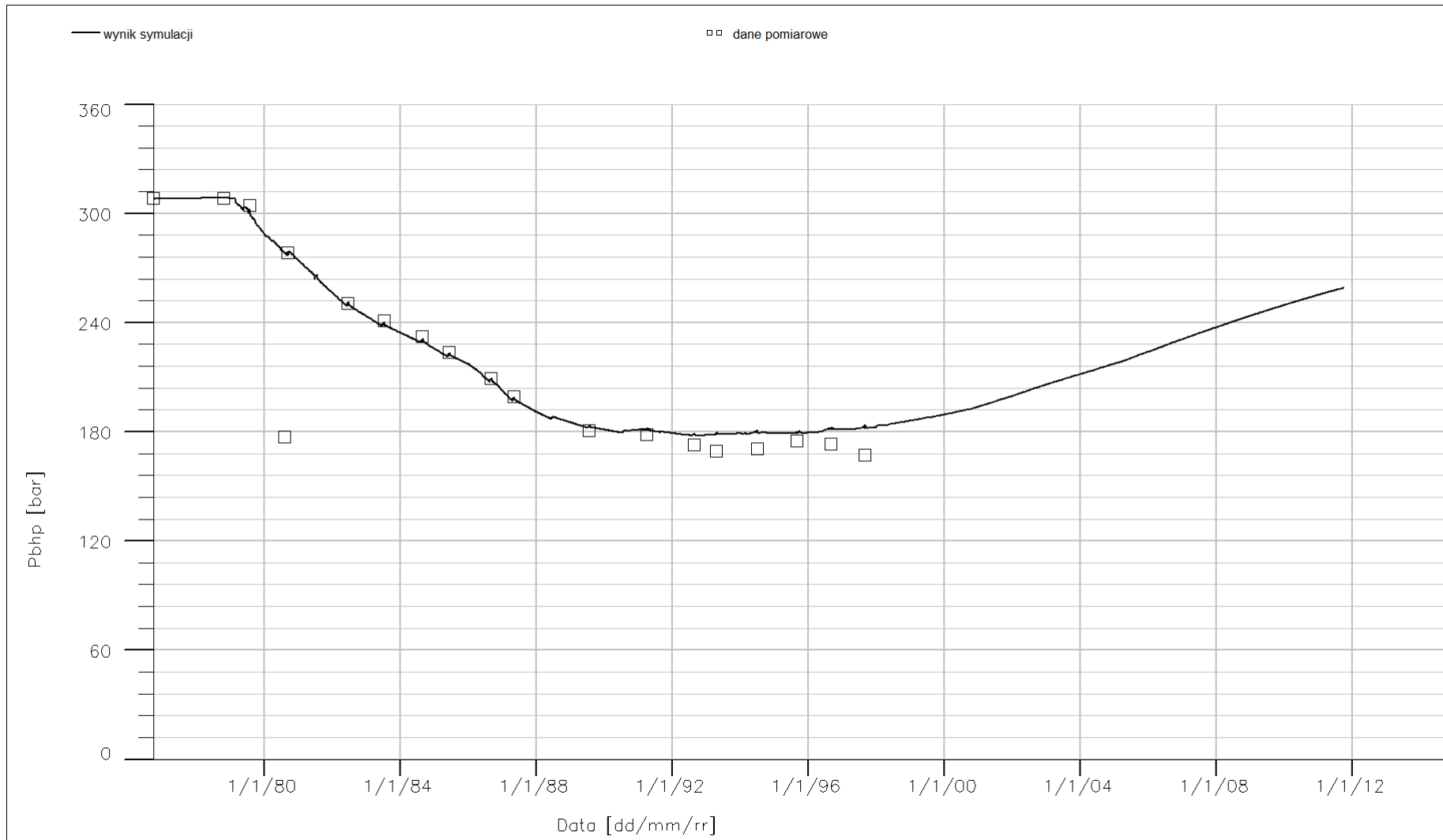


Fig. 1.1.16_151 Złoże Bukowiec. Odwiert B-1. Ciśnienie na spodzie odwiertu, P_{BHP}
16-160

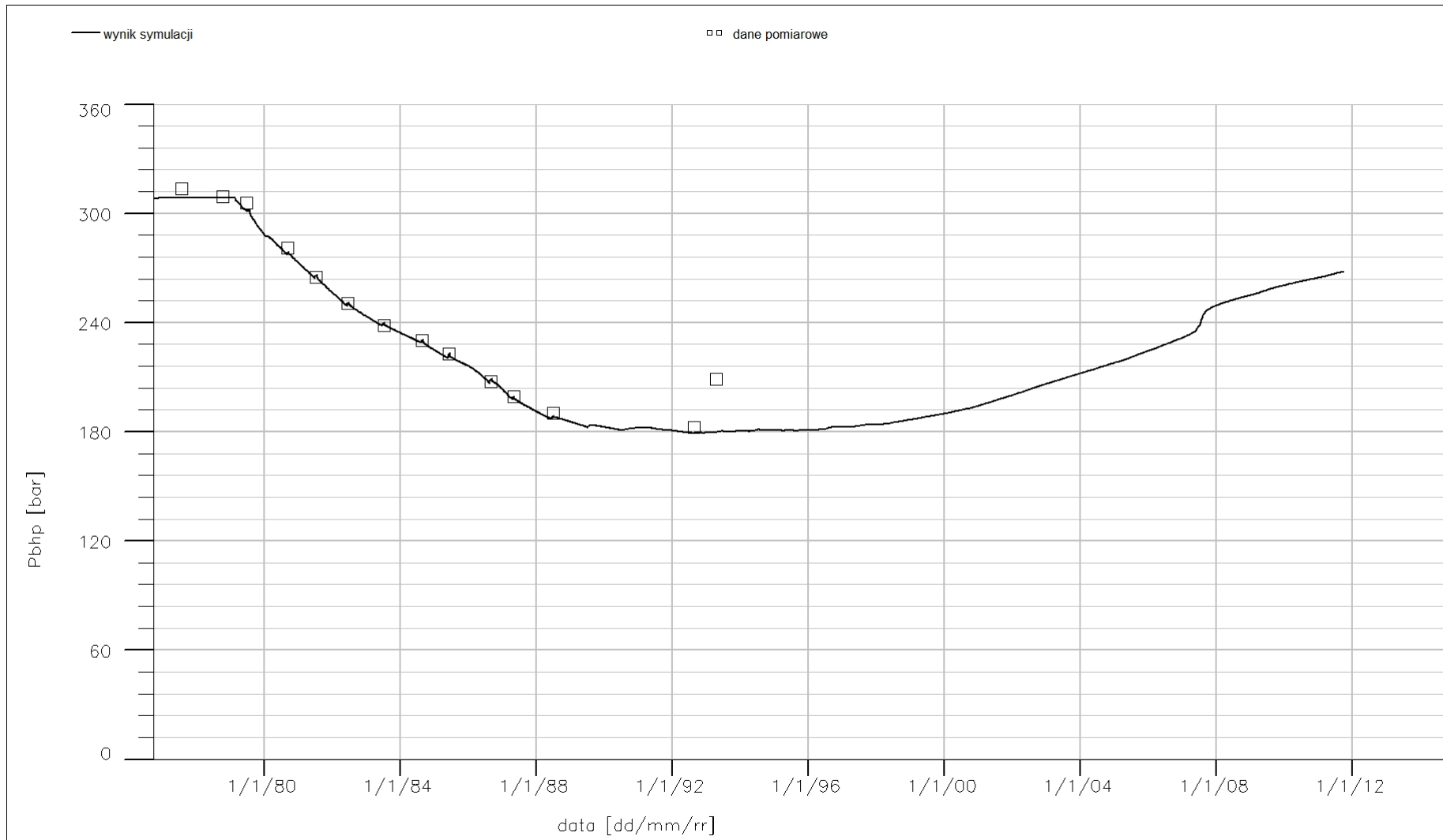


Fig. 1.1.16_152 Złoże Bukowiec. Odwiert B-3. Ciśnienie na spodzie odwiertu, P_{BHP}
16-161

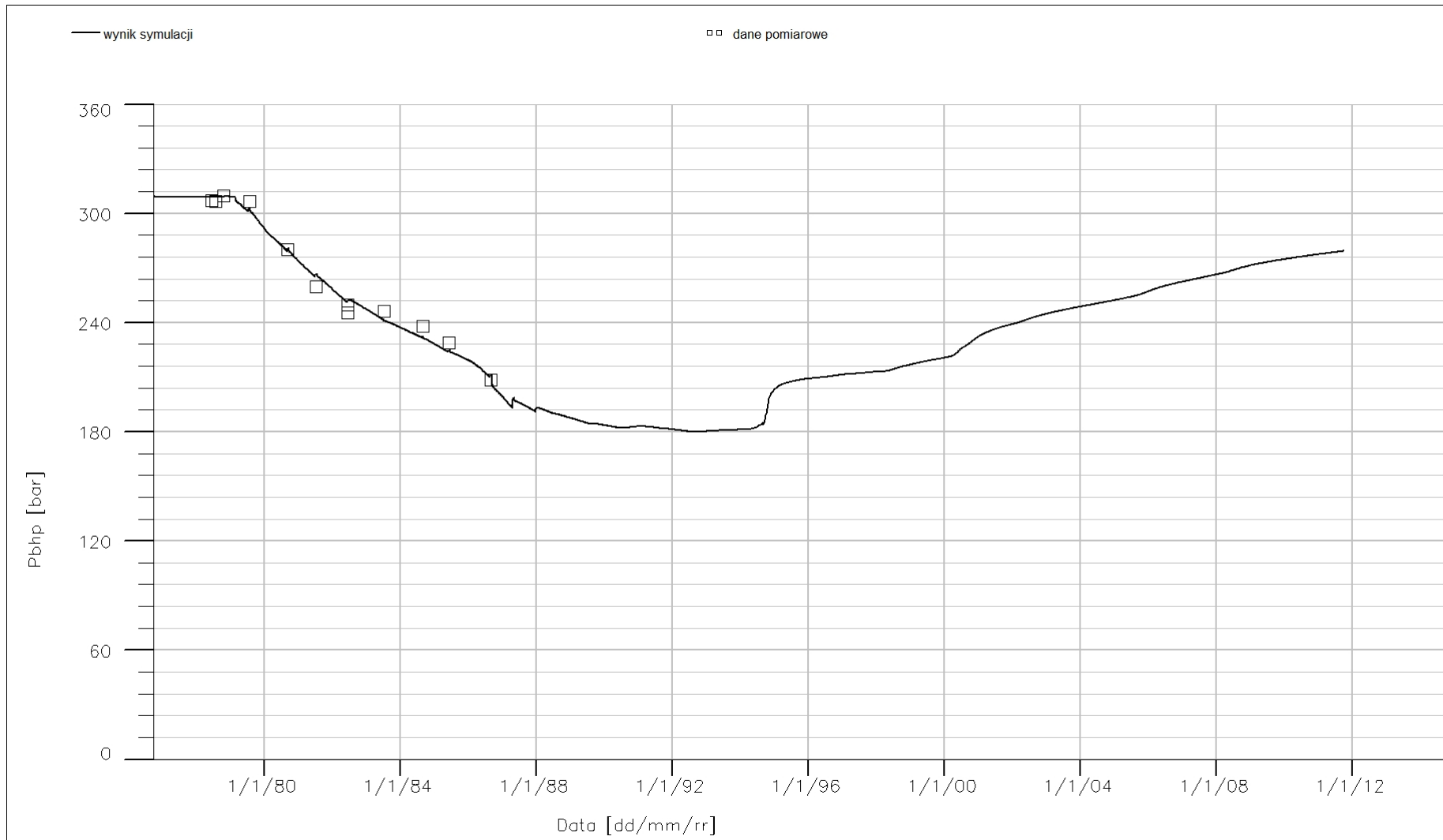


Fig. 1.1.16_153 Złoże Bukowiec. Odwiert B-8. Ciśnienie na spodzie odwiertu, P_{BHP}
16-162

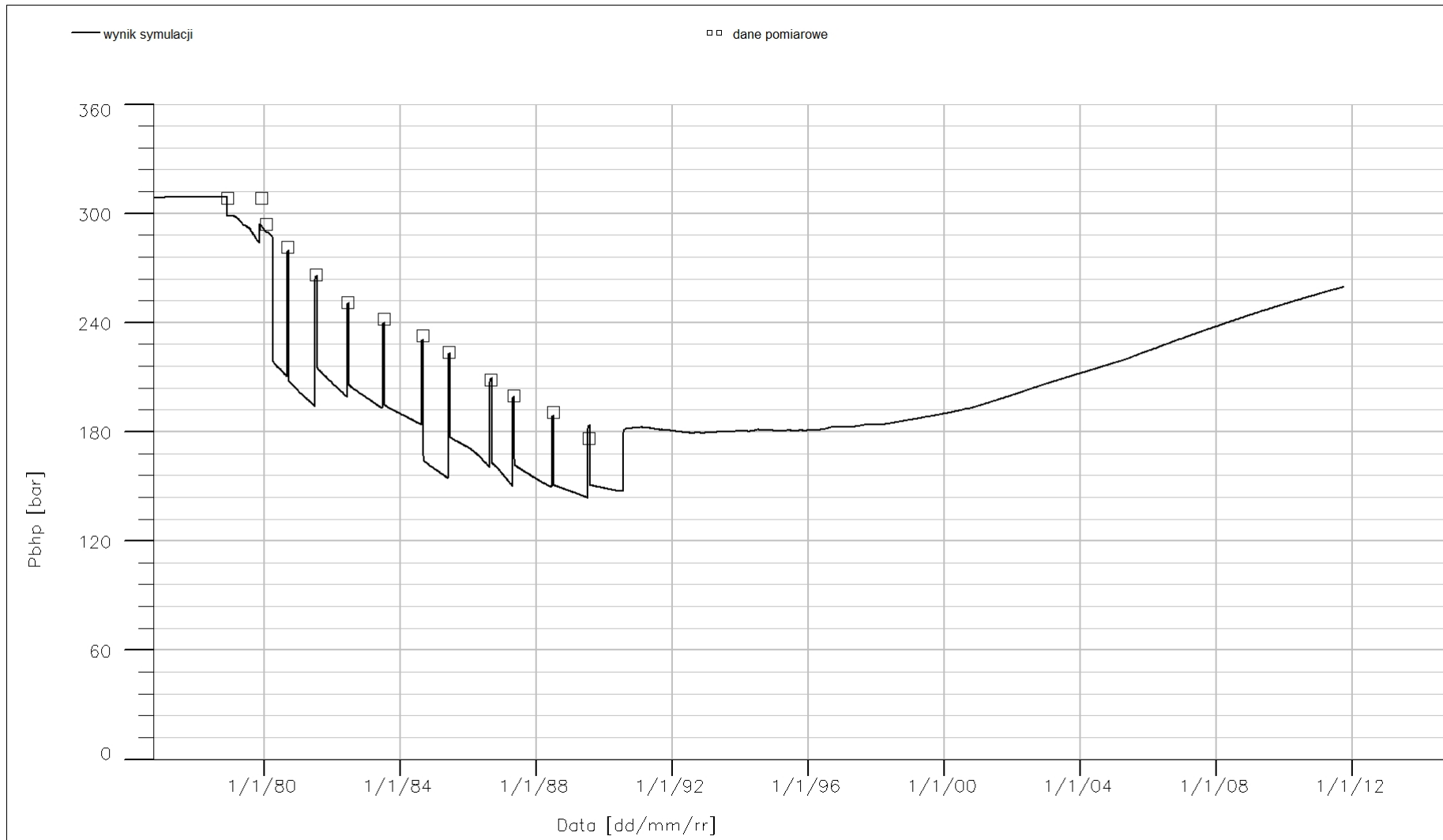


Fig. 1.1.16_154 Złoże Bukowiec. Odwiert B-21. Ciśnienie na spodzie odwiertu, P_{BHP}
16-163

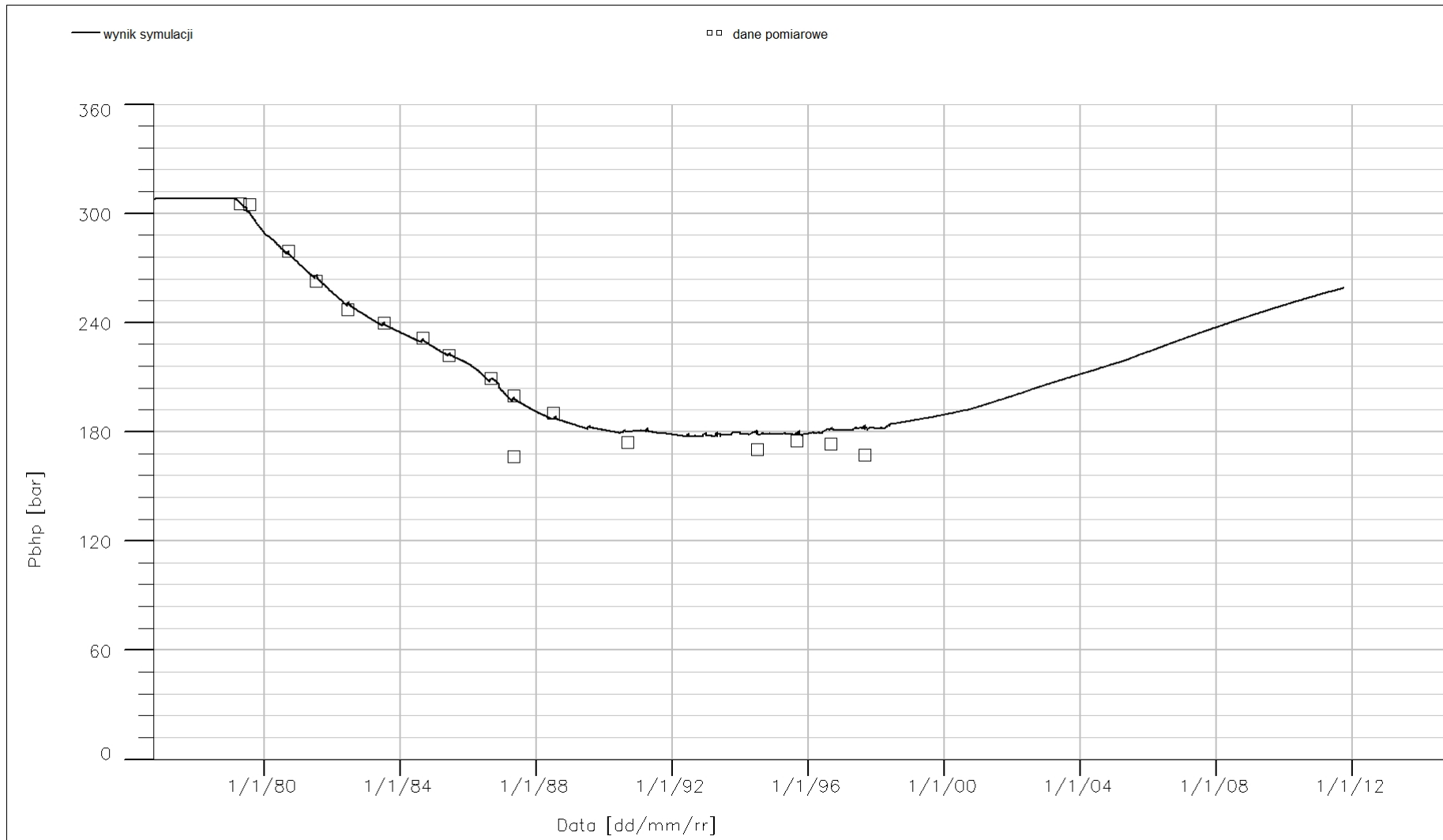


Fig. 1.1.16_155 Złoże Bukowiec. Odwiert B-22. Ciśnienie na spodzie odwiertu, P_{BHP}
16-164

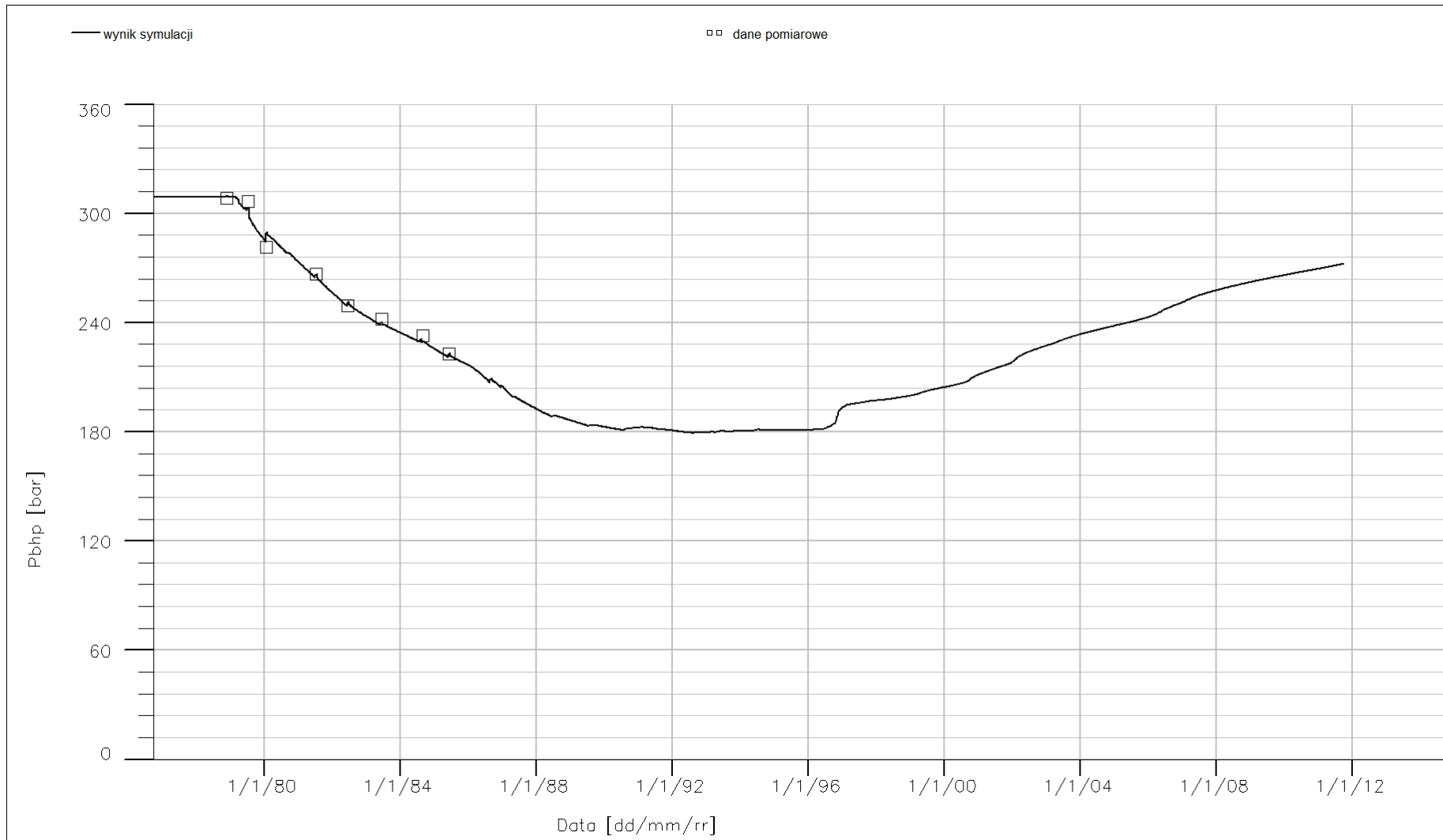


Fig. 1.1.16_156 Złoże Bukowiec. Odwiert B-23. Ciśnienie na spodzie odwiertu, P_{BHP}
16-165

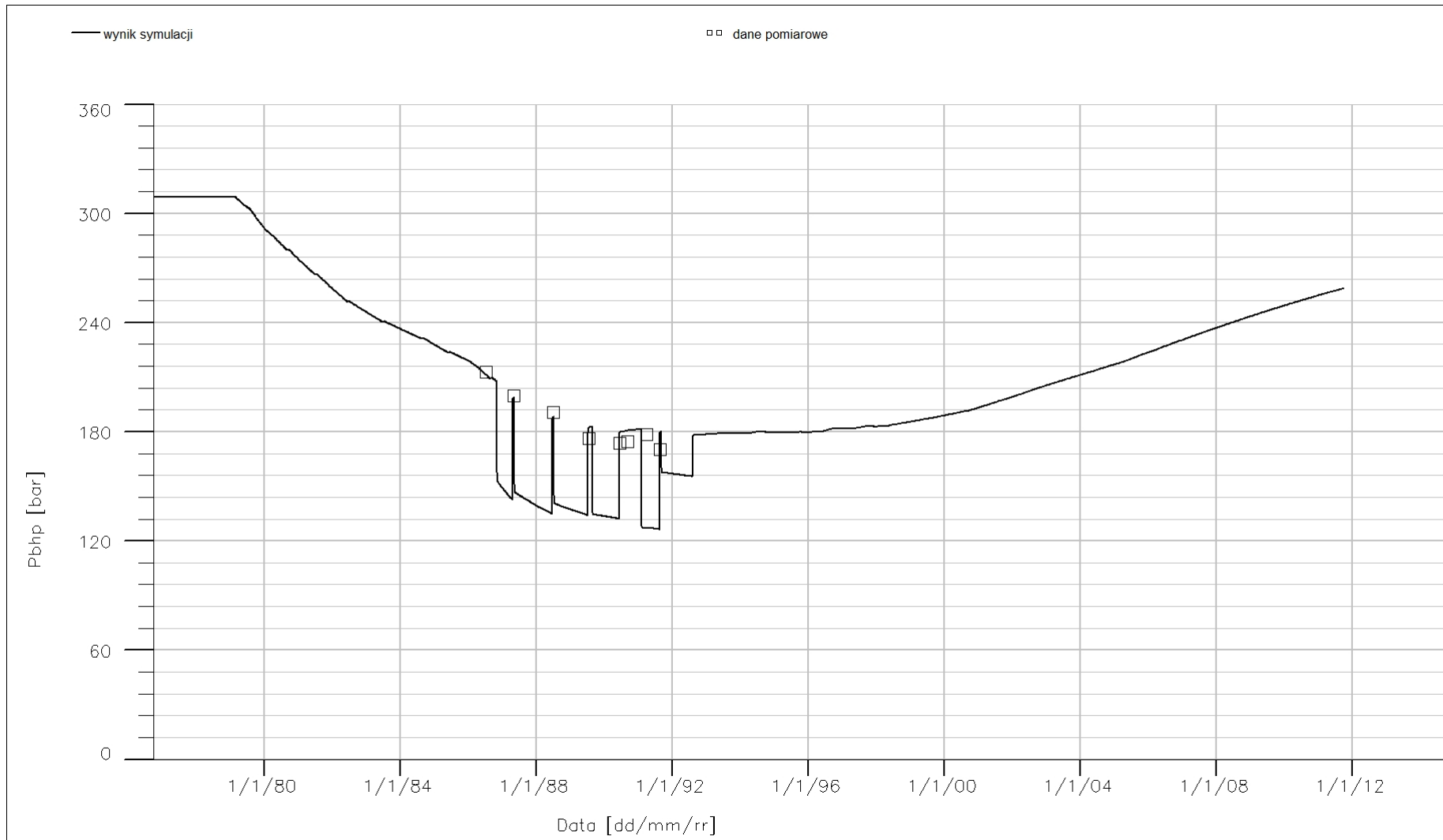


Fig. 1.1.16_157 Złoże Bukowiec. Odwiert B-25. Ciśnienie na spodzie odwiertu, P_{BHP}
 16-166

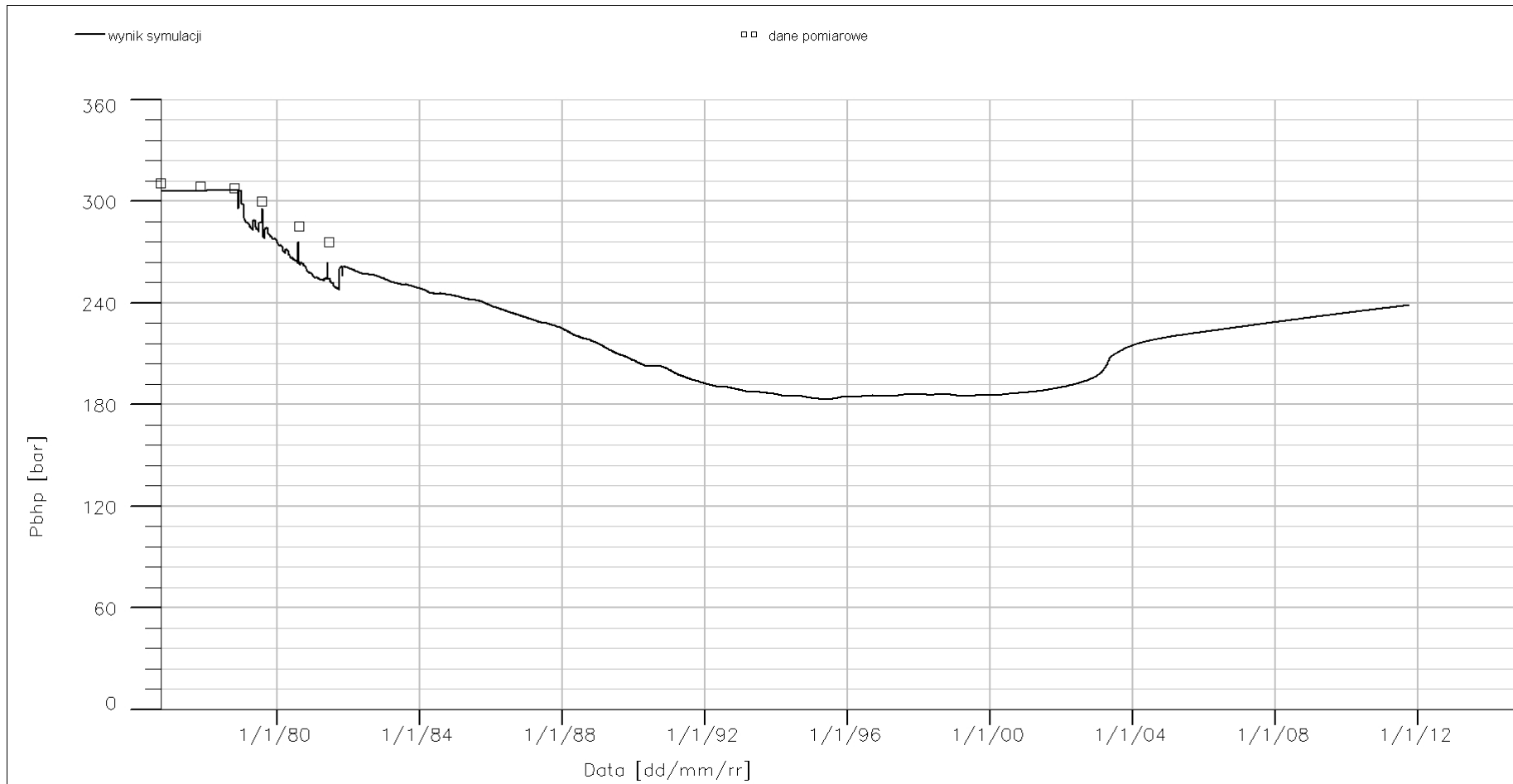


Fig. 1.1.16_158 Złoże Grodzisk. Odwiert G-1. Ciśnienie na spodzie odwiertu, P_{BHP}

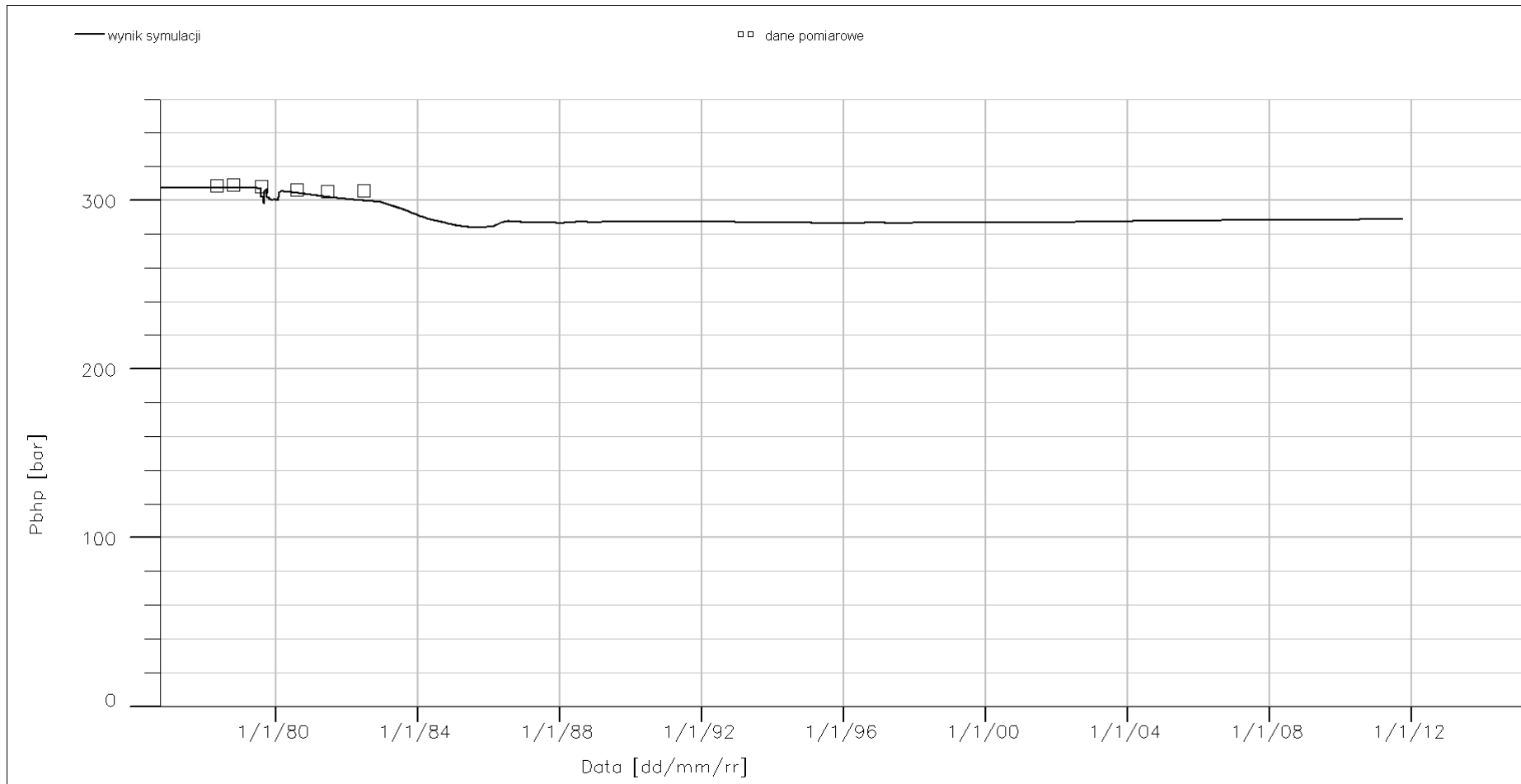


Fig. 1.1.16_159 Złoże Grodzisk. Odwiert G-13. Ciśnienie na spodzie odwiertu, P_{BHP}

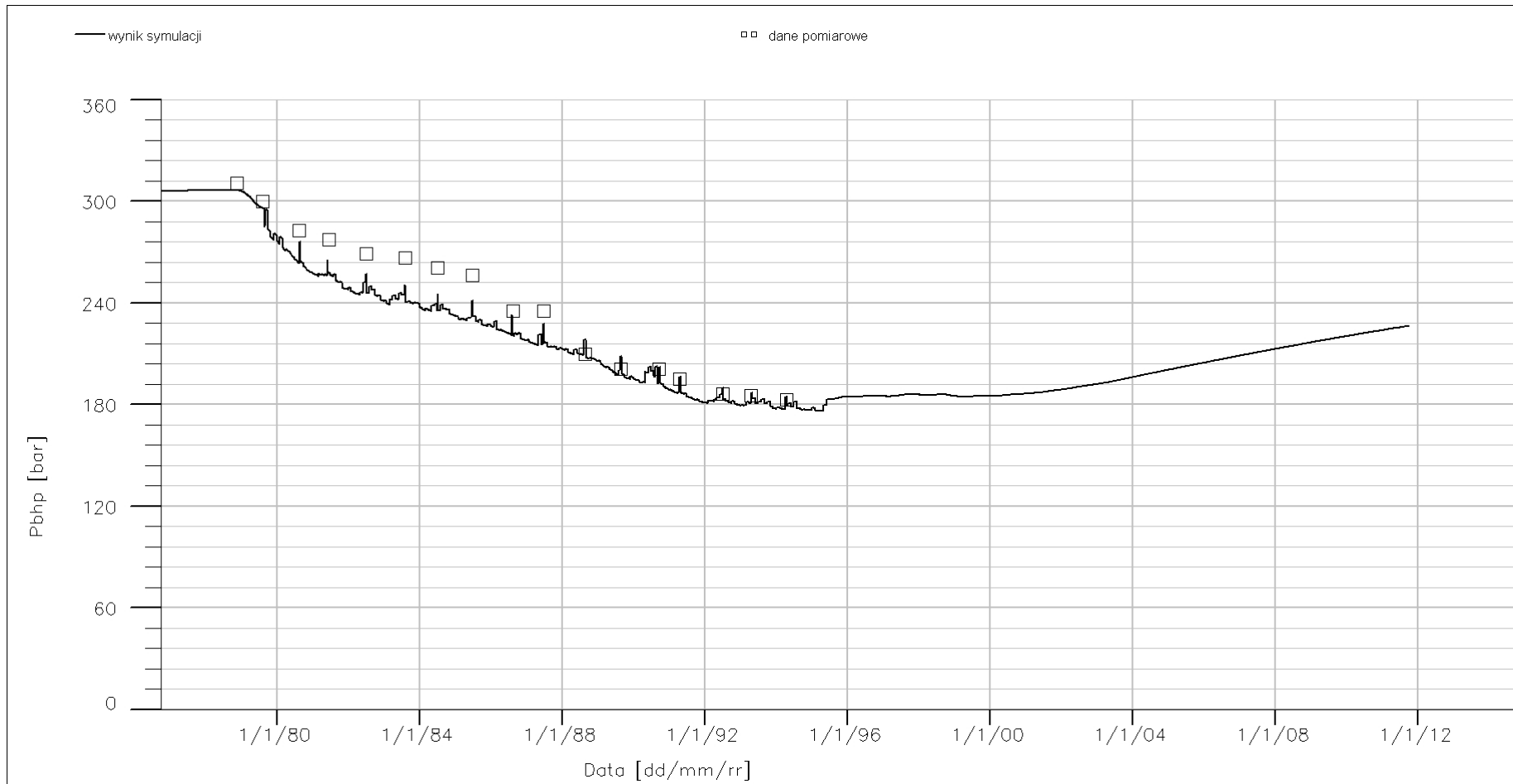


Fig. 1.1.16_160 Źłoże Grodzisk. Odwiert G-21. Ciśnienie na spodzie odwiertu, P_{BHP}

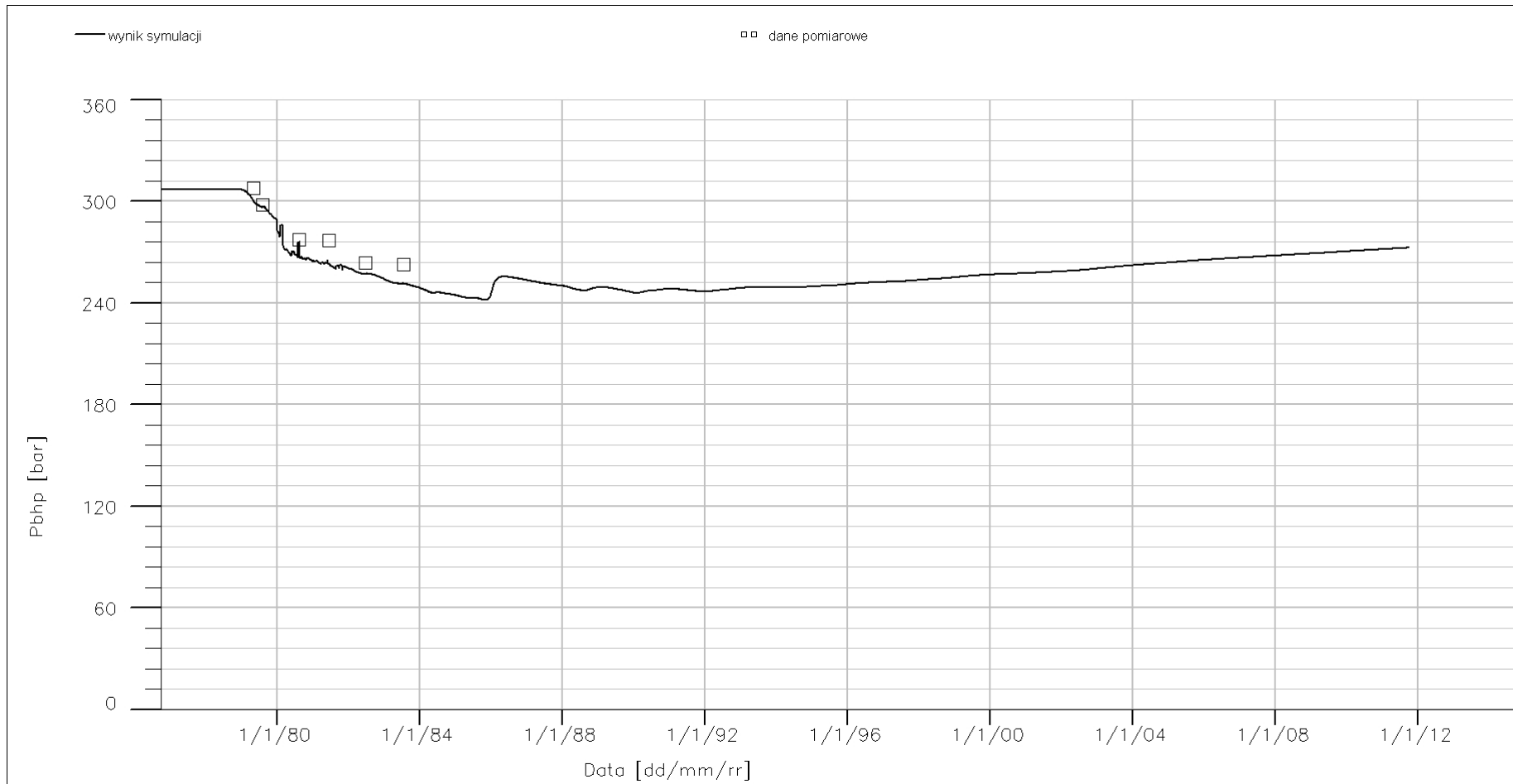


Fig. 1.1.16_161 Złoże Grodzisk. Odwiert G-25. Ciśnienie na spodzie odwiertu, P_{BHP}

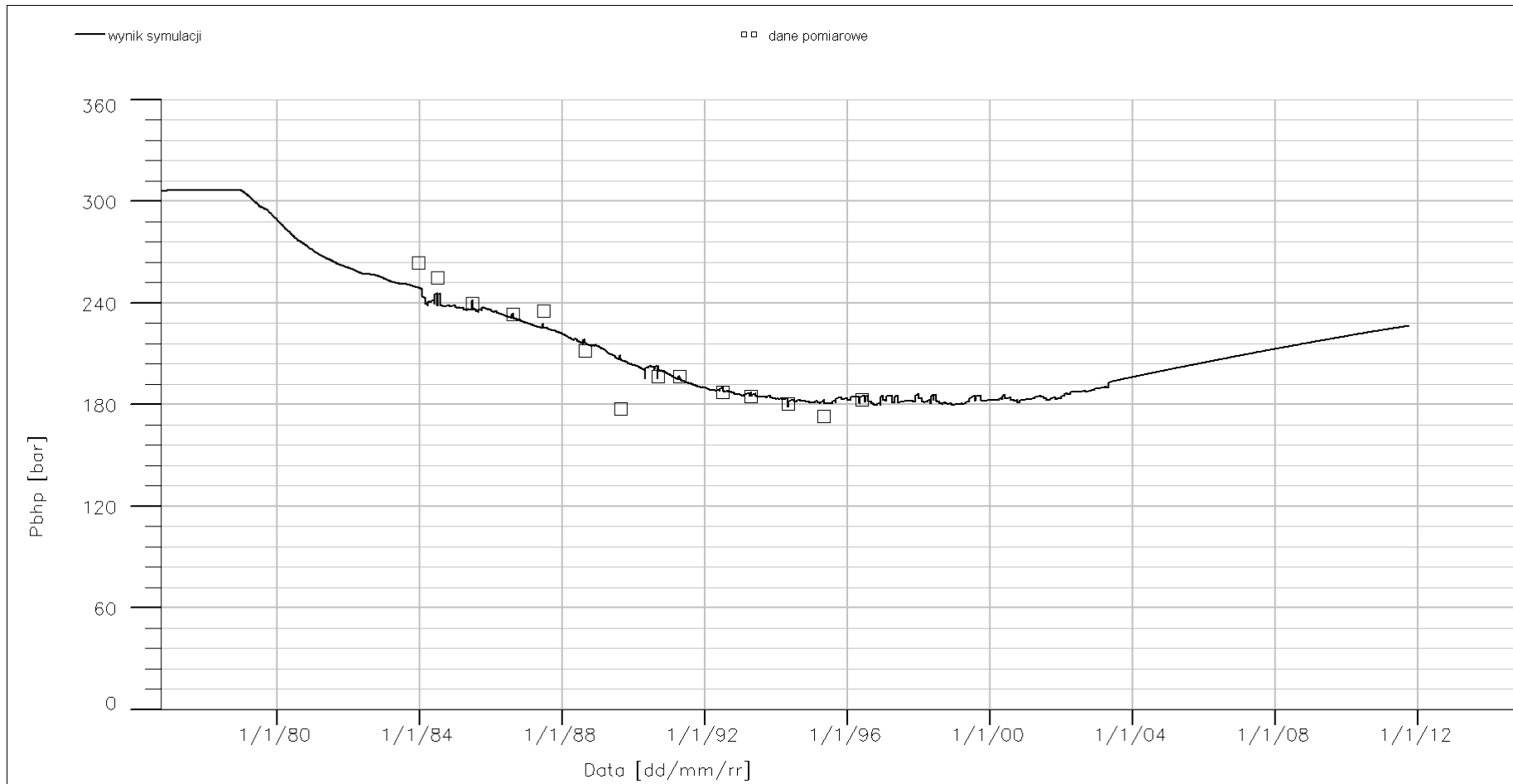


Fig. 1.1.16_162 Złoże Grodzisk. Odwiert G-26. Ciśnienie na spodzie odwiertu, P_{BHP}

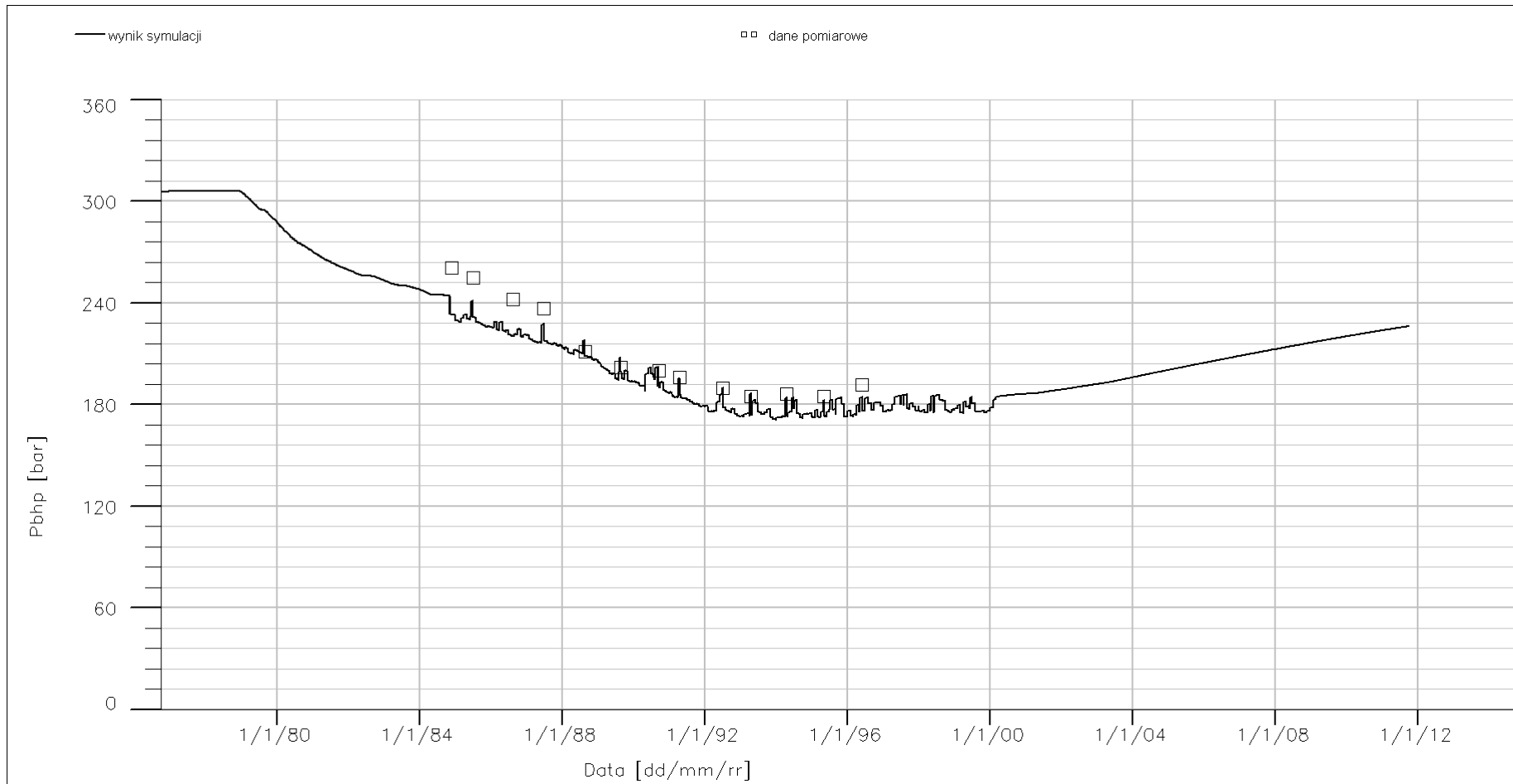


Fig. 1.1.16_163 Złoże Grodzisk. Odwiert G-27. Ciśnienie na spodzie odwiertu, P_{BHP}

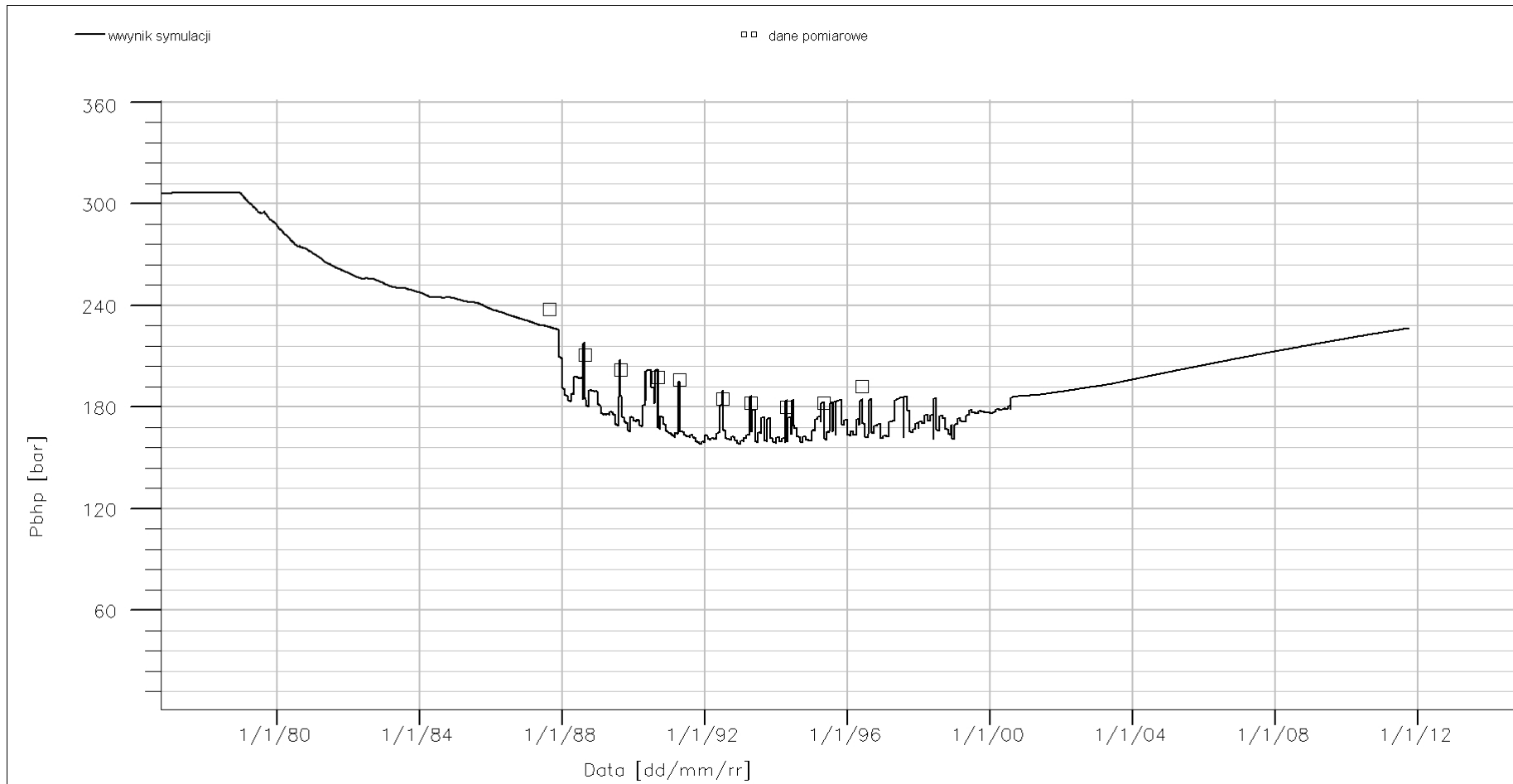


Fig. 1.1.16_164 Złoże Grodzisk. Odwiert G-30. Ciśnienie na spodzie odwiertu, P_{BHP}

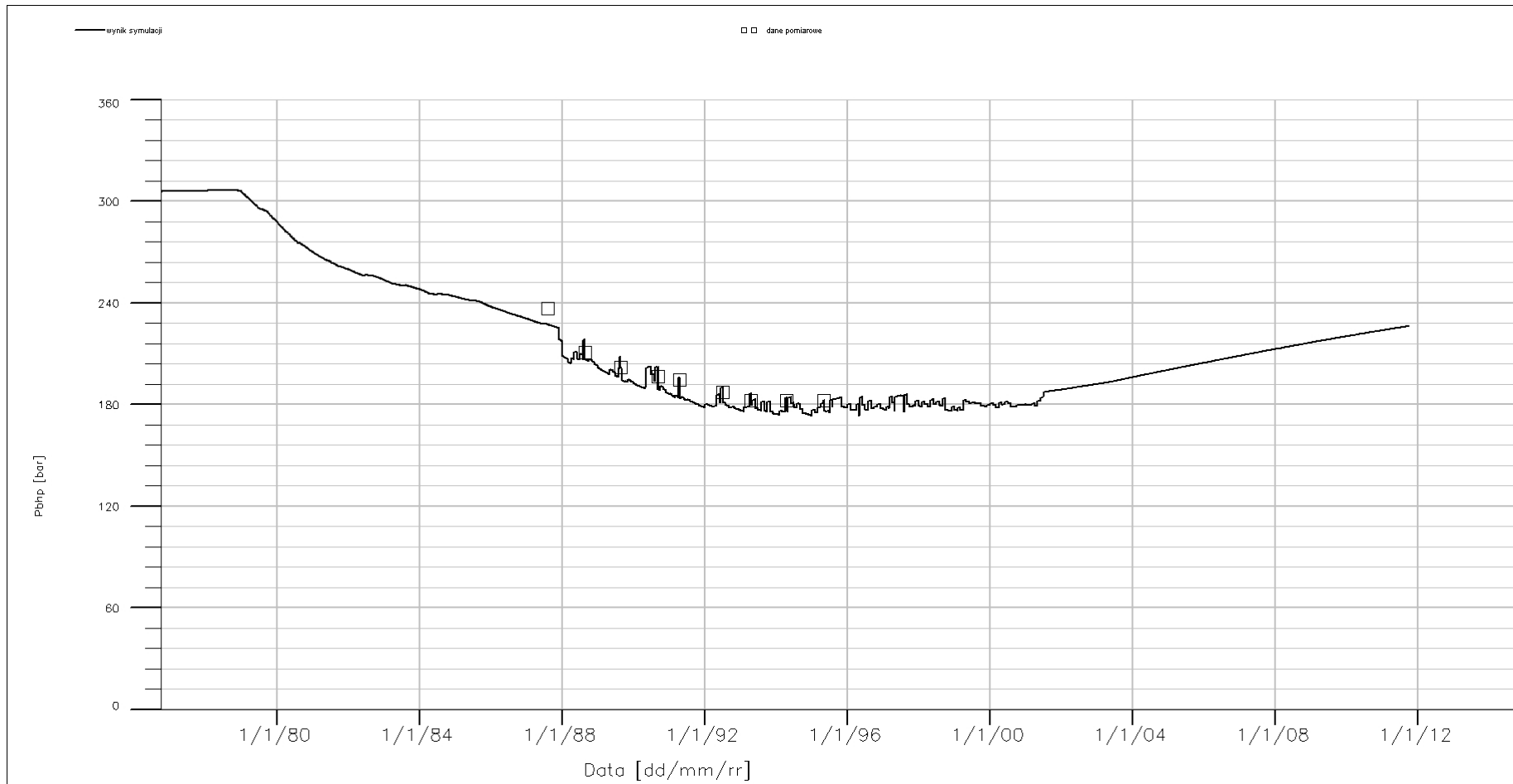


Fig. 1.1.16_165 Żłoże Grodzisk. Odwiert G-31. Ciśnienie na spodzie odwiertu, P_{BHP}

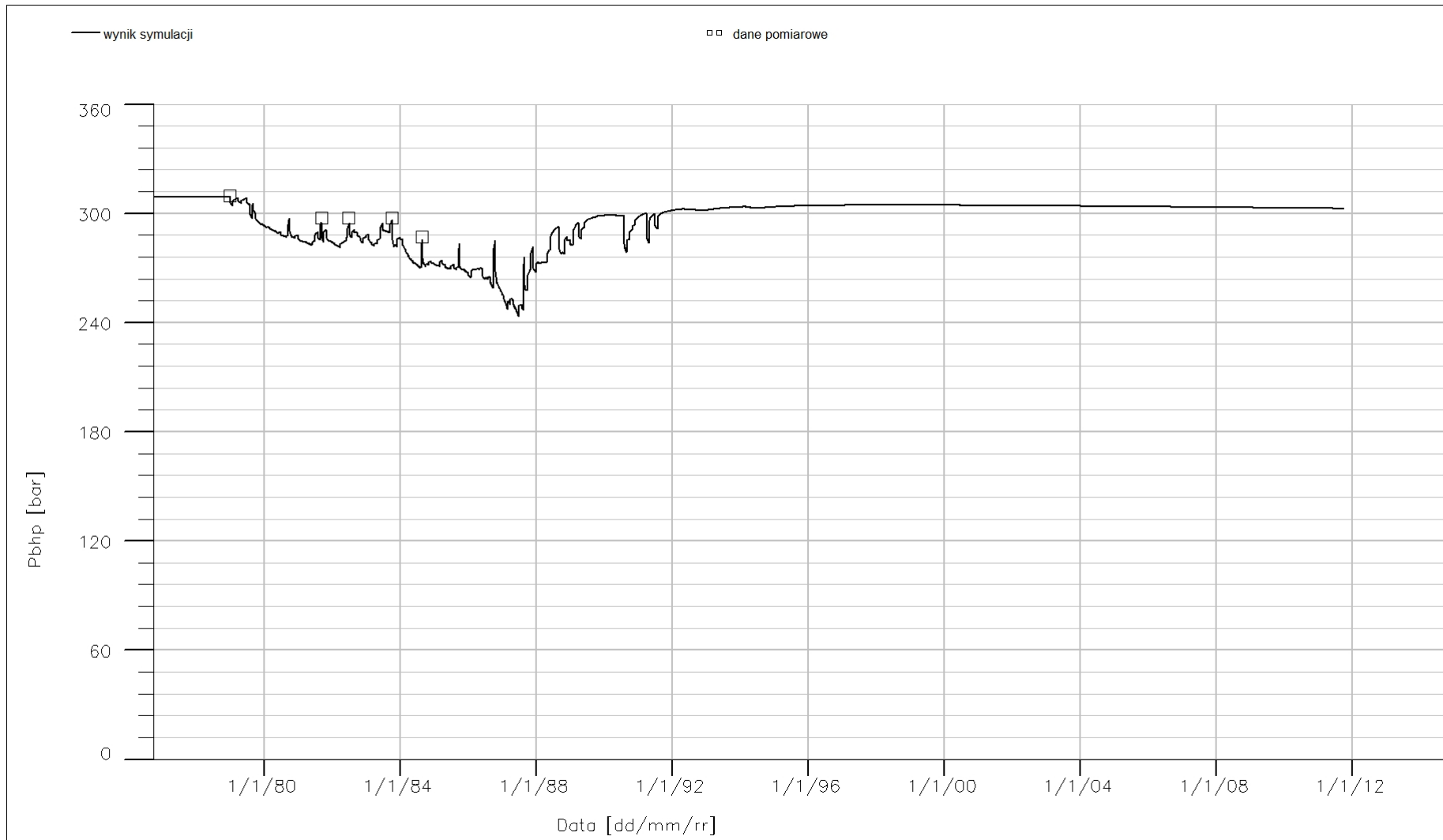


Fig. 1.1.16_166 Złoże Kopanki. Odwiert B-10. Ciśnienie na spodzie odwiertu, P_{BHP}
16-175

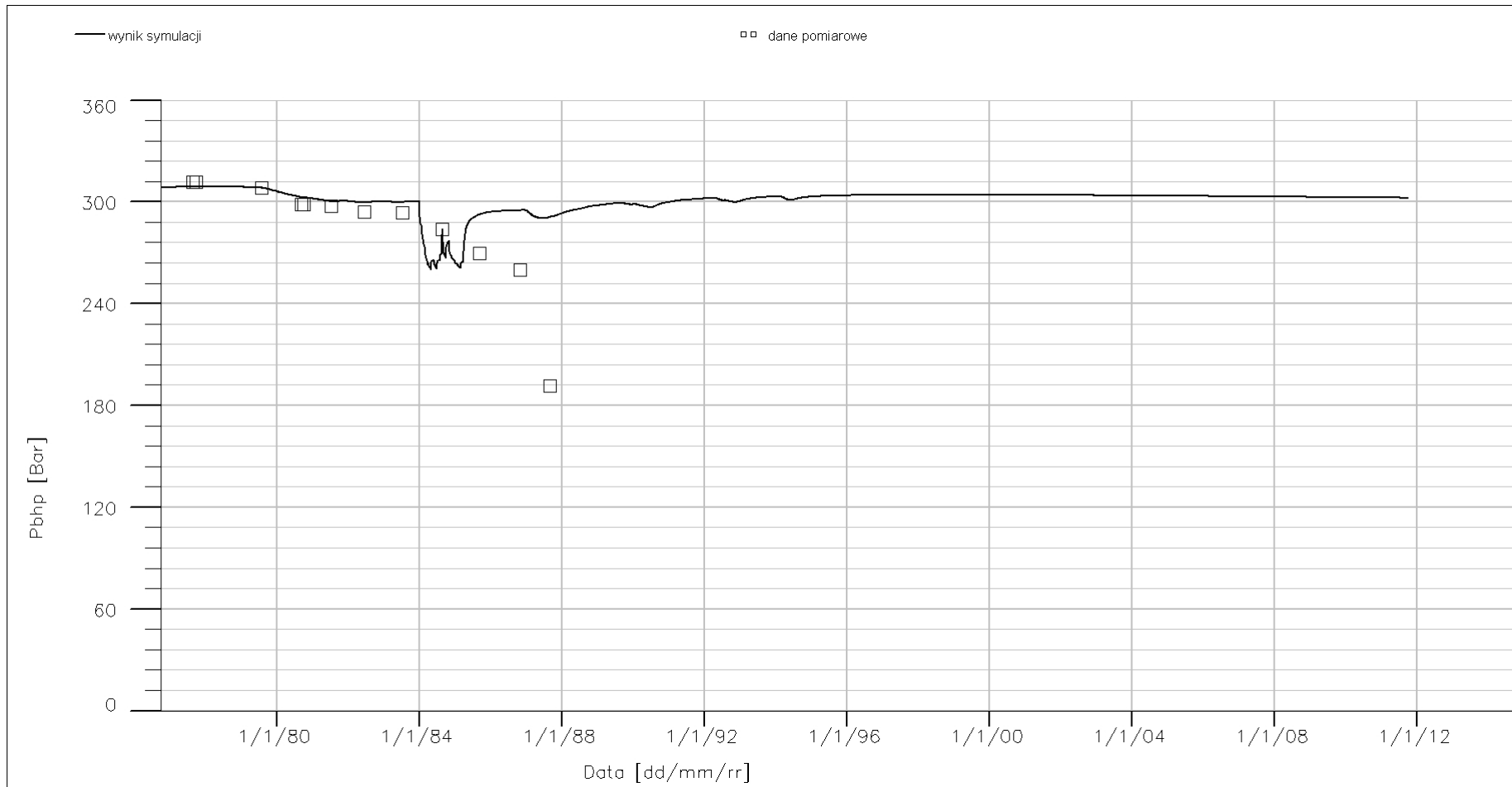


Fig. 1.1.16_167 Złoże Kopanki. Odwiert K-1. Ciśnienie na spodzie odwiertu, P_{BHP}

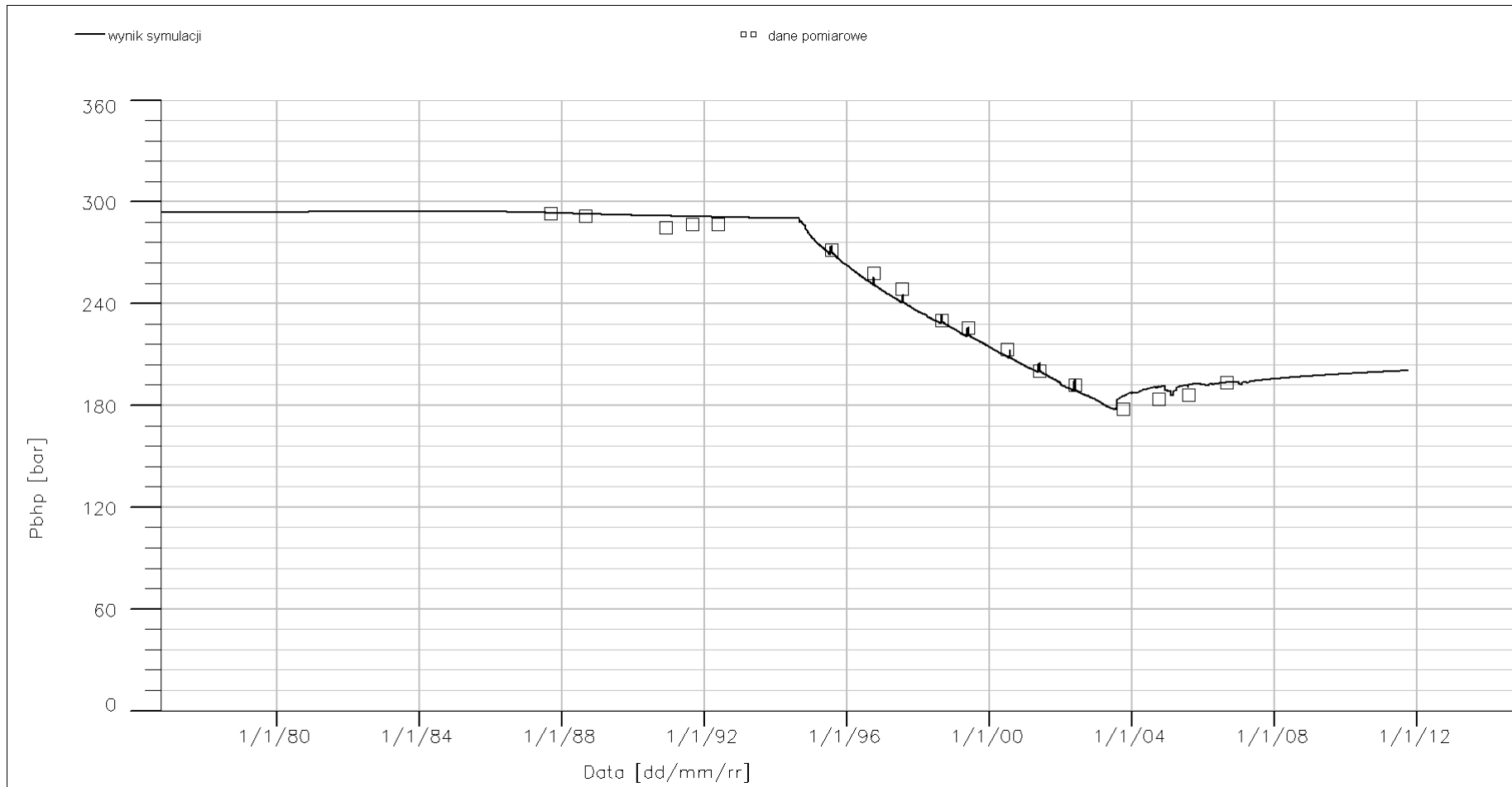


Fig. 1.1.16_168 Złoże Paproć. Odwiert Pa-9. Ciśnienie na spodzie odwiertu, P_{BHP}

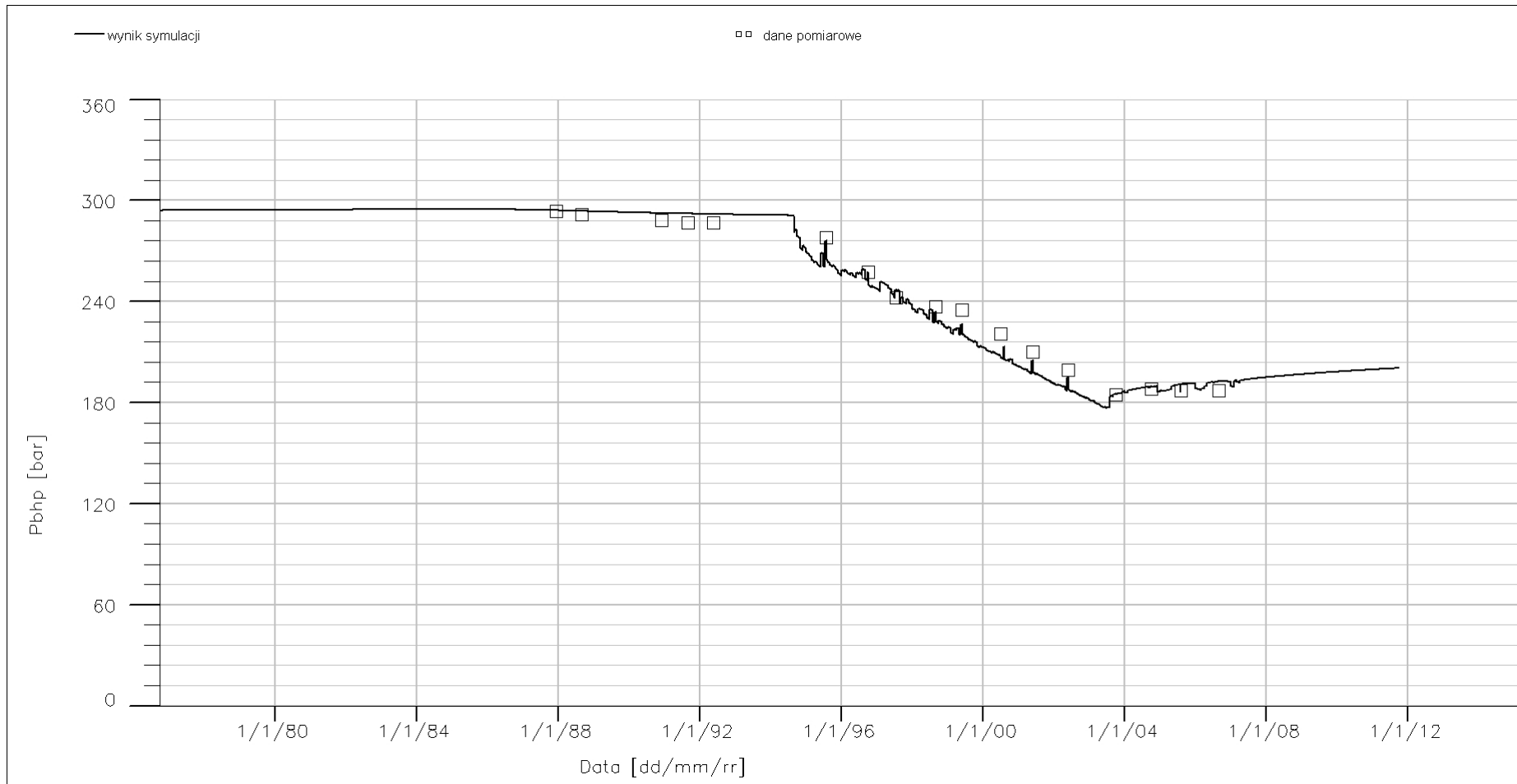


Fig. 1.1.16_169 Złoże Paproć. Odwiert Pa-11. Ciśnienie na spodzie odwiertu, P_{BHP}

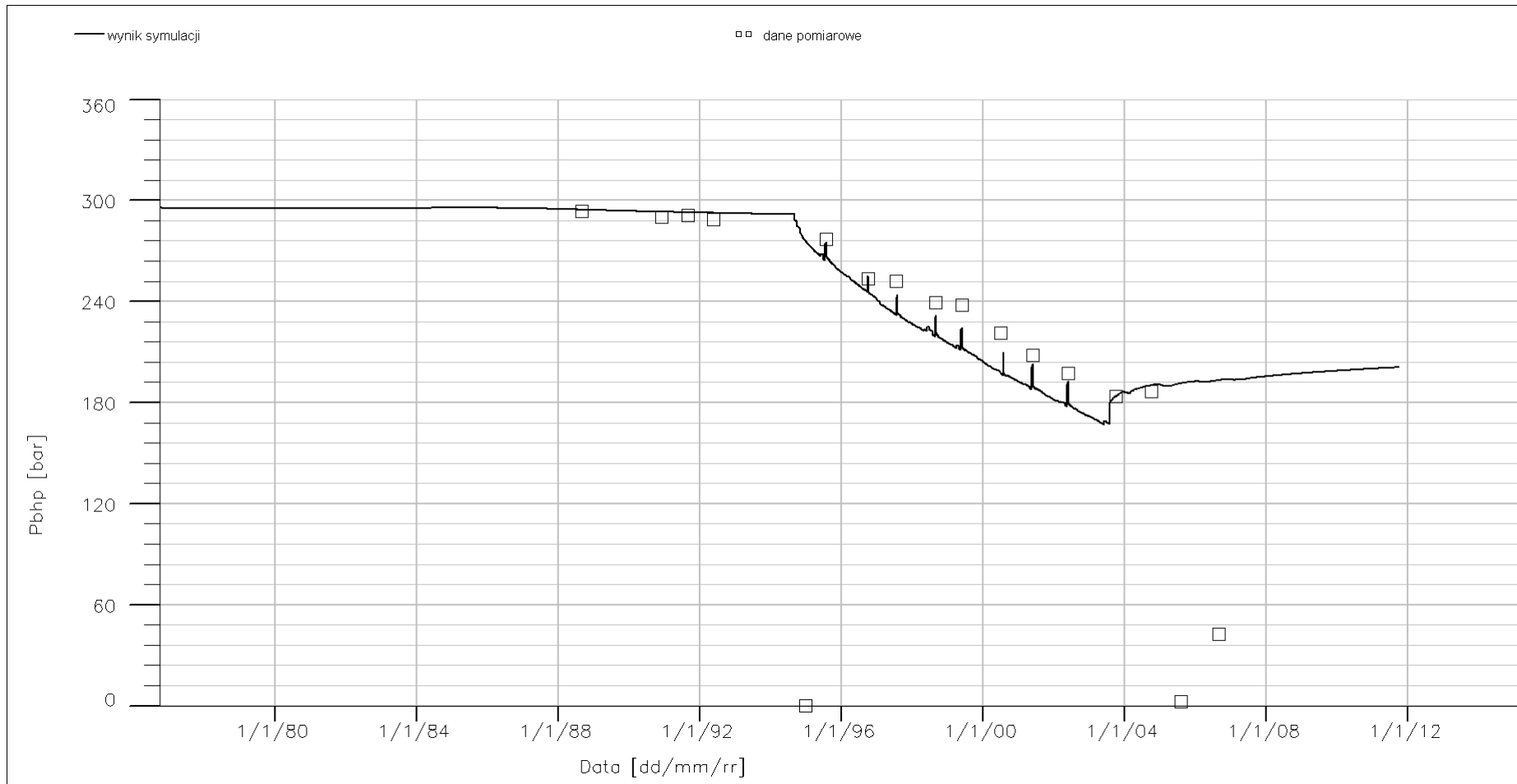


Fig. 1.1.16_170 Złoże Paproć. Odwiert Pa-12. Ciśnienie na spodzie odwiertu, P_{BHP}

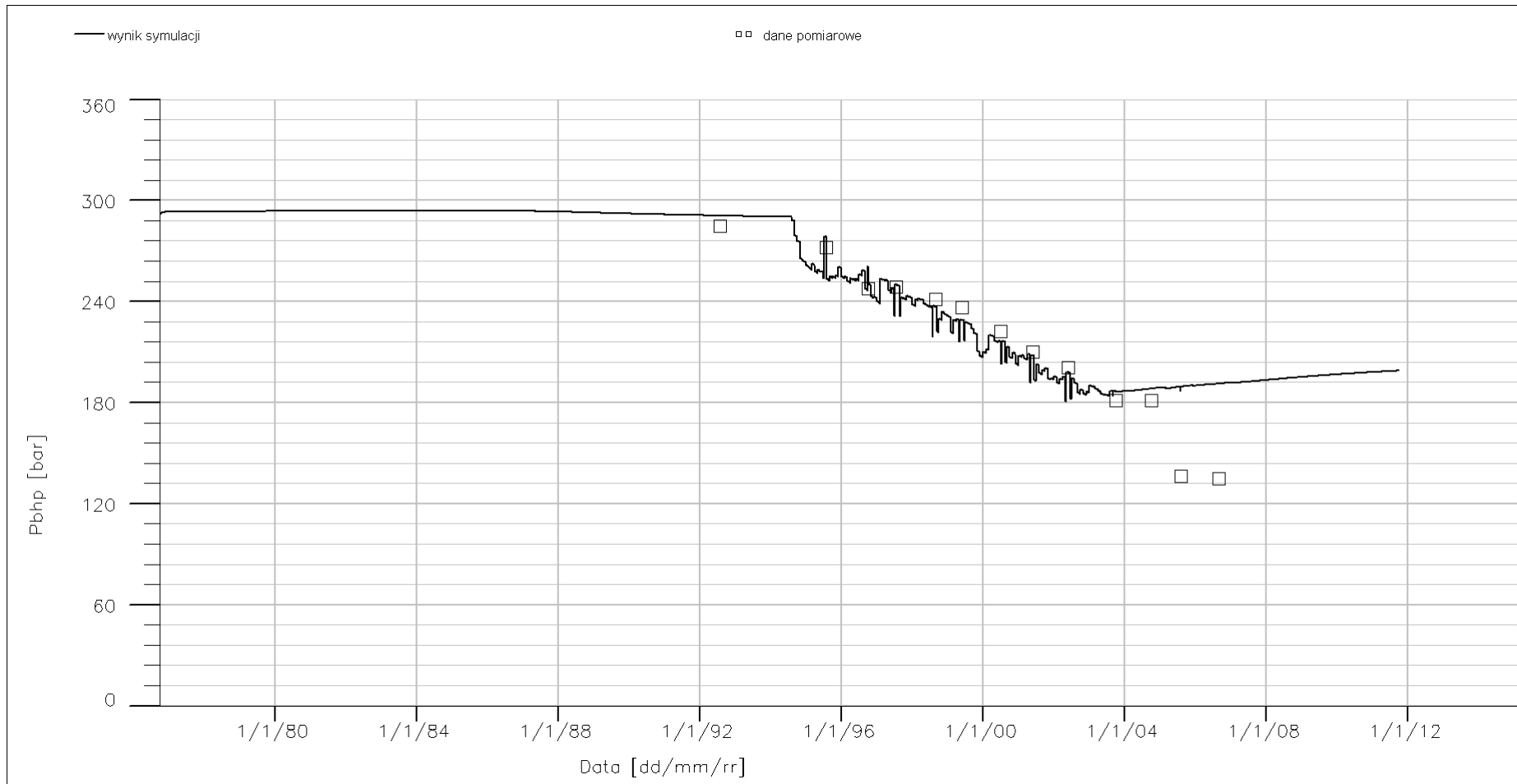


Fig. 1.1.16_171 Złoże Paproć. Odwiert Pa-32. Ciśnienie na spodzie odwiertu, P_{BHP}

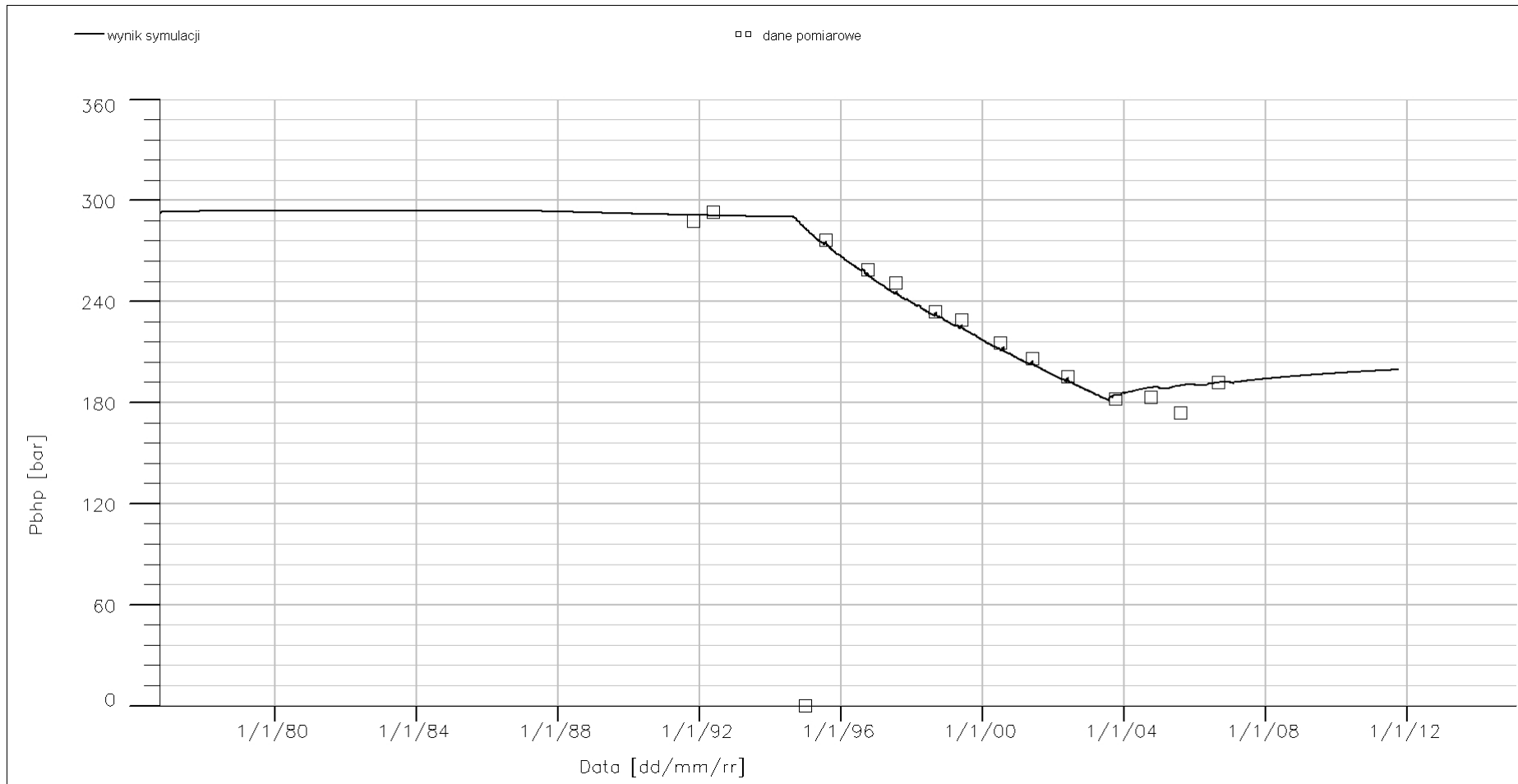


Fig. 1.1.16_172 Złoże Paproć. Odwiert Pa-33. Ciśnienie na spodzie odwiertu, P_{BHP}

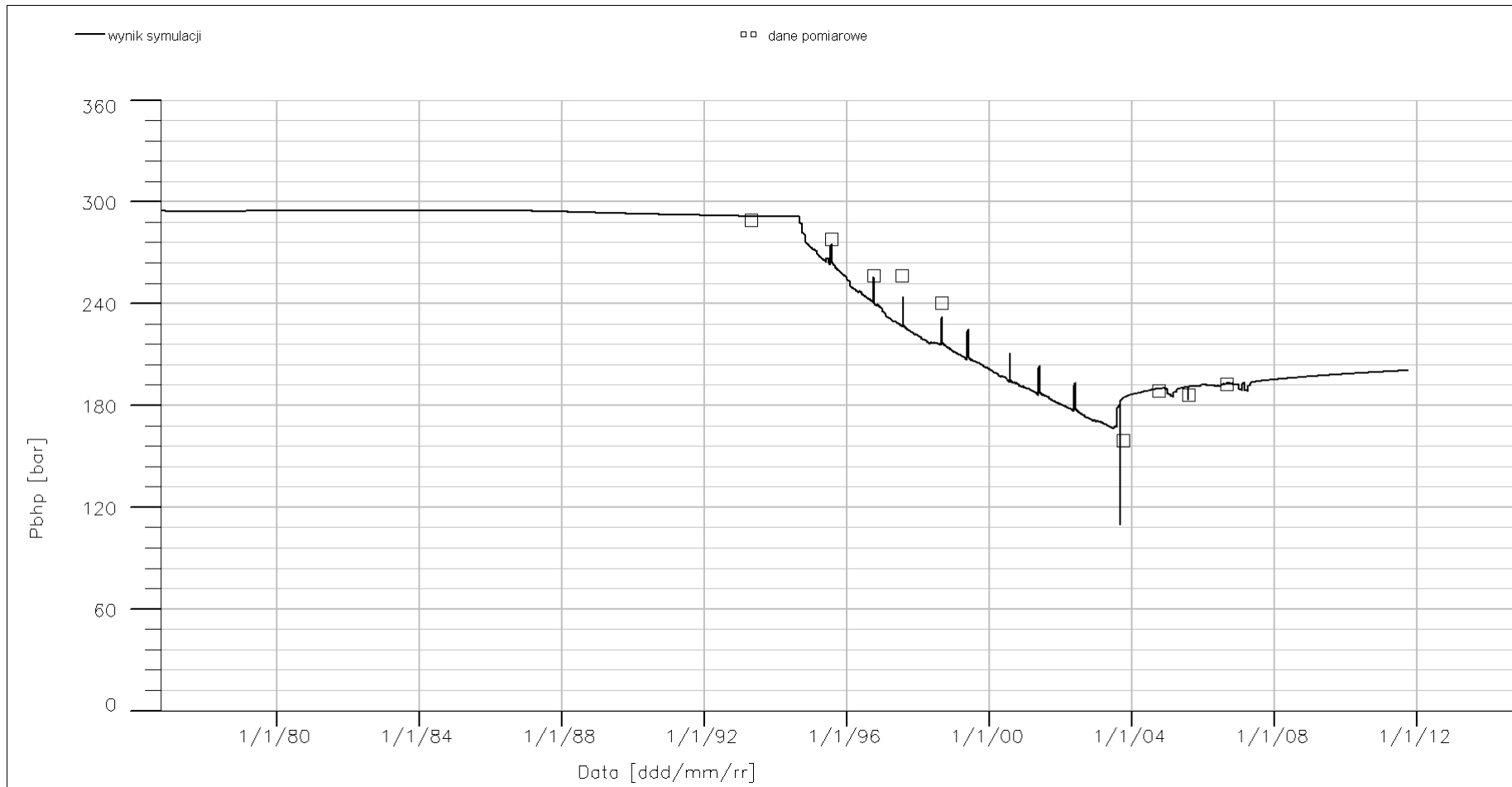


Fig. 1.1.16_173 Złoże Paproć. Odwiert Pa-34. Ciśnienie na spodzie odwiertu, P_{BHP}

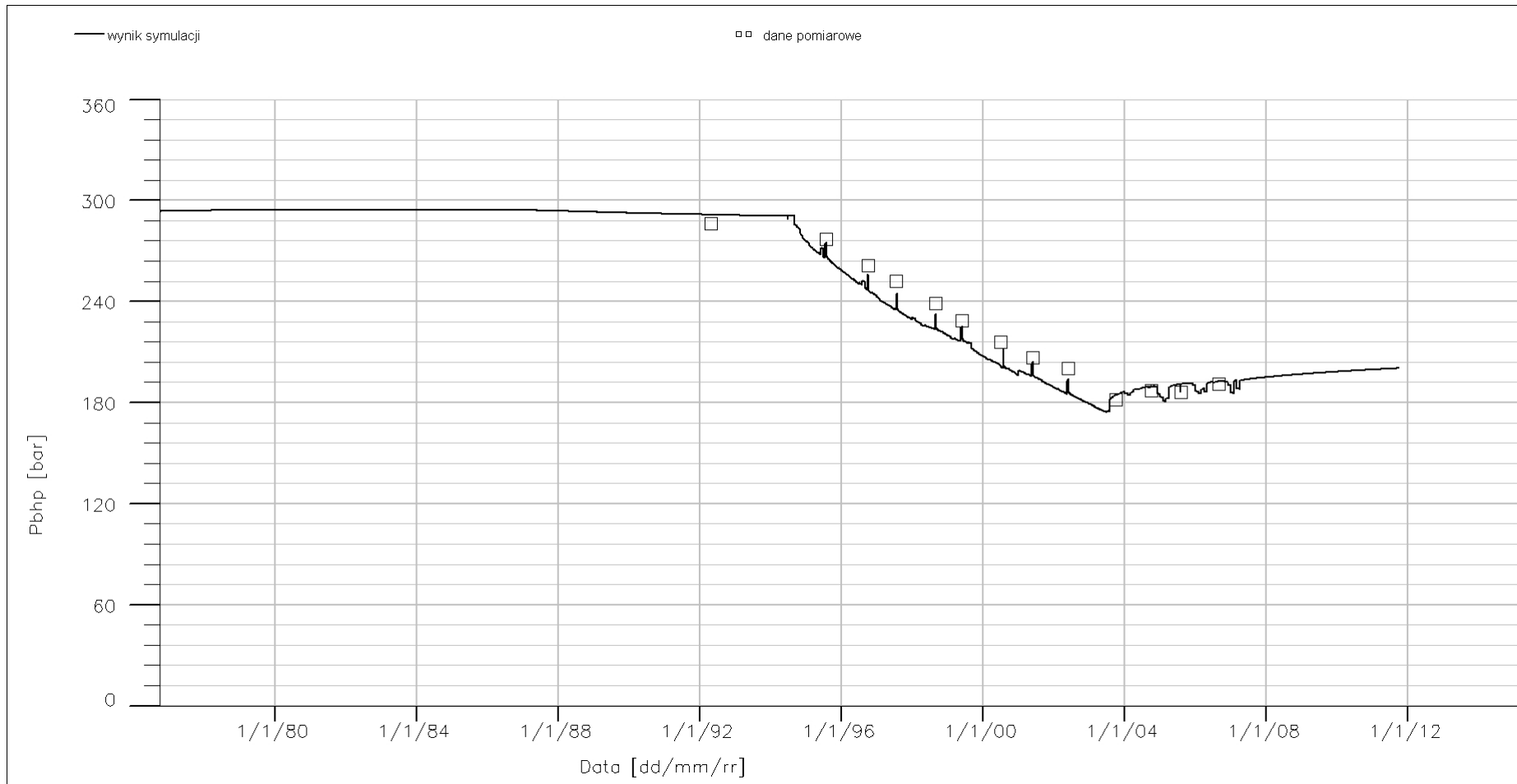


Fig. 1.1.16_174 Złoże Paproć. Odwiert Pa-35. Ciśnienie na spodzie odwiertu, P_{BHP}

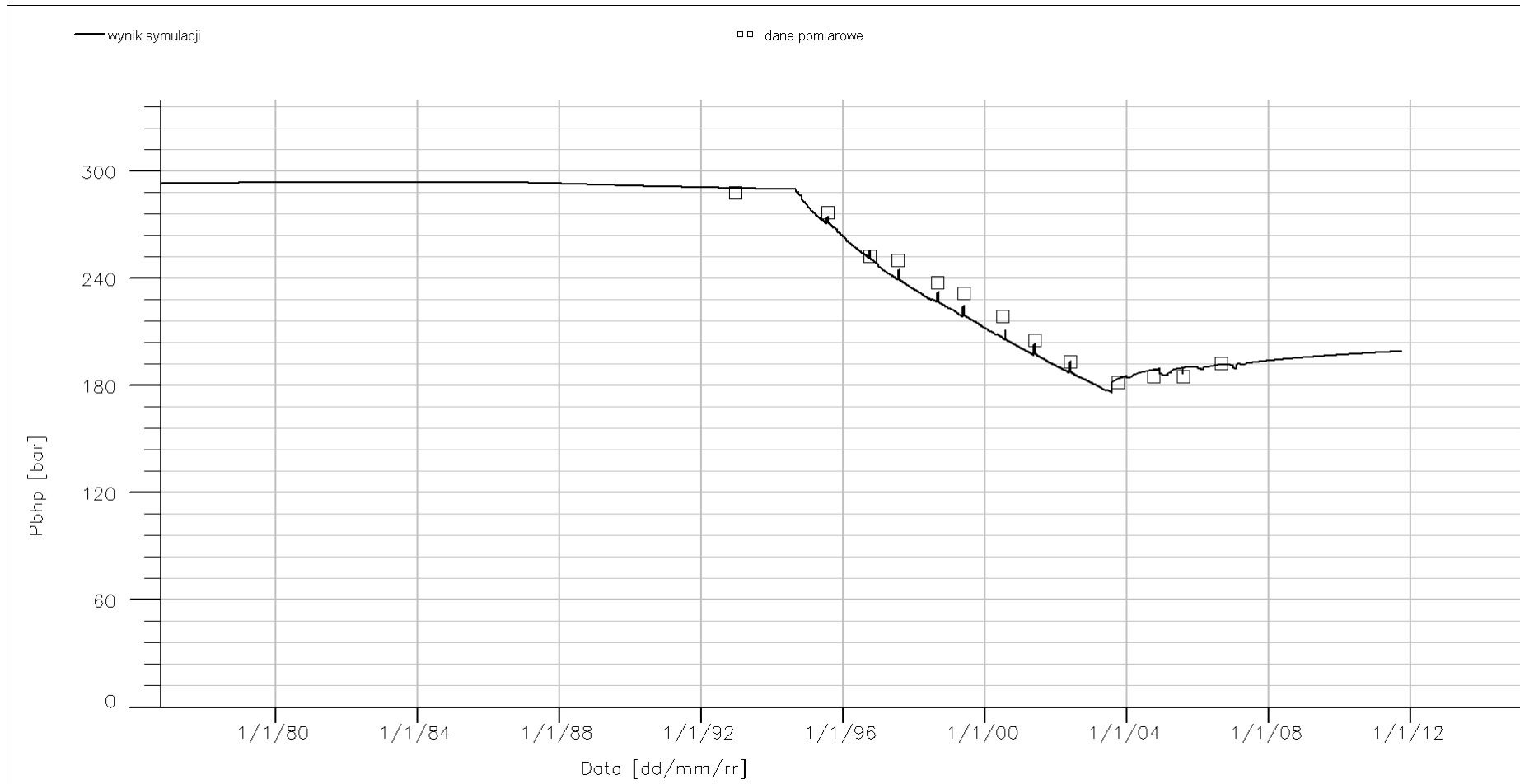


Fig. 1.1.16_175 Złoże Paproć. Odwiert Pa-37. Ciśnienie na spodzie odwiertu, P_{BHP}

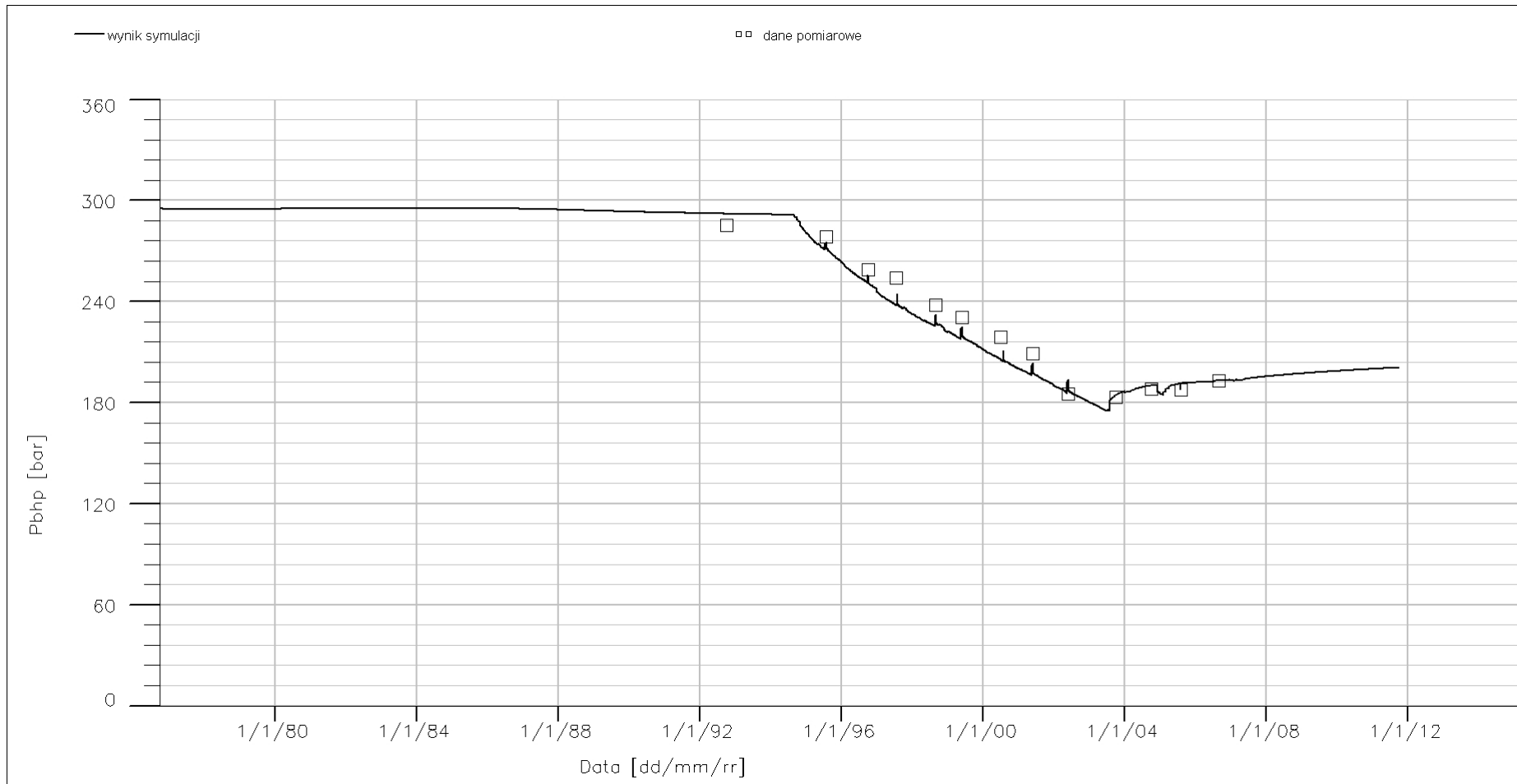


Fig. 1.1.16_176 Złoże Paproć. Odwiert Pa-38. Ciśnienie na spodzie odwiertu, P_{BHP}

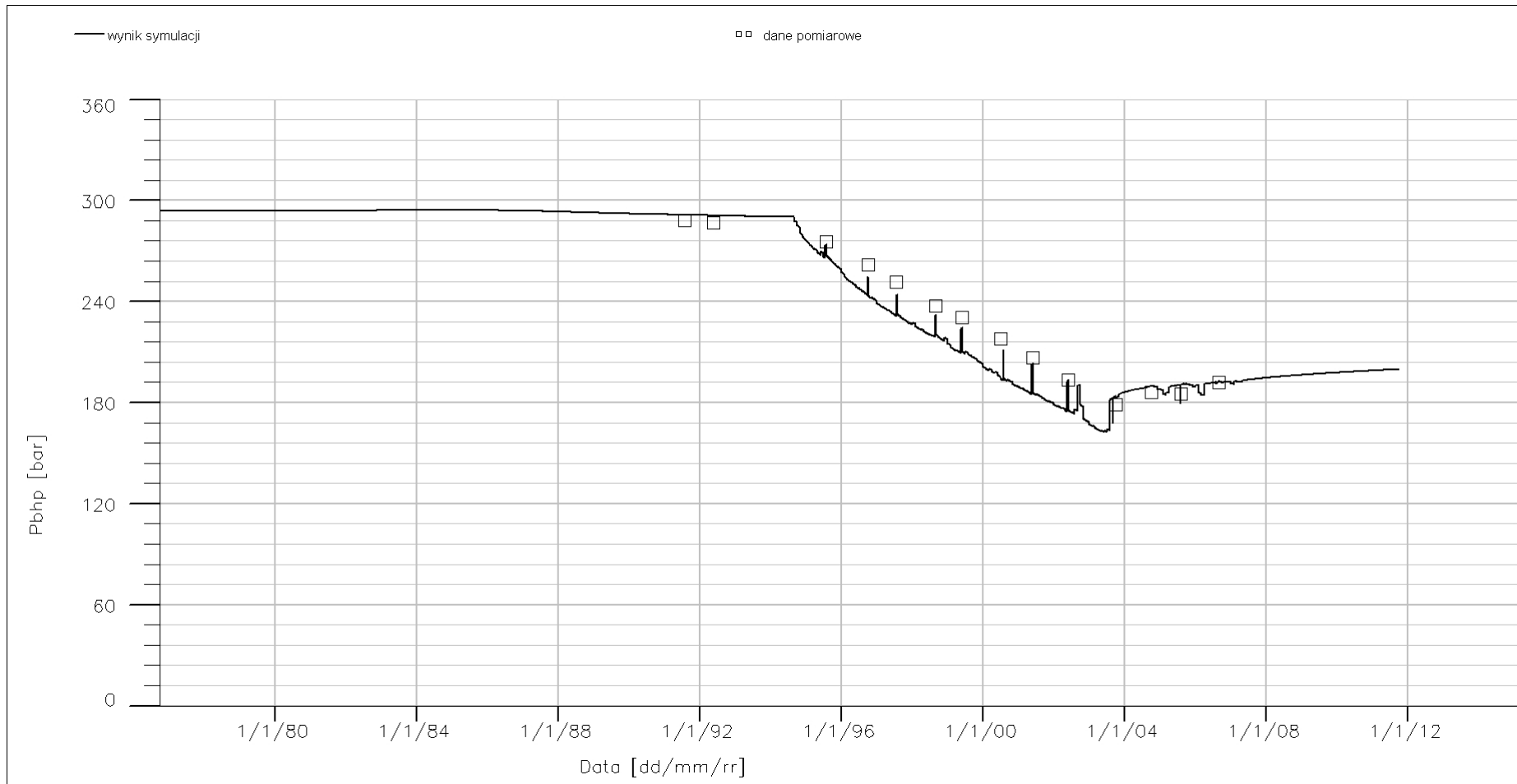


Fig. 1.1.16_177 Złoże Paproć. Odwiert P-41. Ciśnienie na spodzie odwiertu, P_{BHP}

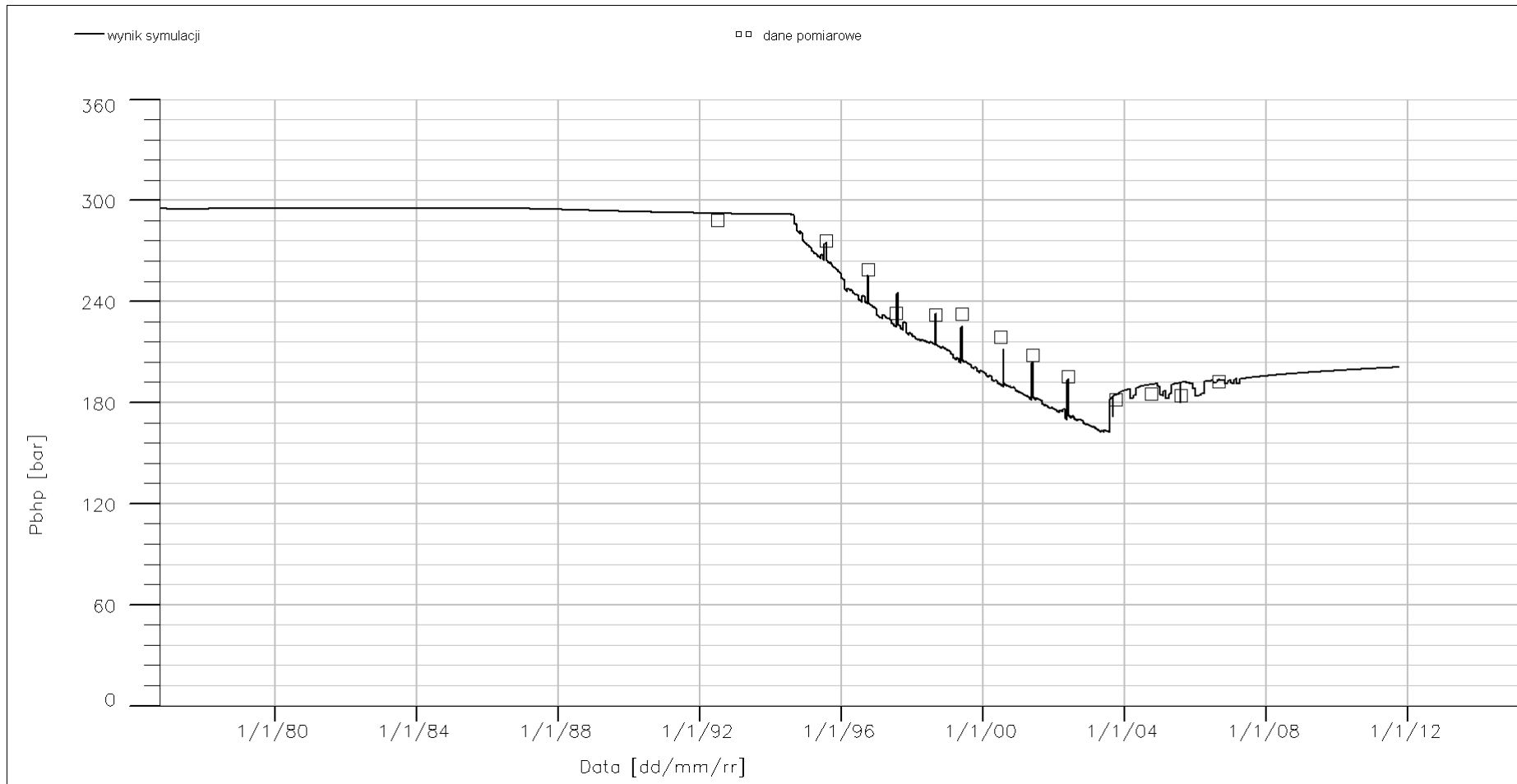


Fig. 1.1.16_178 Złoże Paproć. Odwiert Pa-42. Ciśnienie na spodzie odwiertu, P_{BHP}

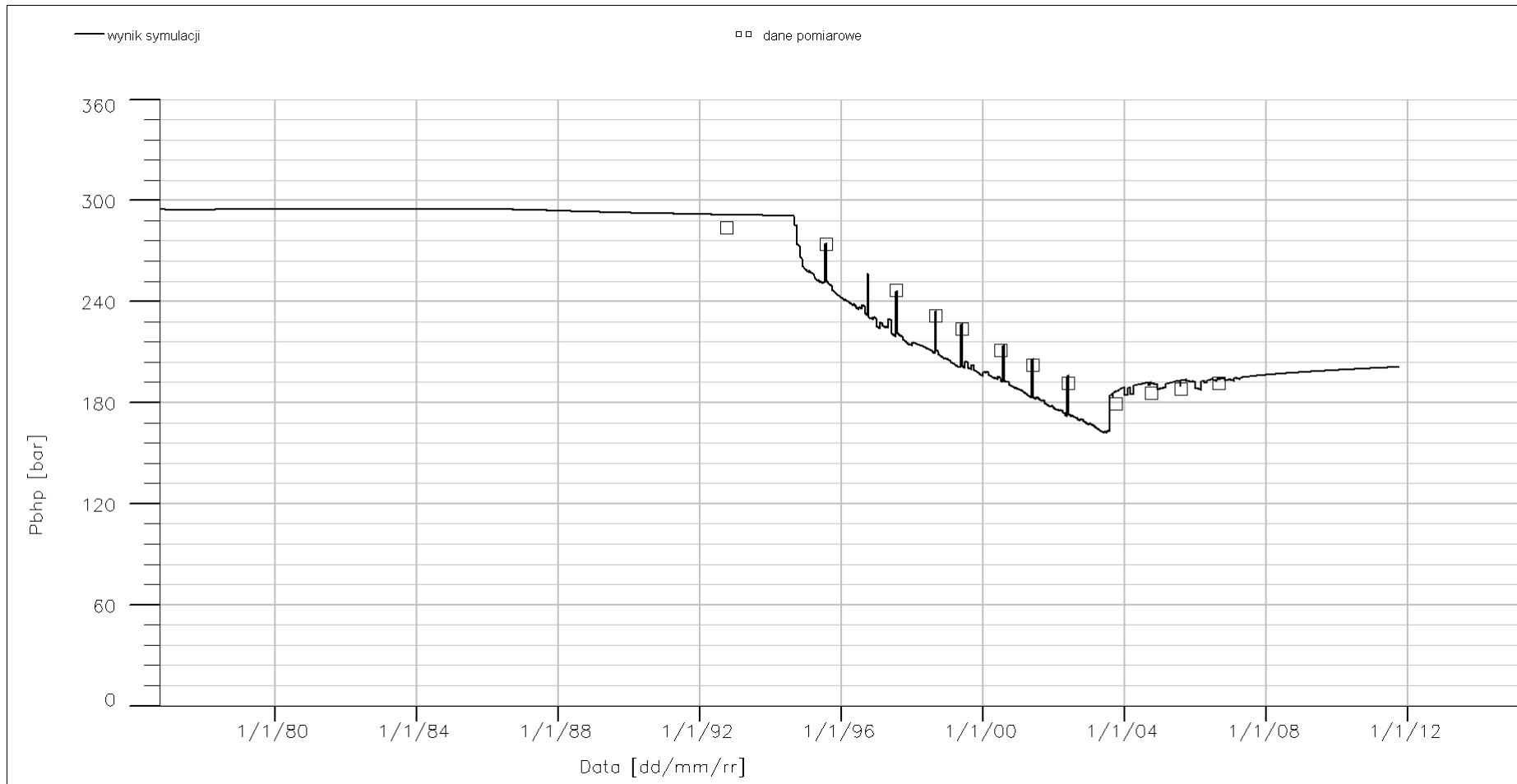


Fig. 1.1.16_179 Złoże Paproć. Odwiert Pa-46. Ciśnienie na spodzie odwiertu, P_{BHP}

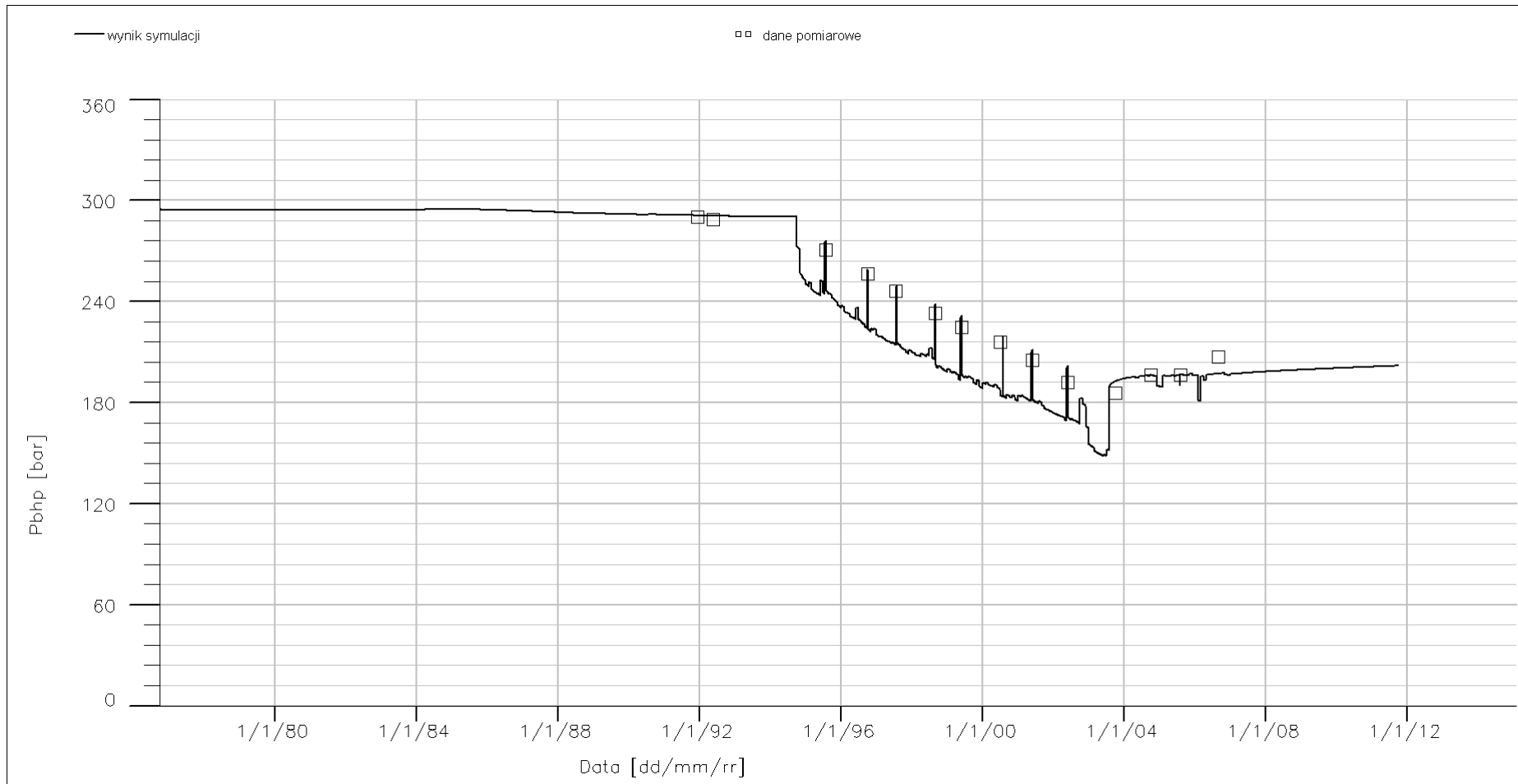


Fig. 1.1.16_180 Złoże Paproć. Odwiert Pa-48. Ciśnienie na spodzie odwiertu, P_{BHP}

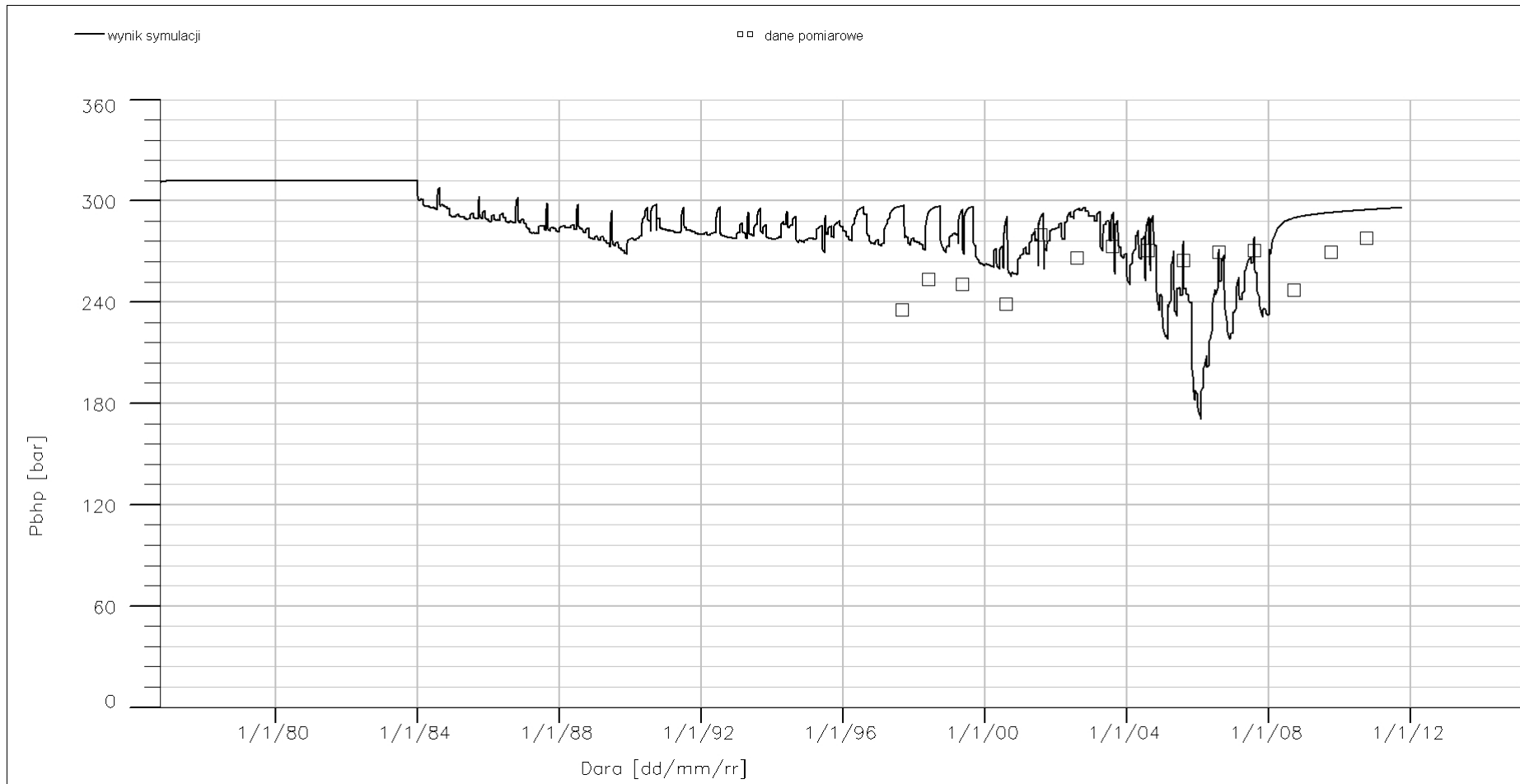


Fig. 1.1.16_181 Złoże Porążyn. Odwiert Po-2a. Ciśnienie na spodzie odwiertu, P_{BHP}

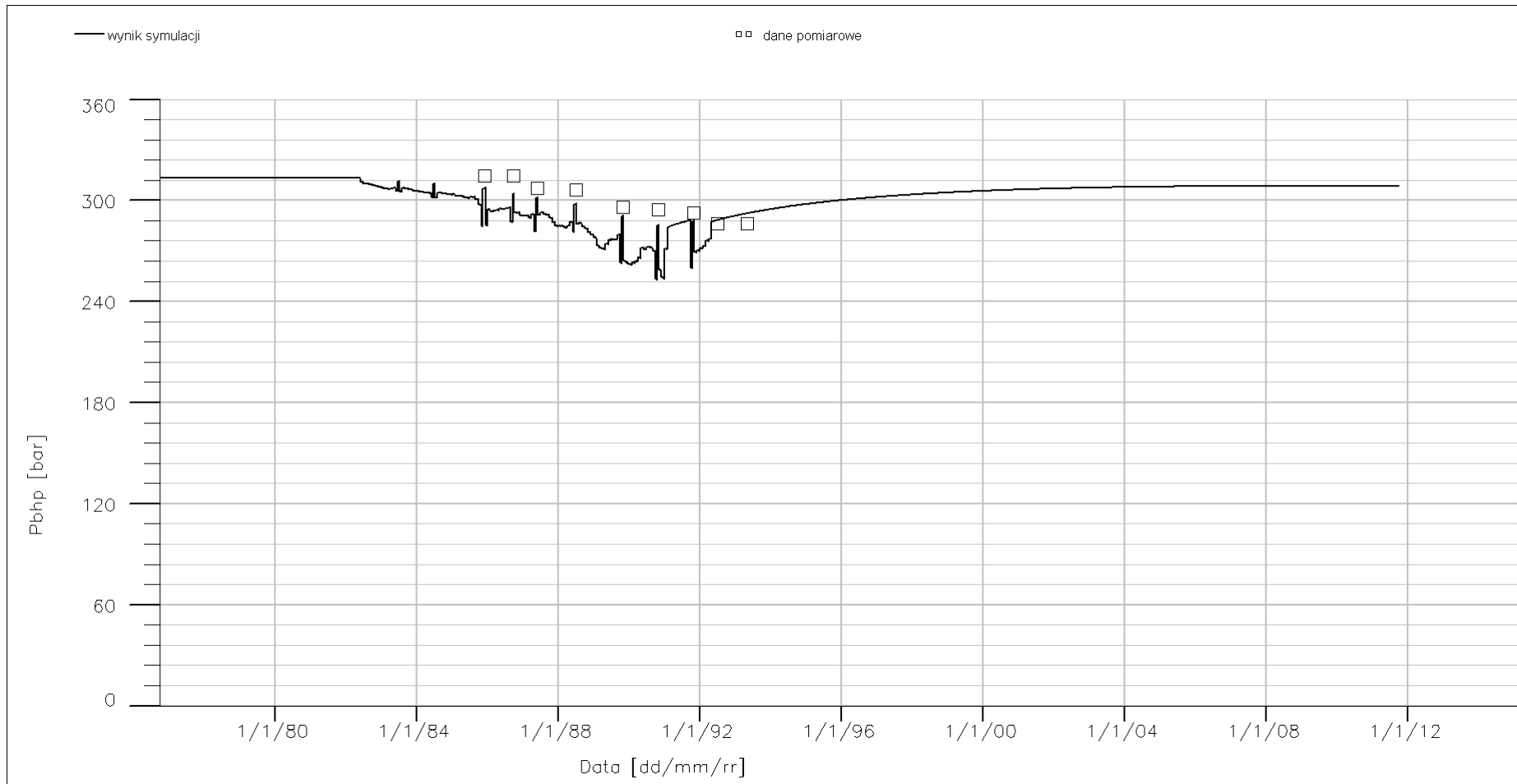


Fig. 1.1.16_182 Złoże Sątopy. Odwiert S-2. Ciśnienie na spodzie odwiertu, P_{BHP}

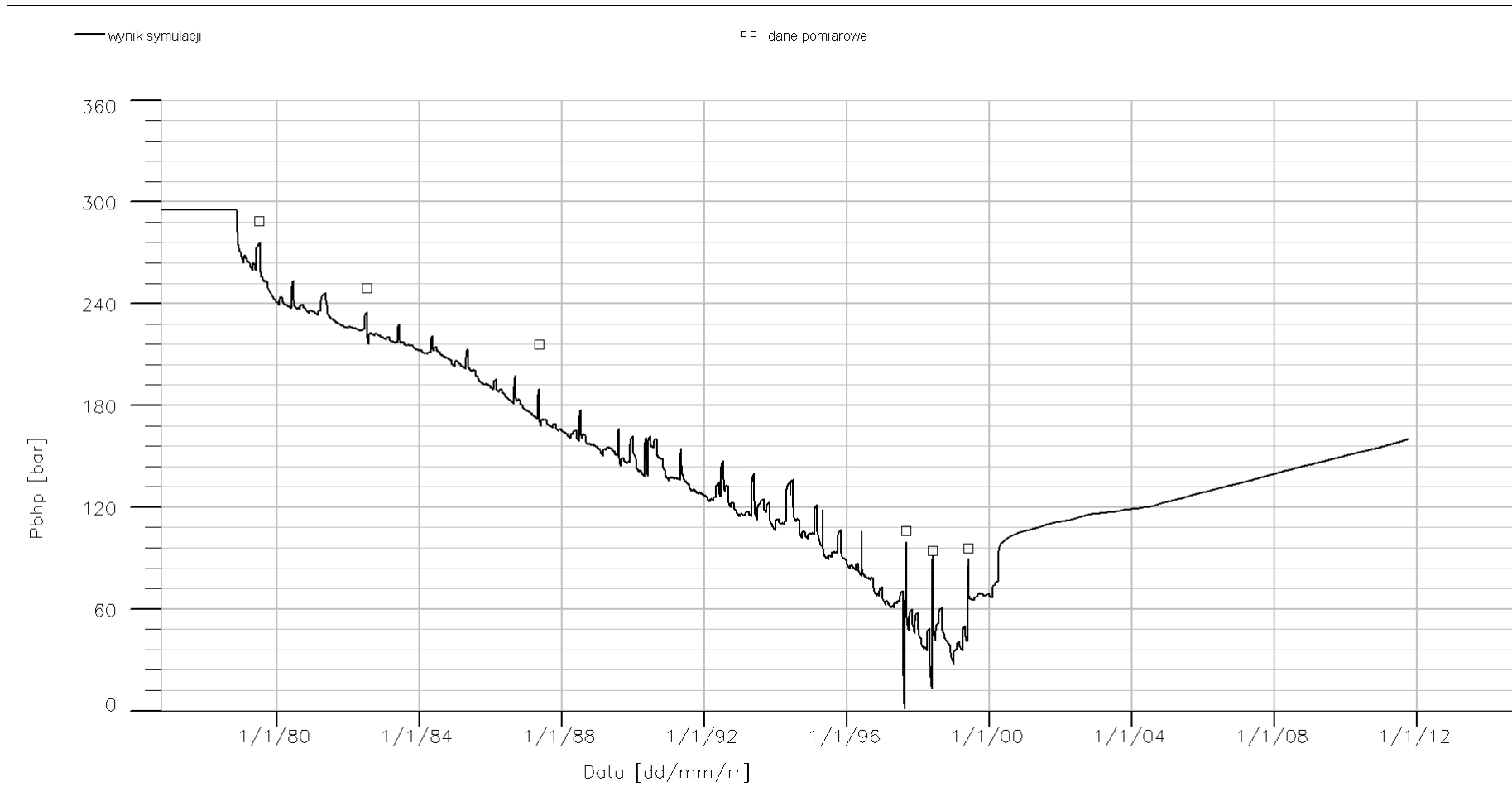


Fig. 1.1.16_183 Złoże Ujazd. Odwiert U-1. Ciśnienie na spodzie odwiertu, P_{BHP}

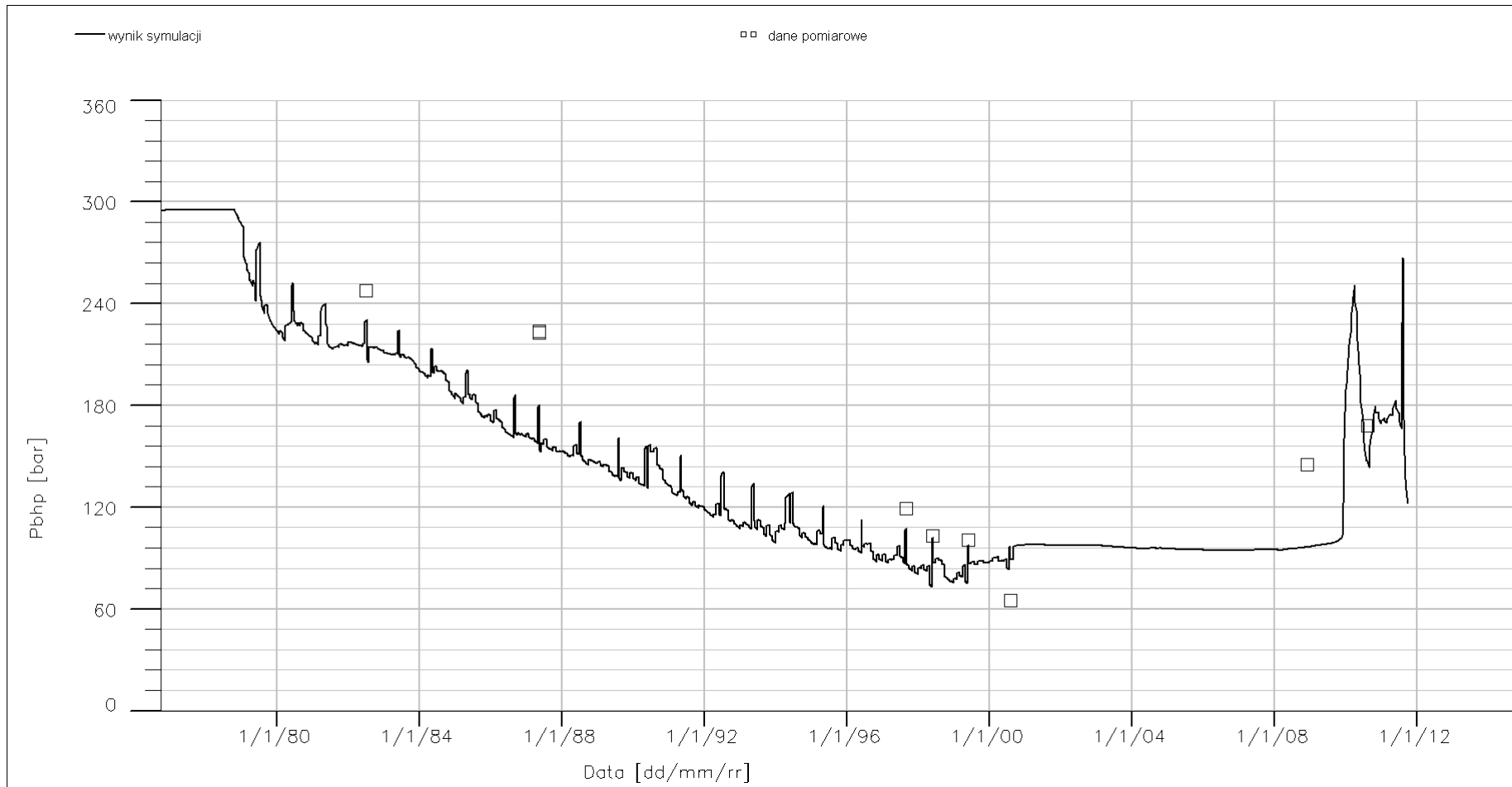


Fig. 1.1.16_184 Złoże Ujazd. Odwiert U-12. Ciśnienie na spodzie odwiertu, P_{BHP}

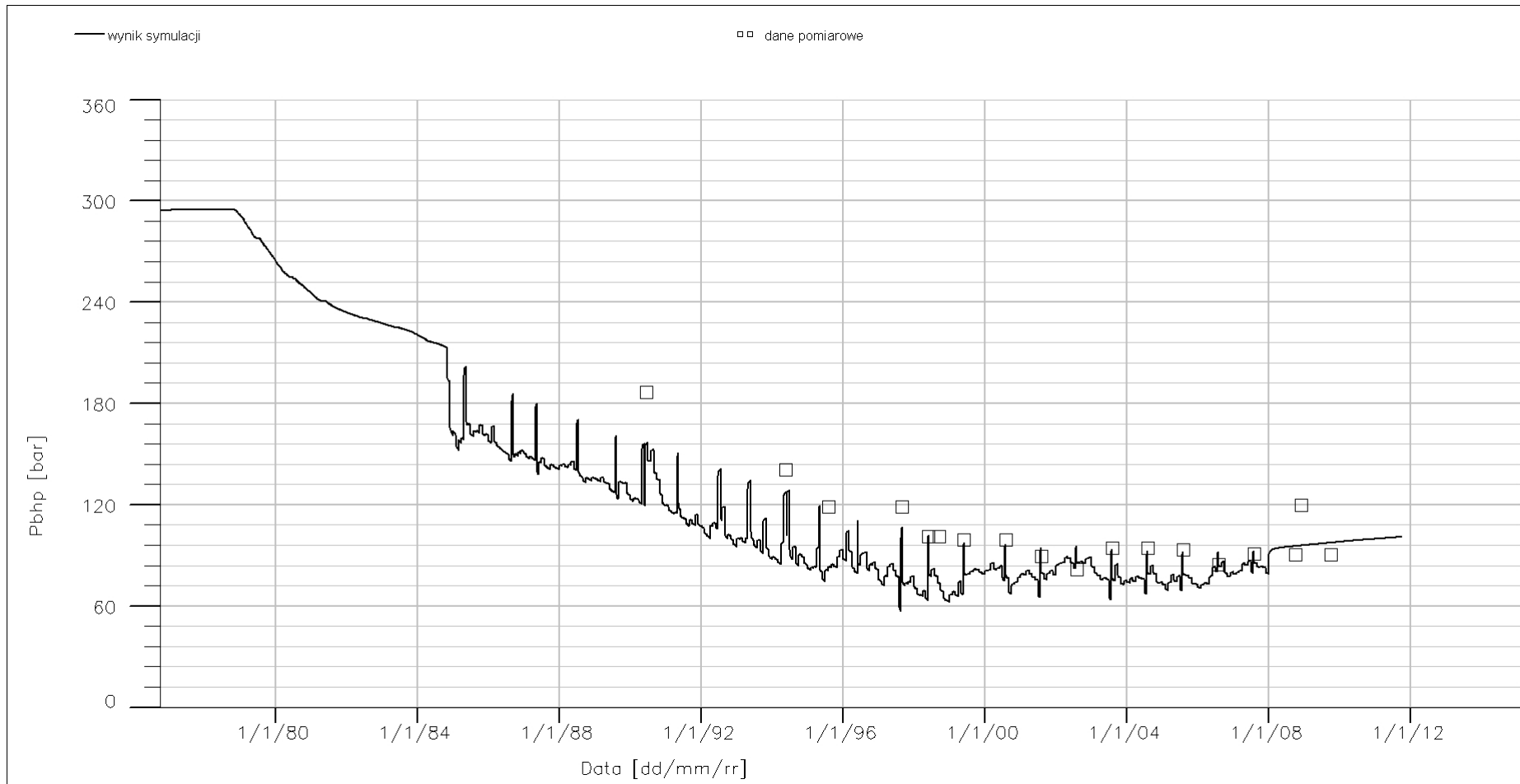


Fig. 1.1.16_185 Złoże Ujazd. Odwiert U-15. Ciśnienie na spodzie odwiertu, P_{BHP}

Symulacje procesów sekwestracji CO₂

Obliczenia symulacyjne przeprowadzono według dwóch, przedstawionych poniżej wariantów realizujących różne schematy sekwestracji CO₂. W obydwu wariantach zatłaczano CO₂ przez okres 50 lat i przez kolejne 300 lat monitorowano zmiany, zachodzące w strukturze, wywołane obecnością zatłoczonego dwutlenku węgla. W omawianych wariantach do zatłaczania CO₂ wykorzystano odwierty istniejące, znajdujące się w obrębie omawianej struktury.

Założenia dla Wariantu I:

- zatłaczanie CO₂ trzema odwiertami: Sątopy-1,2 oraz Bukowiec-2, (**Fig. 1.1.16_186**),
- stała wydajność zatłaczania dla każdego z odwiertów: 100 tys. Nm³/d,
- zatłaczanie dwutlenku węgla w stanie hiperkrytycznym do strefy wodonośnej,
- zmagazynowanie w strukturze ok 10.6 mln ton dwutlenku węgla.

Założenia dla Wariantu II:

- zatłaczanie CO₂ siedmioma odwiertami: Sątopy-1,2, Bukowiec-2,3,9, Porążyn-2a oraz Kopanki-1 (**Fig. 1.1.16_187**),
- stała wydajność zatłaczania dla każdego z odwiertów: 100 tys Nm³/d,
- zatłaczanie dwutlenku węgla w stanie hiperkrytycznym do strefy wodonośnej,
- odwierty po zabiegu stymulacji (symulowanie zabiegów stymulacyjnych odwiertów zatłaczających w celu zwiększenia ich chłonności),
- maksymalne ciśnienie na spodzie odwiertów: 35 MPa,
- zmagazynowanie w strukturze ok 24.7 mln ton dwutlenku węgla.

Przedstawione poniżej wyniki symulacji złożowych uzyskano przy użyciu kompozycyjnego symulatora złożowego Eclipse 300 firmy Schlumberger – moduł Gaswat.

Wariant I – wyniki symulacji

Wyniki dla wariantu I przedstawiono na **Fig. 1.1.16_188 – Fig. 1.1.16_201**. W omawianym wariantcie dwutlenek węgla zatłaczało 3 odwierty zlokalizowane w północno zachodniej części wybranego rejonu Niecki Poznańskiej. Do struktury zatłaczano 300 tys. Nm³ CO₂ na dobę, co dało w sumie w okresie 50 lat ok 5.4 mld Nm³ zmagazynowanego dwutlenku węgla. (**Fig. 1.1.16_188**). Każdy z odwiertów zatłaczał do struktury po 100 tys. Nm³/d, a ciśnienie na spodzie każdego z nich w początkowej fazie zatłaczania przekroczyło 35 MPa (**Fig. 1.1.16_189 - 191**). Właściwości strefy wodonośnej modelowanego czerwonego spągowca, w której składowany jest dwutlenek węgla, są zbyt słabe, aby odwierty mogły zatłaczać dwutlenek węgla z dużymi wydajnościami. W przypadku wszystkich odwiertów zatłaczających, a w szczególności w przypadku odwiertu Sątopy-1, którego ciśnienie denne w początkowej fazie zatłaczania

przekracza 40 MPa (**Fig. 1.1.16_189**), zaleca się przeprowadzenie zabiegów stymulacyjnych poprawiających chłonność skały w strefach przyodwiertowych. Po zakończeniu zatłaczania ciśnienie denne w odwiertach spadało i po ok 300 latach relaksacji ustabilizowało się na poziomie ok. 30 MPa.

Na **Fig. 1.1.16_192** do **Fig. 1.1.16_199** przedstawiono wyniki symulacji w postaci rozkładów metanu rozpuszczonego w wodzie. Znacząca różnica pomiędzy rozpuszczalnością metanu, a rozpuszczalnością dwutlenku węgla (R_{Sc1} ok ośmiokrotnie niższa od R_{ScO2}) pozwala zaobserwować w strukturze zjawisko wypierania rozpuszczonego w wodzie metanu zatłaczanym dwutlenkiem węgla. Udział molowy metanu rozpuszczonego w wodzie po zakończeniu historycznego okresu eksploatacji złóż znajdujących się w omawianej strukturze kształtował się na poziomie od 0.00115 do 0.00161. Niższe wartości rozpuszczonego w wodzie metanu reprezentują rejonny złóż, w których, w wyniku eksploatacji, nastąpił znaczny spadek ciśnienia złożowego (im wyższe ciśnienie tym wyższa rozpuszczalność). W przypadku zatłaczania natomiast już po kilku dniach zaobserwowano w rejonie odwiertów zatłaczających spadek ilości metanu rozpuszczonego w wodzie, w miejsce którego rozpuścił się zatłaczany dwutlenek węgla (**Fig. 1.1.16_192**). Zarówno po dziesięciu latach zatłaczania dwutlenku węgla (**Fig. 1.1.16_178**) jak i po zakończeniu zatłaczania (**Fig. 1.1.16_194**) w warstwie wodonośnej, w której udostępniono odwierty zatłaczające, widać wyraźne strefy wokół odwiertów w których zawartość rozpuszczonego metanu w wodzie jest bliska zero. Świadczy to o prawie stu procentowym odzyskaniu metanu uwięzionego wcześniej w solance. Na **Fig. 1.1.16_195** natomiast pokazano rozkład metanu rozpuszczonego w wodzie po ok. 300 latach relaksacji struktury. W porównaniu do wyniku przedstawionego na koniec zatłaczania, na omawianej figurze można zaobserwować większy spadek zawartości metanu w wodzie na południowy zachód od odwiertu S-2. Sytuacja ta wynika z faktu wystąpienia w strukturze zjawiska konwekcji. Dwutlenek węgla w warunkach złożowych posiada niższą gęstość od solanki, dlatego podczas zatłaczania migruje do warstw znajdujących się powyżej warstw, w których udostępniono odwierty zatłaczające.

Na **Fig. 1.1.16_196 –199** przedstawiono rozkład metanu rozpuszczonego w wodzie na przekroju, przechodzącym przez odwiert S-2, obejmującym rejon złóż Sątopy i Porążyn. Zaraz po rozpoczęciu zatłaczania (**Fig. 1.1.16_196**) widać, że zatłaczany CO_2 migruje pionowo do góry i rozpuszcza się w wodzie w bliskiej strefie przyodwiertowej. Na kolejnych przekrojach (**Fig. 1.1.16_197 – Fig. 1.1.16_198**) obserwuje się już szybszą migrację CO_2 w kierunku poziomym, co wynika z gorszych przepuszczalności w płytszych warstwach czerwonego spągowca. Po trzystu latach relaksacji obserwuje się, że cały zatłoczony do struktury dwutlenek węgla rozpuścił się w wodzie i nie dotarł do jej warstw przystropowych (**Fig. 1.1.16_199**). Fakt ten pozwala stwierdzić, że cały gaz, który znajduje się w czapach gazowych modelu jest to pozostały po eksploatacji gaz pierwotny plus odzyskany w wyniku zatłaczania metan.

Na **Fig. 1.1.16_200i Fig. 1.1.16_201** przedstawiono rozkłady nasycenia gazem w rejonie, w którym odbyło się składowanie CO_2 . Obydwie figury przedstawiają widok modelu z góry z tym, że pierwszy przedstawia nasycenie gazem przed rozpoczęciem zatłaczania CO_2 , a drugi nasycenie gazem po 300 latach relaksacji Struktury. Porównując te dwie figury należy stwierdzić, że zwłaszcza w rejonie złoża Sątopy w znacznej części odbudowała się jego czapa gazowa. W rejonie złoża Porążyn, gdzie dwutlenek węgla zatłaczał tylko jeden odwiert B-2, efekt ten jest dużo słabszy. Należy jednak pamiętać, że podczas zatłaczania dwutlenku węgla do struktury, odbudowywało się obniżone w efekcie eksploatacji średnie ciśnienie w strukturze i rozpuszczalność wszystkich gazów znacznie się zwiększyła.

Wariant II – wyniki symulacji

Wyniki symulacji dla wariantu II przedstawiono na **Fig. 1.1.16_202 – Fig. 1.1.16_220**. Po przeanalizowaniu wyników Wariantu I stwierdzono, że zmagazynowana w nim ilość dwutlenku węgla jest zbyt mała w porównaniu do pojemności rozpatrywanej struktury. Stwierdzono również, że z powodu słabych własności skały w rejonach udostępnień odwiertów zatłaczających odwierty nie mogą zatłaczać dwutlenku węgla z dużymi wydajnościami. Dlatego, aby zwiększyć sumaryczną ilość zatłoczonego CO₂ do struktury rozpatrzono wariant, w którym dwutlenek węgla zatłacza 7 odwiertów (Sątopy-1,2, Bukowiec-2,3,9, Porażyn-2a oraz Kopanki-1) z wydajnościami takimi jak w Wariacie I (czyli po 100 tys Nm³/d na odwiert). Wszystkie odwierty zatłaczające zlokalizowano w północno-zachodniej i północno-centralnej części omawianej struktury, tak aby uniknąć ewentualnej ucieczki dwutlenku węgla we wschodniej jej części. Zwiększenie liczby odwiertów zatłaczających umożliwiło zmagazynowanie w strukturze ok. 12.6 mld Nm³ dwutlenku węgla (**Fig. 1.1.16_202**) Dzięki uwzględnieniu w omawianym wariacie zabiegów stymulacyjnych poprawiających chłonność odwiertów zatłaczających ciśnienie denne we wszystkich odwiertach nie przekroczyło $P_{bhp_{max}}=35$ MPa (**Fig. 1.1.16_203 – Fig. 1.1.16_209**). Ciśnienie na spodzie odwiertów zatłaczających regularnie wzrastało w czasie zatłaczania do poziomu ok. 34 MPa (**Fig. 1.1.16_203**), a po jego zakończeniu spadało i ustabilizowało się na poziomie minimalnie wyższym niż w Wariacie I wynosząc po ponad 300 letniej relaksacji struktury ok. 30,3 MPa. Na **Fig. 1.1.16_210** do **Fig. 1.1.16_218** przedstawiono wyniki symulacji w postaci rozkładów metanu rozpuszczonego w wodzie podobnie jak w Wariacie I. Po rozpoczęciu zatłaczania do struktury zatłaczany CO₂ migruje pionowo do góry i rozpuszcza się w wodzie (**Fig. 1.1.16_210** i **Fig. 1.1.16_214**) Następnie podobnie jak w przypadku wariantu pierwszego obserwuje się szybszą migrację dwutlenku węgla w kierunku poziomym niż pionowym wywołaną różnicą przepuszczalności. (**Fig. 1.1.16_215- Fig. 1.1.16_216**). W przypadku omawianego wariantu zatłoczony do struktury dwutlenek węgla również w całości rozpuścił się w wodzie. Na **Fig. 1.1.16_217** oraz **Fig. 1.1.16_218** można zaobserwować, że CO₂ w większości rejonów odwiertów zatłaczających nie dotarł nawet do warstw przystropowych. Jedynym wyróżniającym się rejonem jest obszar złoża Bukowiec (w rejonie odwiertu B-3), w którym zatłoczony do warstw wodonośnych dwutlenek węgla przemigrował do szczytu struktury i tam rozpuścił się w wodzie.

Na **Fig. 1.1.16_219** i **Fig. 1.1.16_220** przedstawiono natomiast rozkłady nasycenia gazem w rejonie, w którym odbyło się składowanie CO₂. Rejon ten w przypadku wariantu drugiego obejmuje cztery wyeksploatowane złoża gazu ziemnego (Sątopy, Kopanki, Porażyn, Bukowiec). Na omawianych figurach pokazano również złożo Grodzisk, które również zyskało podczas procesu wypierania metanu z wody. Pierwszy z omawianych figur przedstawia nasycenie gazem przed rozpoczęciem zatłaczania CO₂, a drugi nasycenie gazem po 300 latach relaksacji struktury. Porównując te dwa figury należy stwierdzić, że podobnie jak w przypadku wariantu I w rejonie złoża Sątopy w znacznej części odbudowała się jego czapa gazowa. W rejonie złóż Porażyn i Kopanki efekt ten jest nieznaczny. Natomiast w rejonie odwiertu zatłaczającego B-3 metan wyparty zatłaczanym dwutlenkiem węgla zasilł czapę gazową zarówno złoża Bukowiec jak i w małym stopniu czapę gazową złoża Grodzisk znajdującego się na wschód od Bukowca.

Zachowanie się zatłaczanego CO₂ w strukturze przedstawiają **Fig. 1.1.16_221** i **Fig. 1.1.16_222**, na których pokazano łączne nasycenie gazem rodzimym (część przystropowa) i fazą CO₂ (warstwy głębsze) po zakończeniu zatłaczania (**Fig. 1.1.16_221**) i po 300 latach relaksacji (**Fig. 1.1.16_222**) w rejonie złoża Sątopy.

Widoczne zmiany obrazują proces migracji CO₂ pionowo do stropu struktury i przejście (zanik) CO₂ z fazy czystej tego gazu do fazy rozpuszczonej w wodzie.

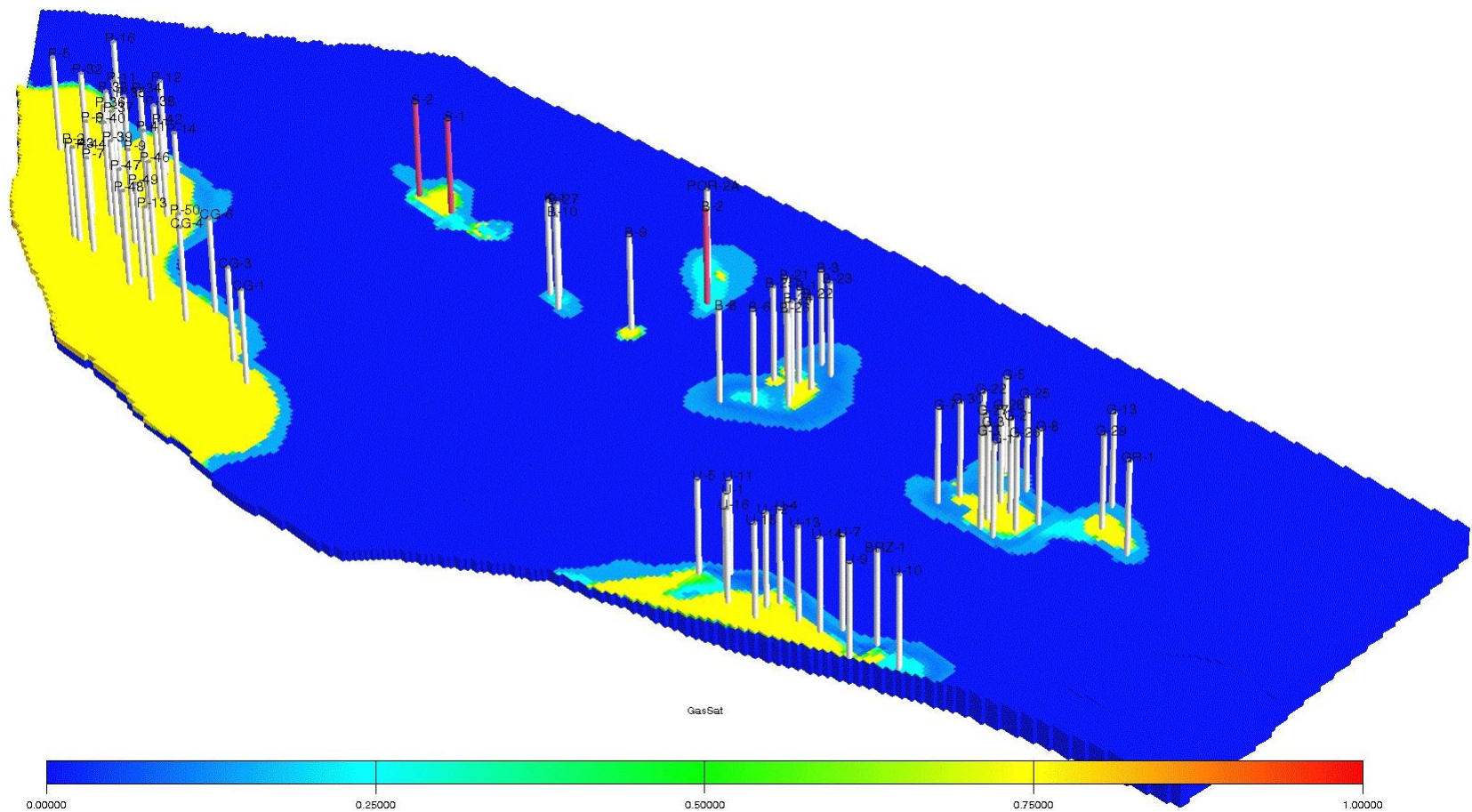


Fig. 1.1.16_186 Struktura Niecki Poznańskiej. Rozmieszczenie odwiertów zatłaczających

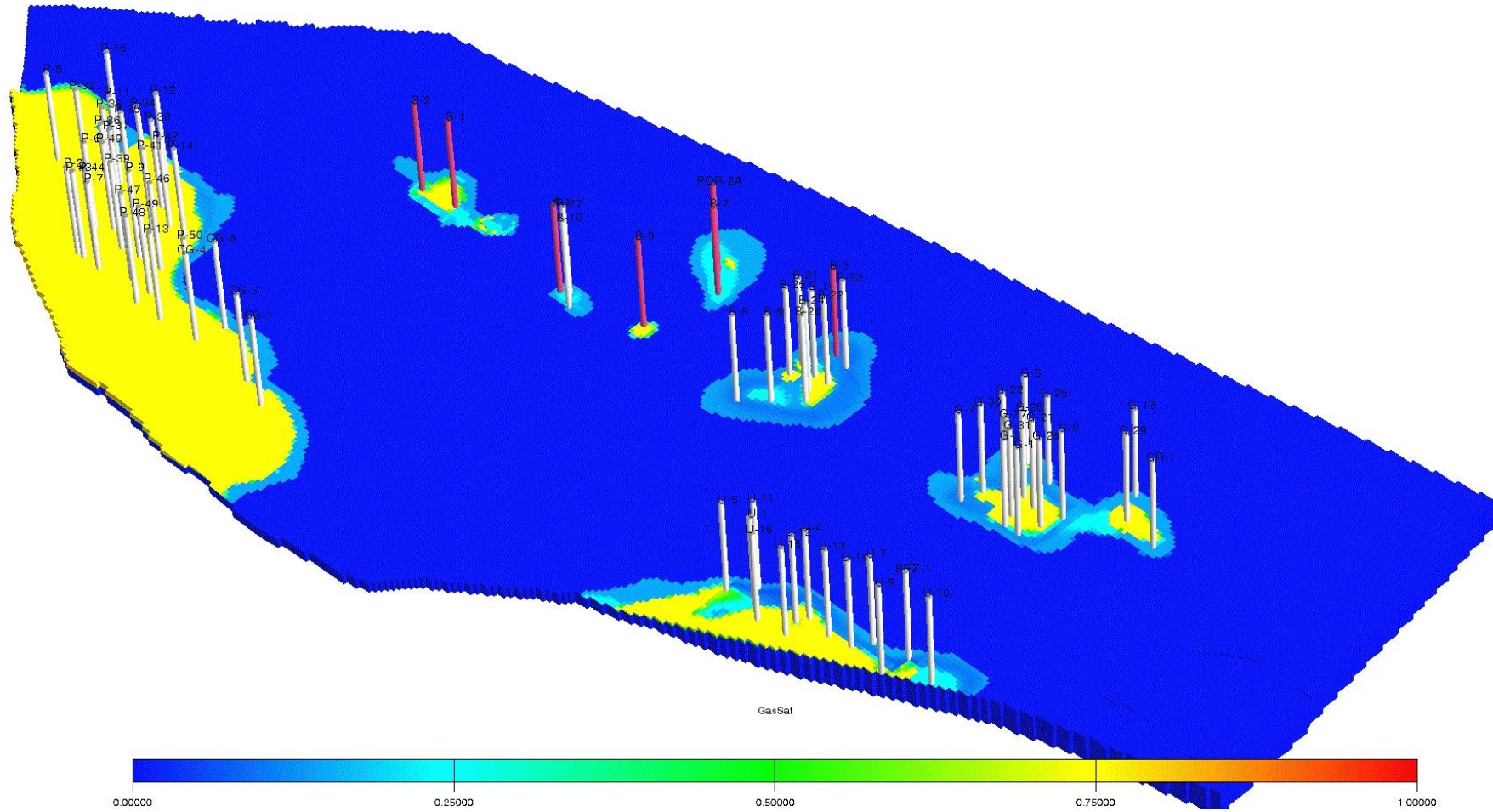


Fig. 1.1.16_187 Struktura Niecki Poznańskiej. Rozmieszczenie odwiertów zatłaczających

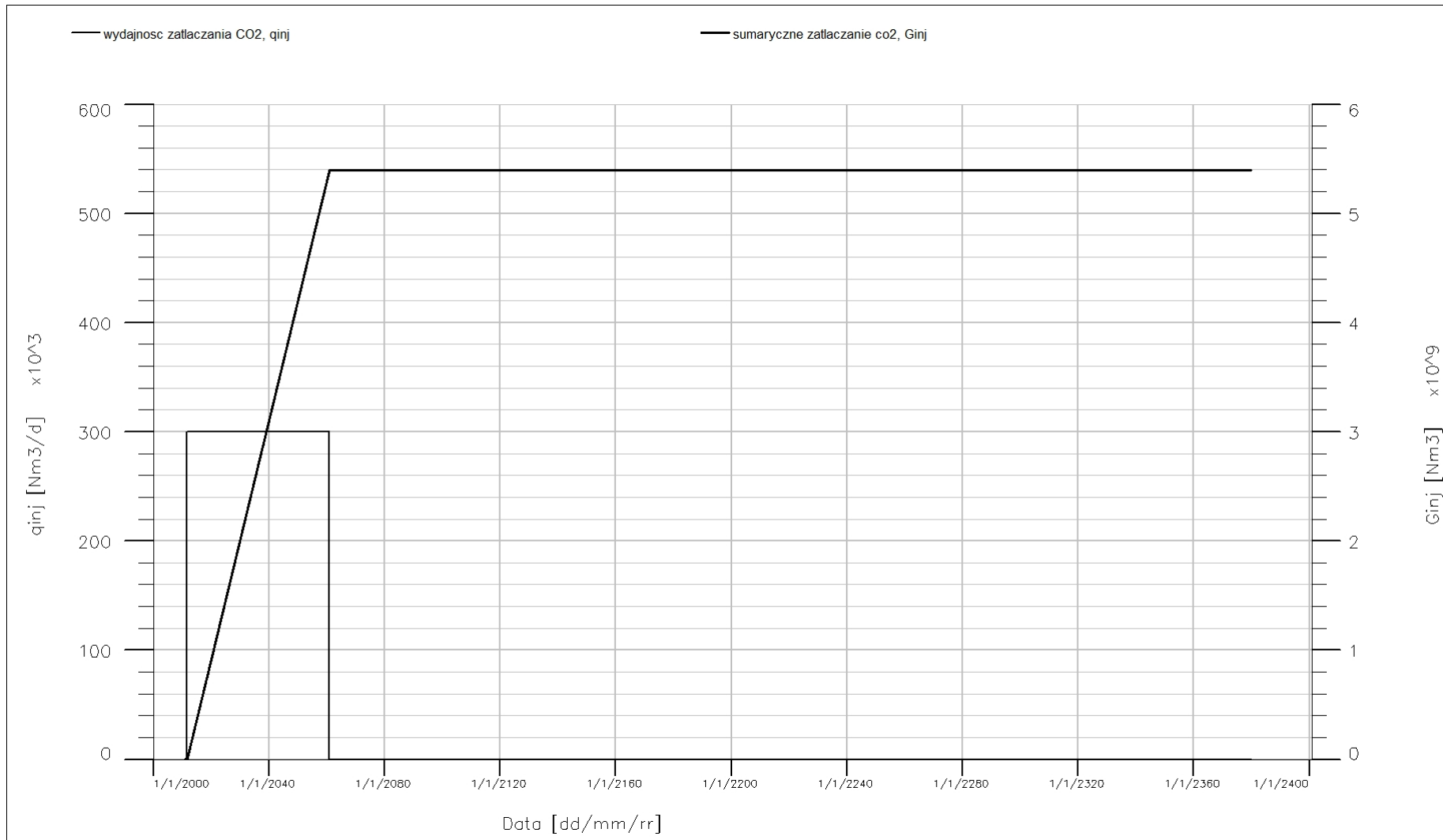


Fig. 1.1.16_188 Struktura Niecki Poznańskiej. Wariant I. Sumaryczne zatłaczanie oraz wydajność zatłaczania CO₂ do struktury 16-201

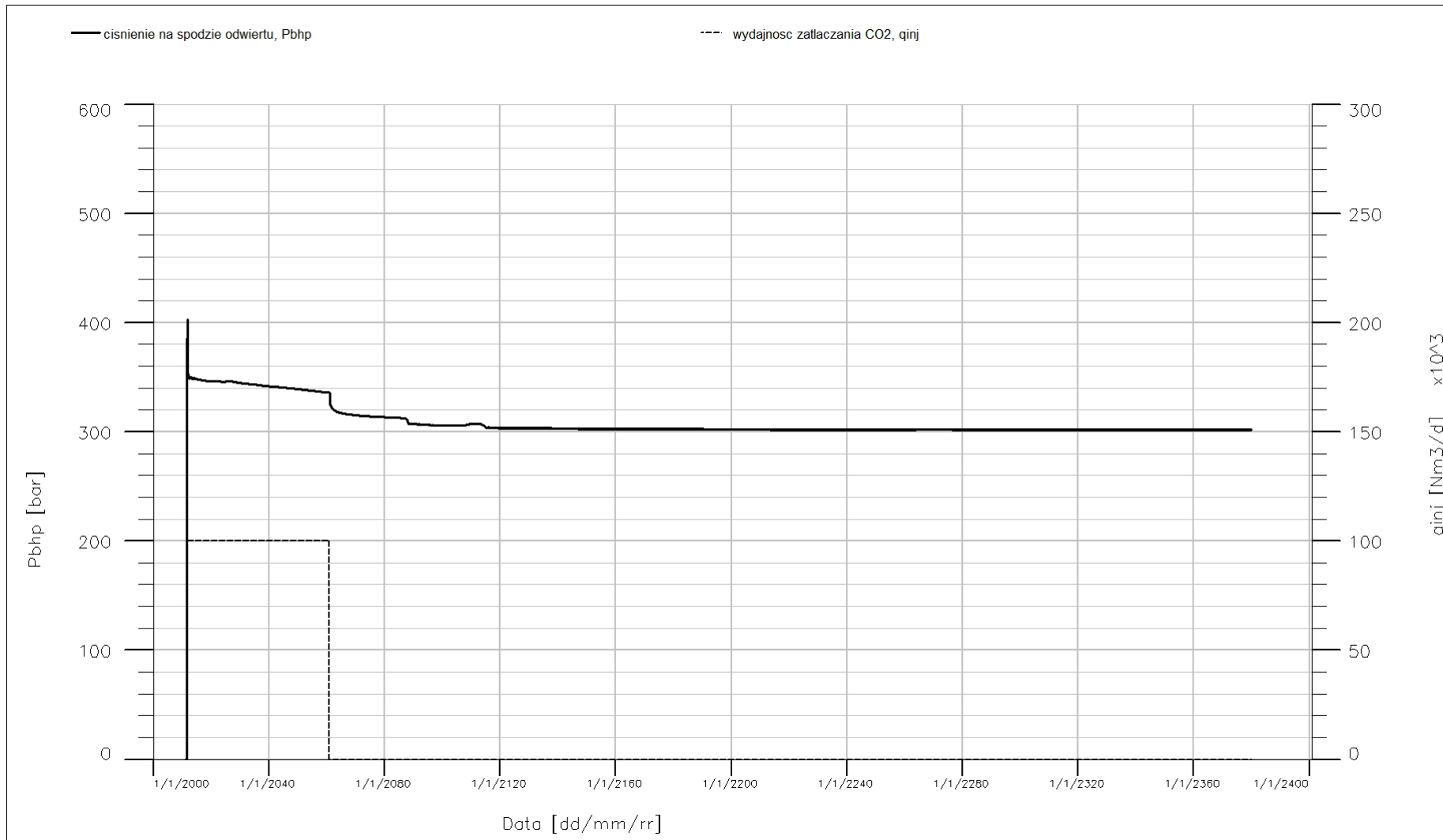


Fig. 1.1.16_189 Struktura Niecki Poznańskiej. Wariant I. Odwiert Sątopy-1. Ciśnienie na spodzie odwiertu, P_{bhp} oraz wydajność zatłaczania CO₂, q_{inj}

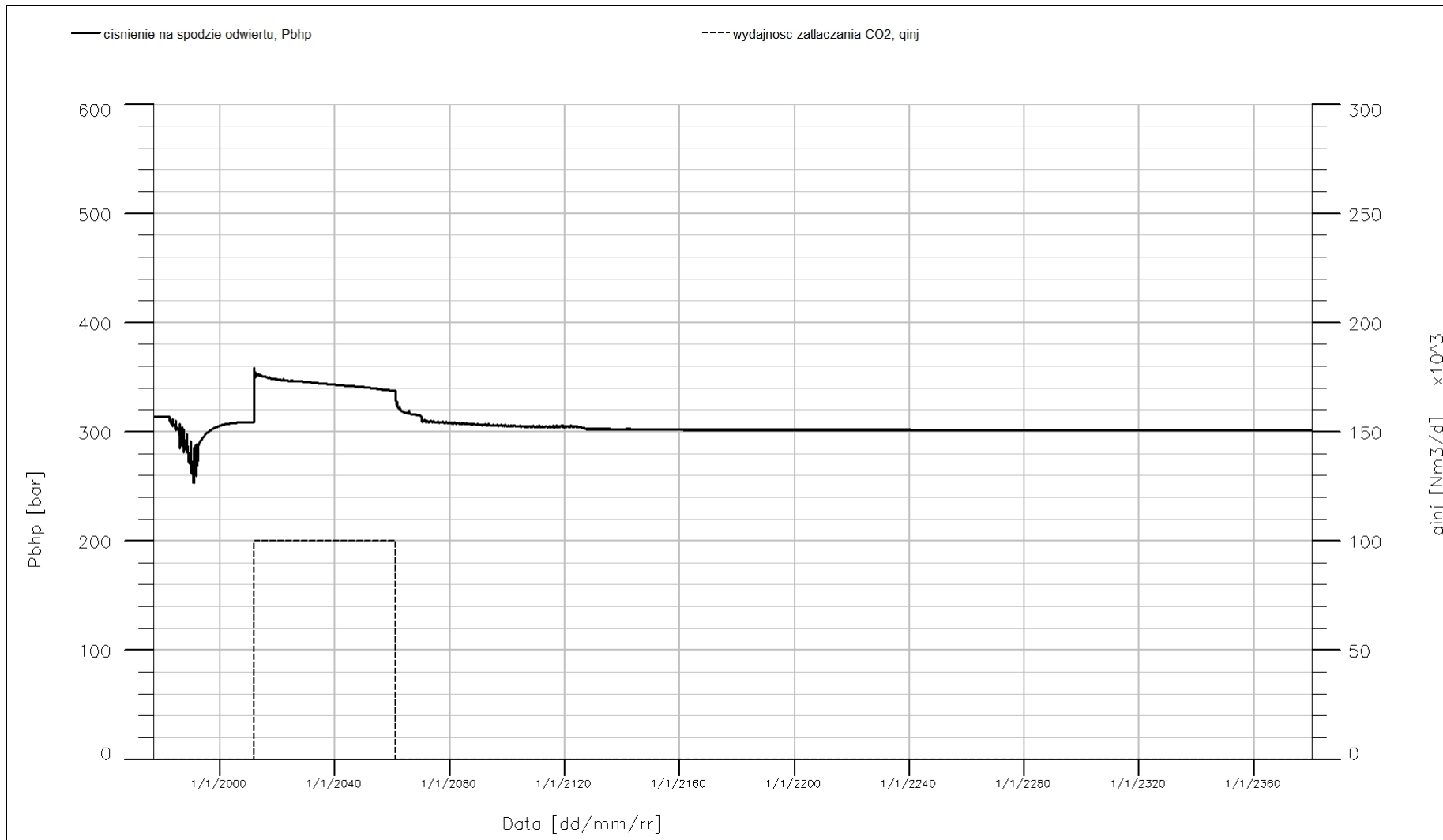


Fig. 1.1.16_190 Struktura Niecki Poznańskiej. Wariant I. Odwiert Sątopy-2. Ciśnienie na spodzie odwiertu, P_{bhp} oraz wydajność zatłaczania CO_2 , q_{inj}

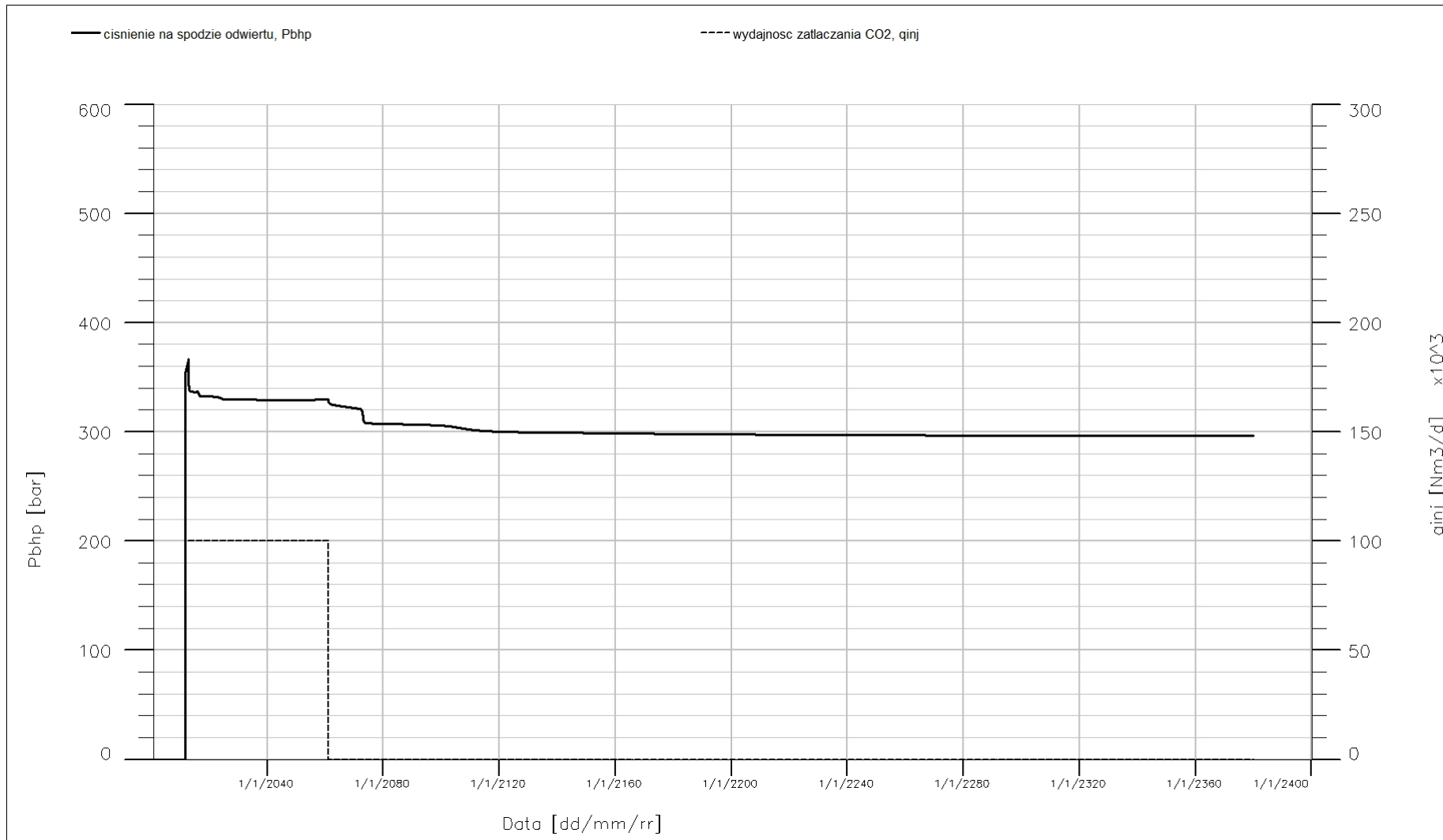


Fig. 1.1.16_191 Struktura Niecki Poznańskiej. Wariant I. Odwiert Bukowiec-2. Ciśnienie na spodzie odwiertu, P_{bhp} oraz wydajność zatłaczania CO_2 , q_{inj}

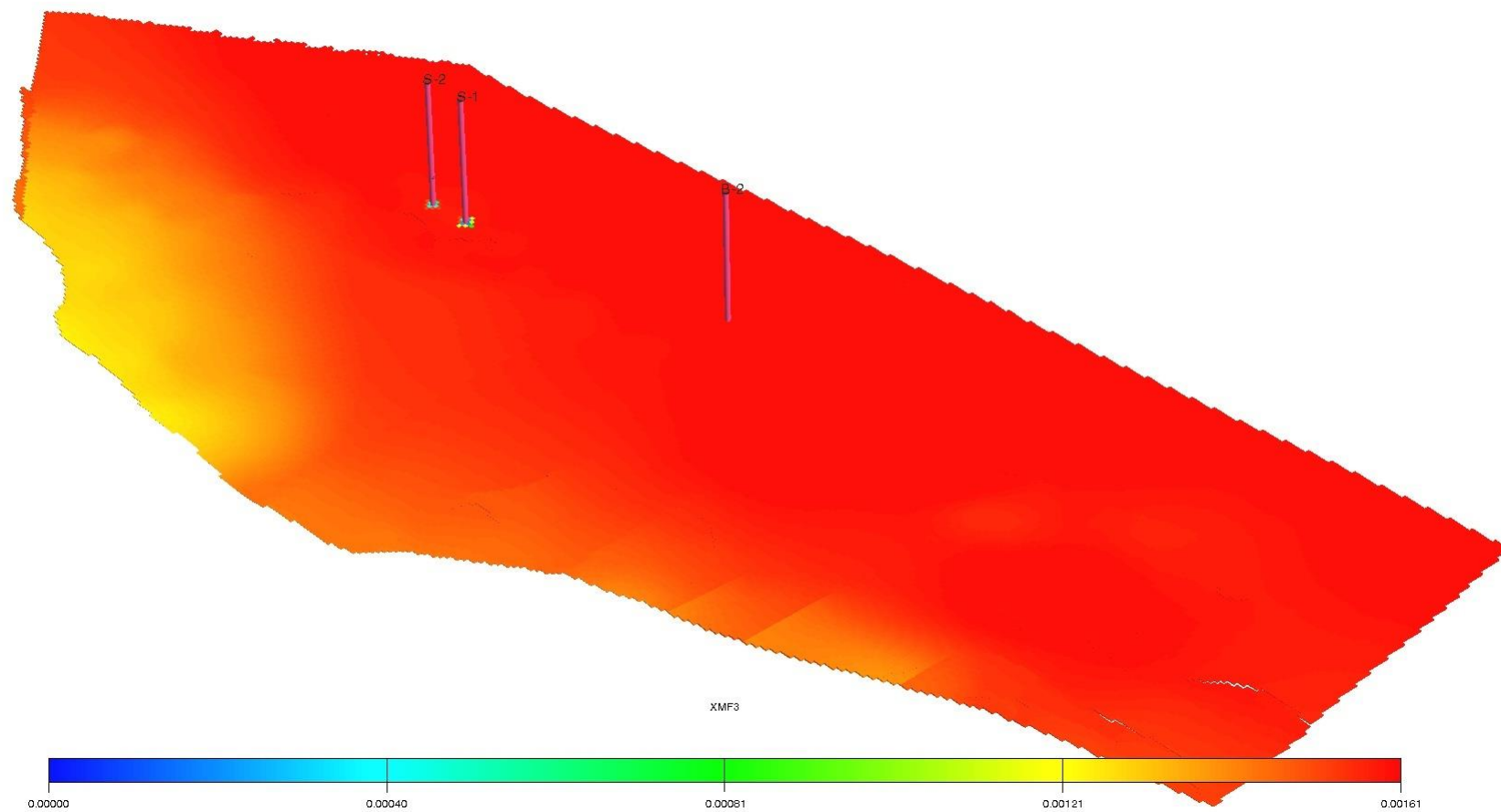


Fig. 1.1.16_192 Struktura Niecki Poznańskiej. Wariant I. Rozkład metanu rozpuszczonego w wodzie. Rozpoczęcie zatłaczania CO₂. Warstwa 10 modelu

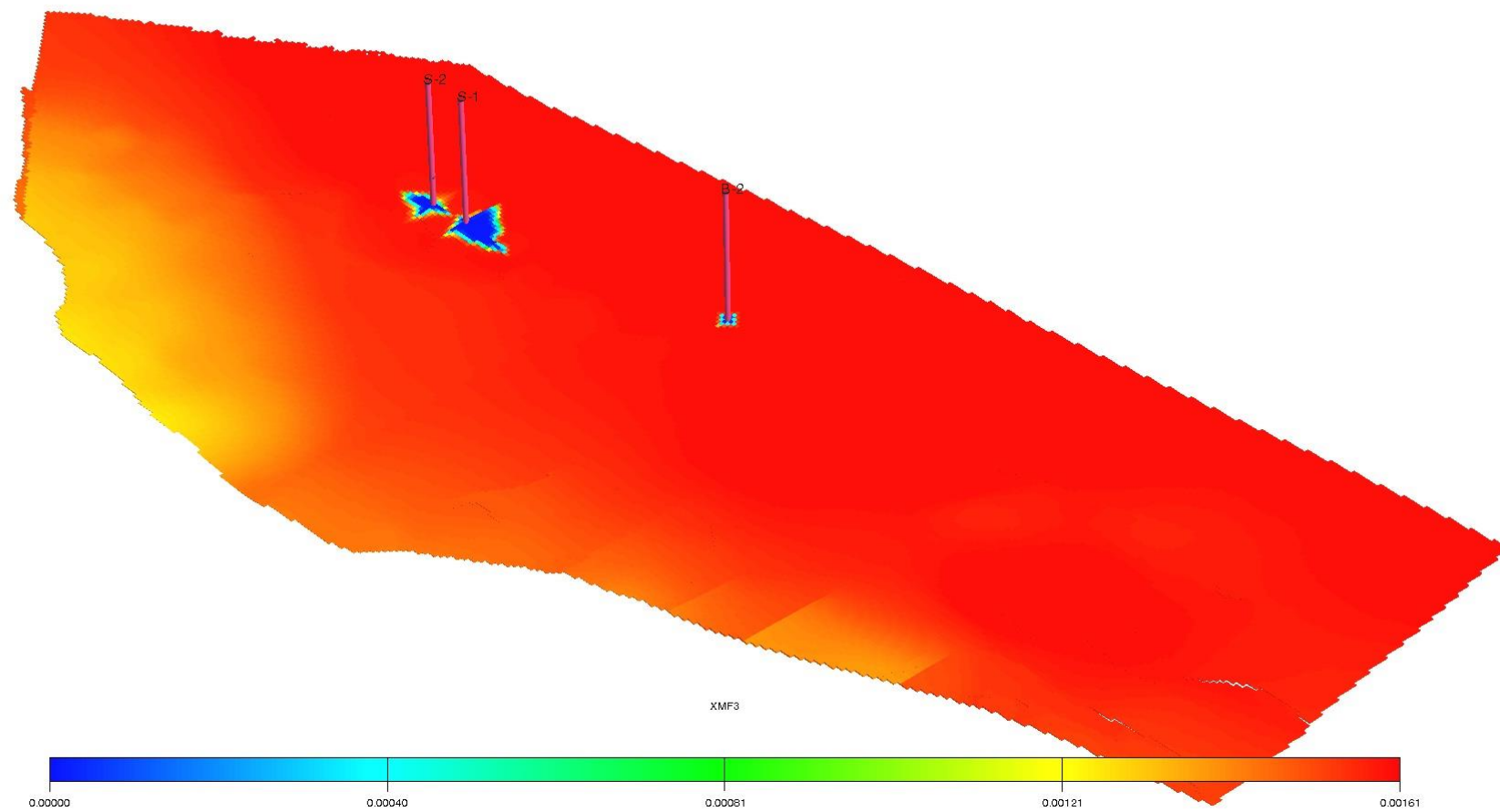


Fig. 1.1.16_193 Struktura Niecki Poznańskiej. Wariant I. Rozkład metanu rozpuszczonego w wodzie po dziesięciu latach zatłaczania CO₂. Warstwa 10 modelu

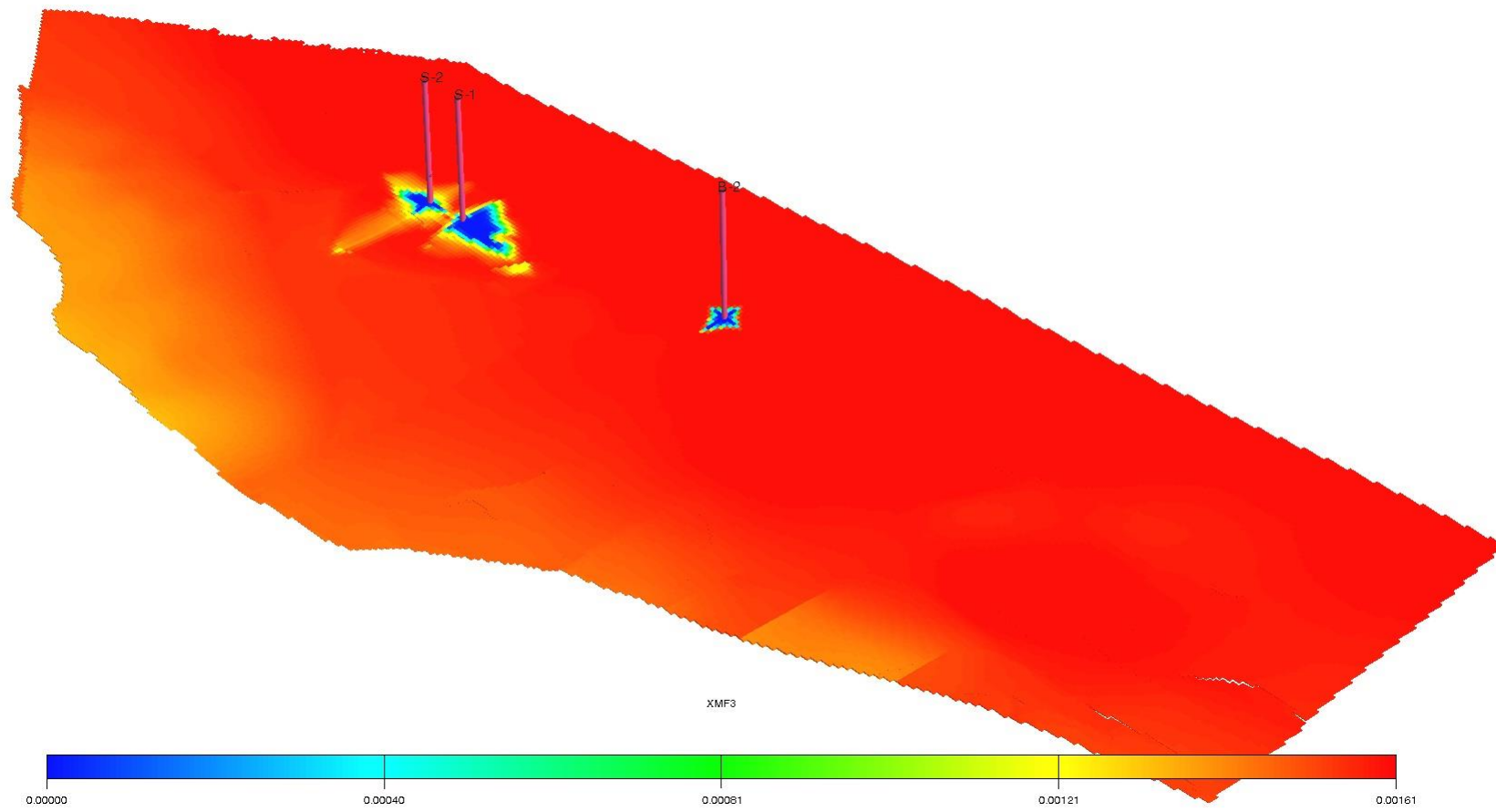


Fig. 1.1.16_194 Struktura Niecki Poznańskiej. Wariant I. Rozkład metanu rozpuszczonego w wodzie po zakończeniu zatłaczania CO₂. Warstwa 10 modelu

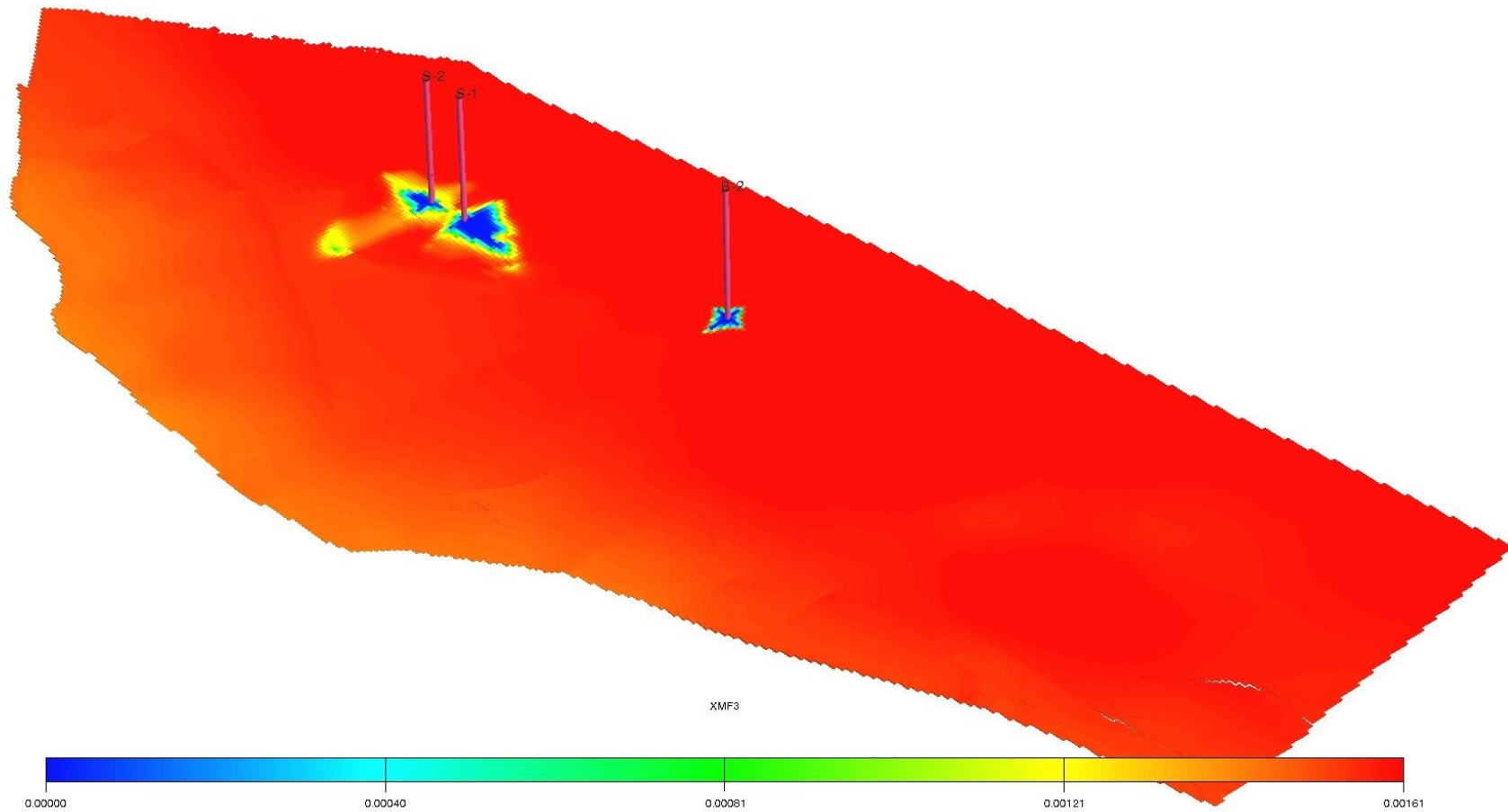


Fig. 1.1.16_195 Struktura Niecki Poznańskiej. Wariant I. Rozkład metanu rozpuszczonego w wodzie 300 lat po relaksacji. Warstwa 10 modelu

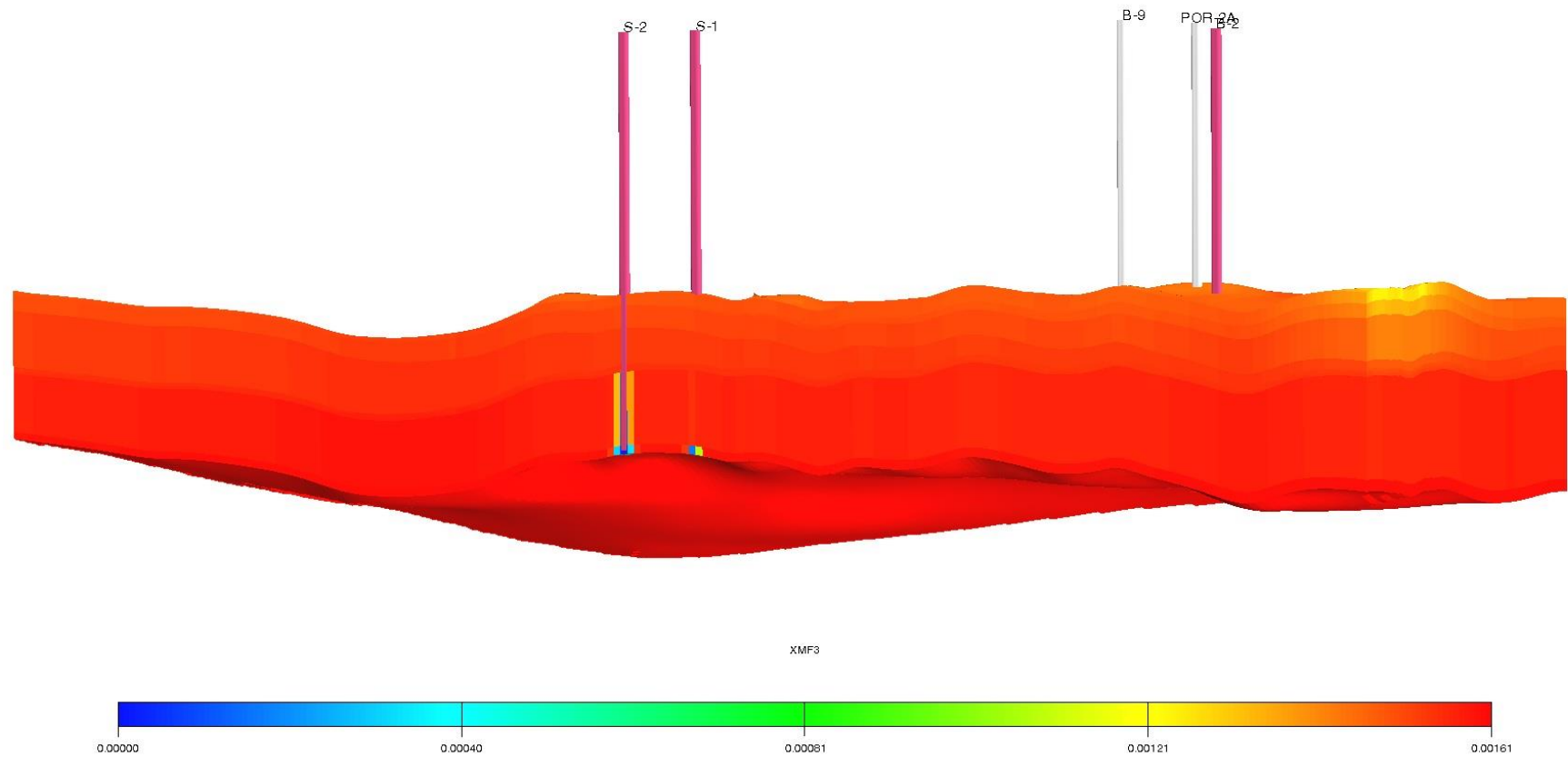


Fig. 1.1.16_196 Struktura Niecki Poznańskiej. Wariant I. Rozkład metanu rozpuszczonego w wodzie. Rozpoczęcie zatłaczania CO₂.
Przekrój od południa w rejonie złóż Sątopy i Porażyn

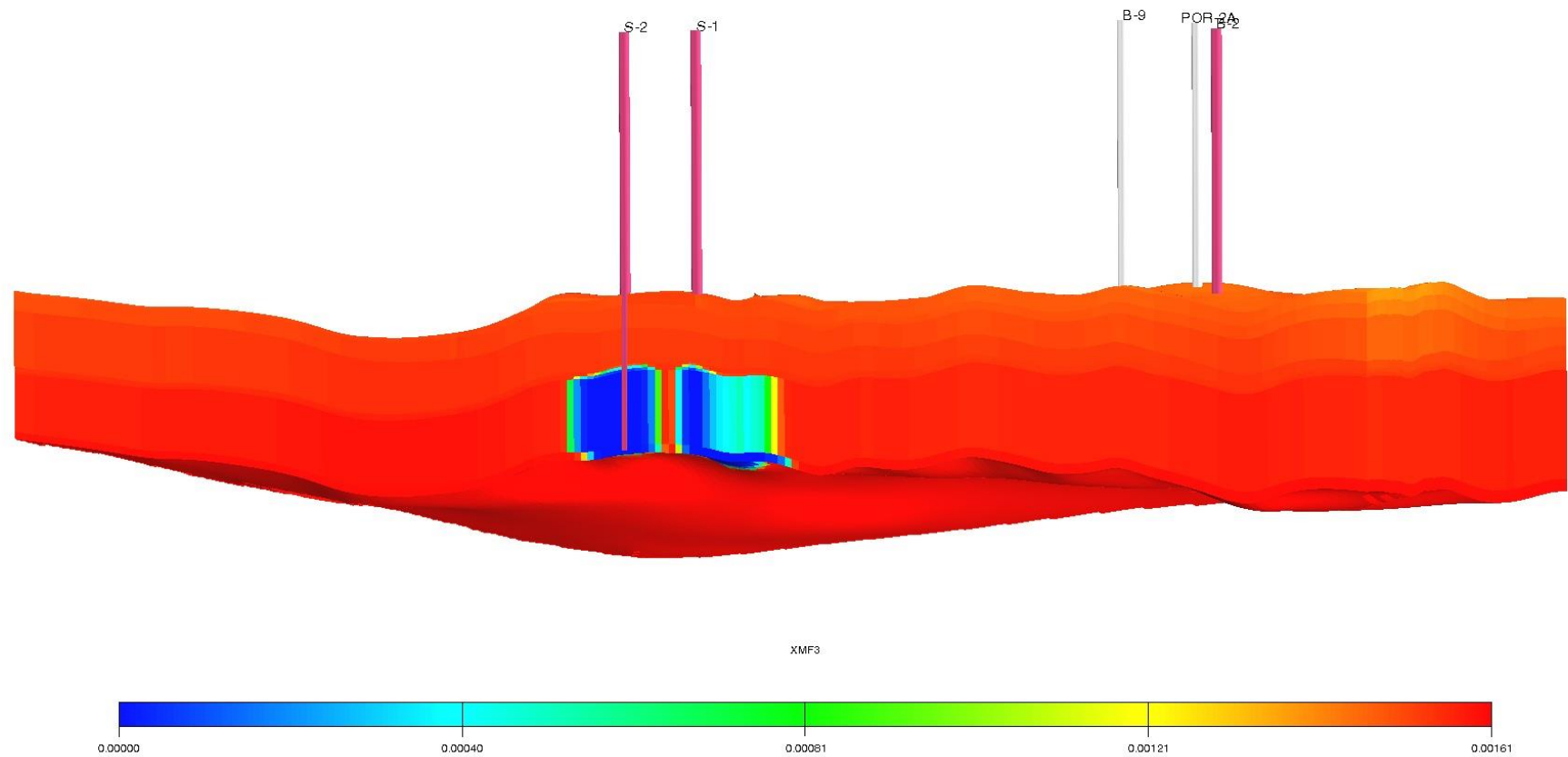


Fig. 1.1.16_197 Struktura Niecki Poznańskiej. Wariant I. Rozkład metanu rozpuszczonego w wodzie po dziesięciu latach zatłaczania CO₂. Przekrój od południa w rejonie złóż Sątopy i Porażyn

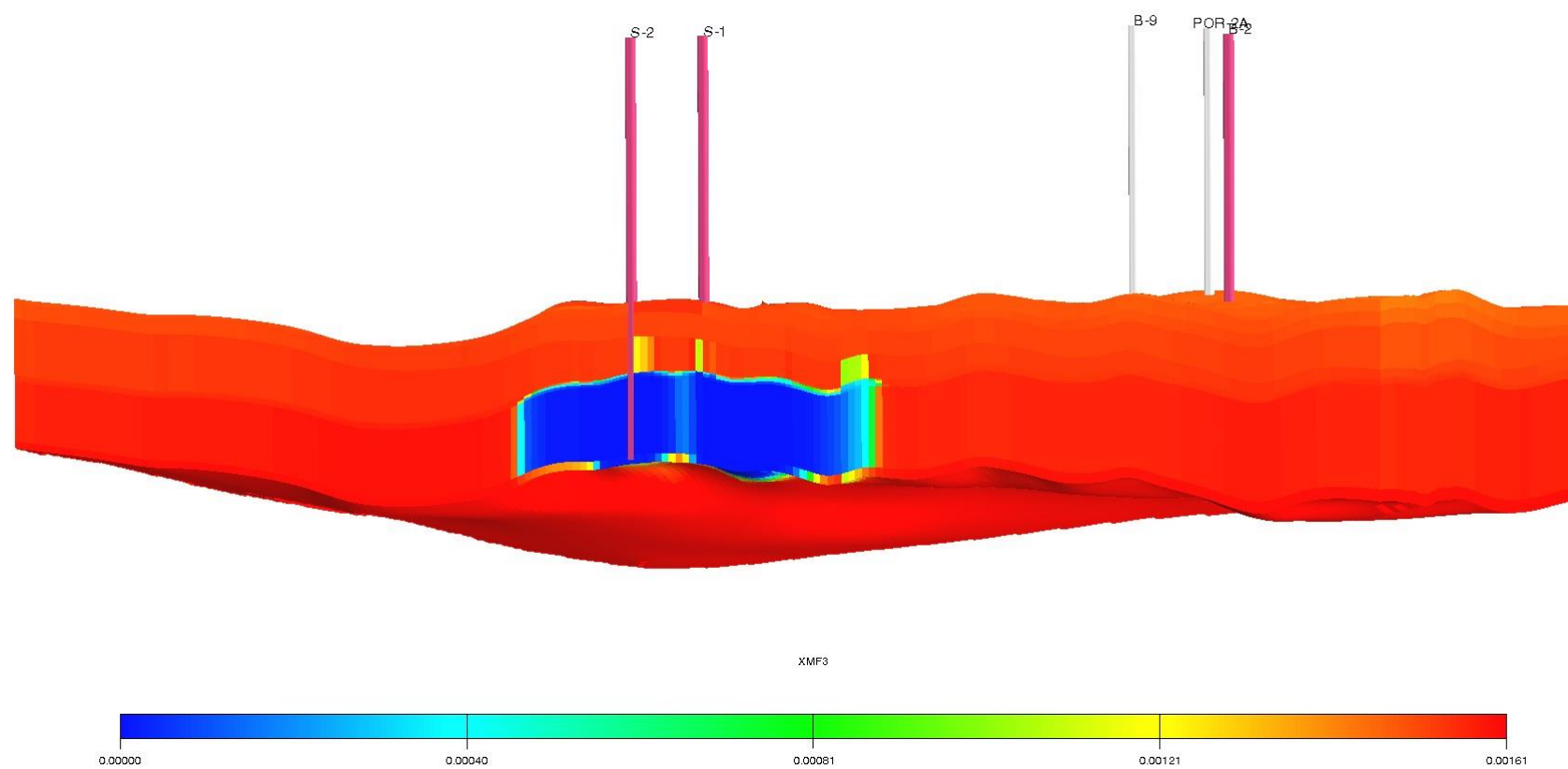


Fig. 1.1.16_198 Struktura Niecki Poznańskiej. Wariant I. Rozkład metanu rozpuszczonego w wodzie na zakończenie zatłaczania CO₂.
Przekrój od południa w rejonie złóż Sątopy i Porażyn

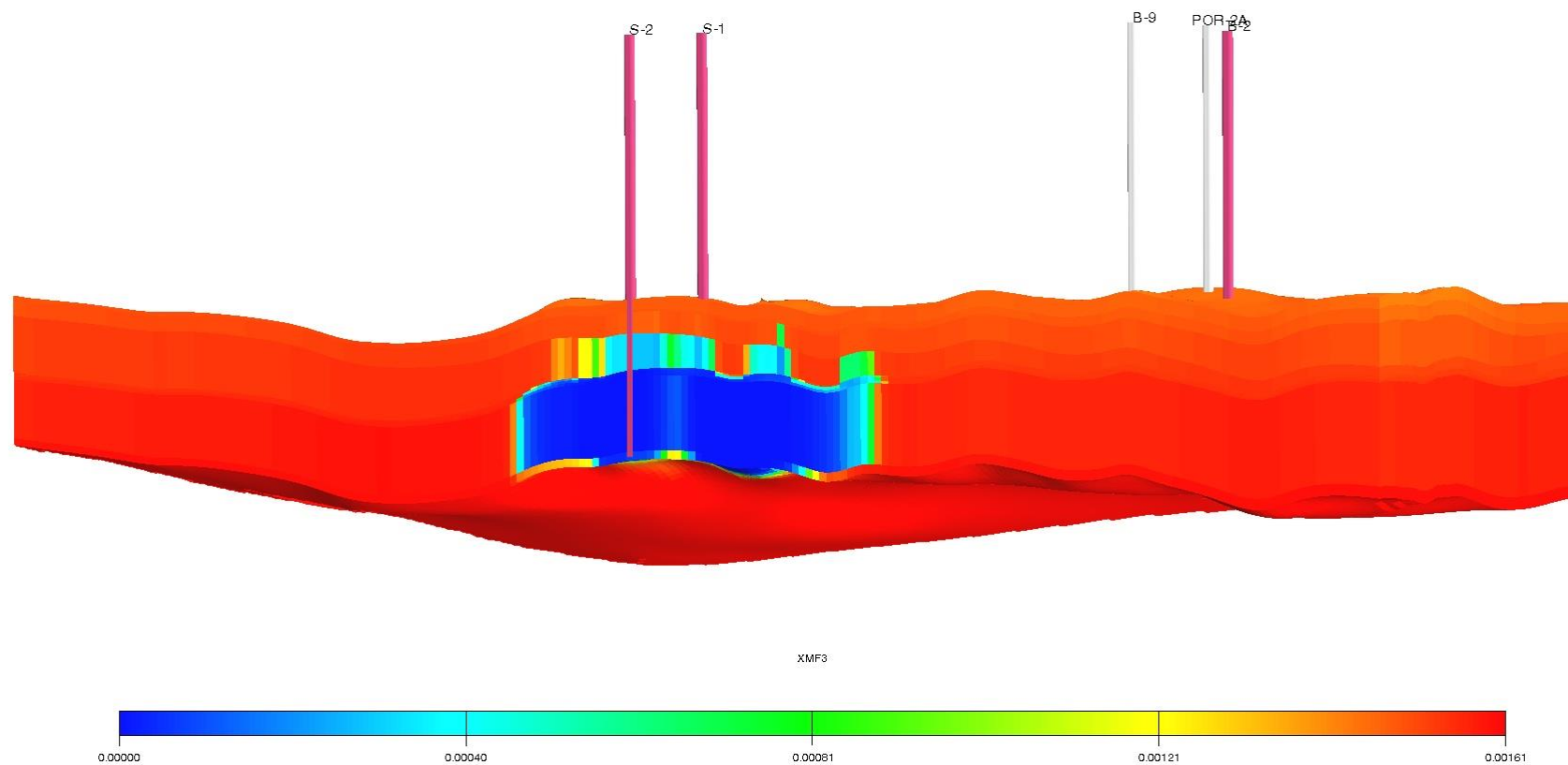


Fig. 1.1.16_199 Struktura Niecki Poznańskiej. Wariant I. Rozkład metanu rozpuszczonego w wodzie 300 lat po zatłoczeniu CO₂.
Przekrój od południa w rejonie złóż Sątopy i Porążyn

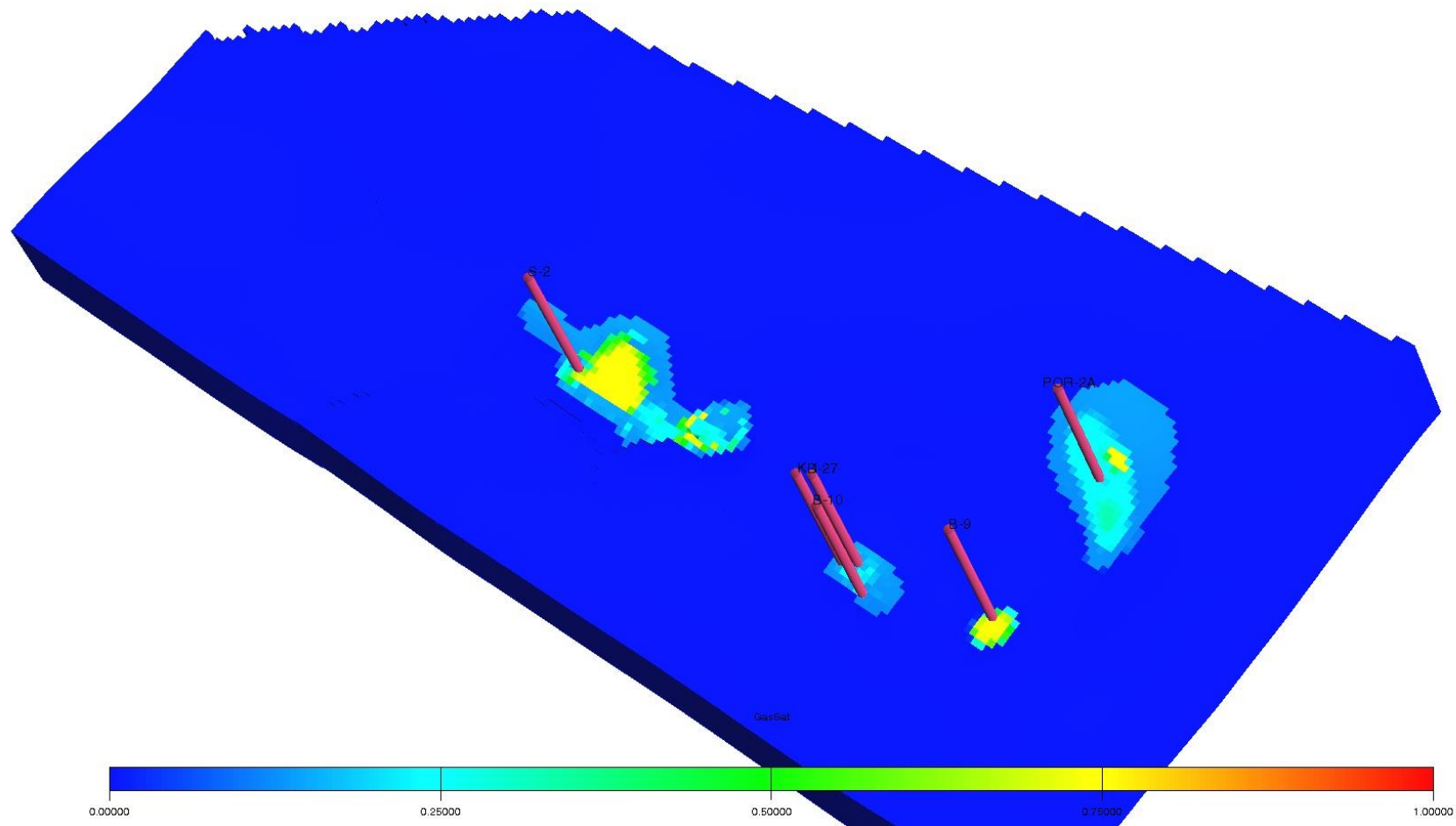


Fig. 1.1.16_200 Struktura Niecki Poznańskiej. Wariant I. Nasylenie gazem przed zatłaczaniem CO₂

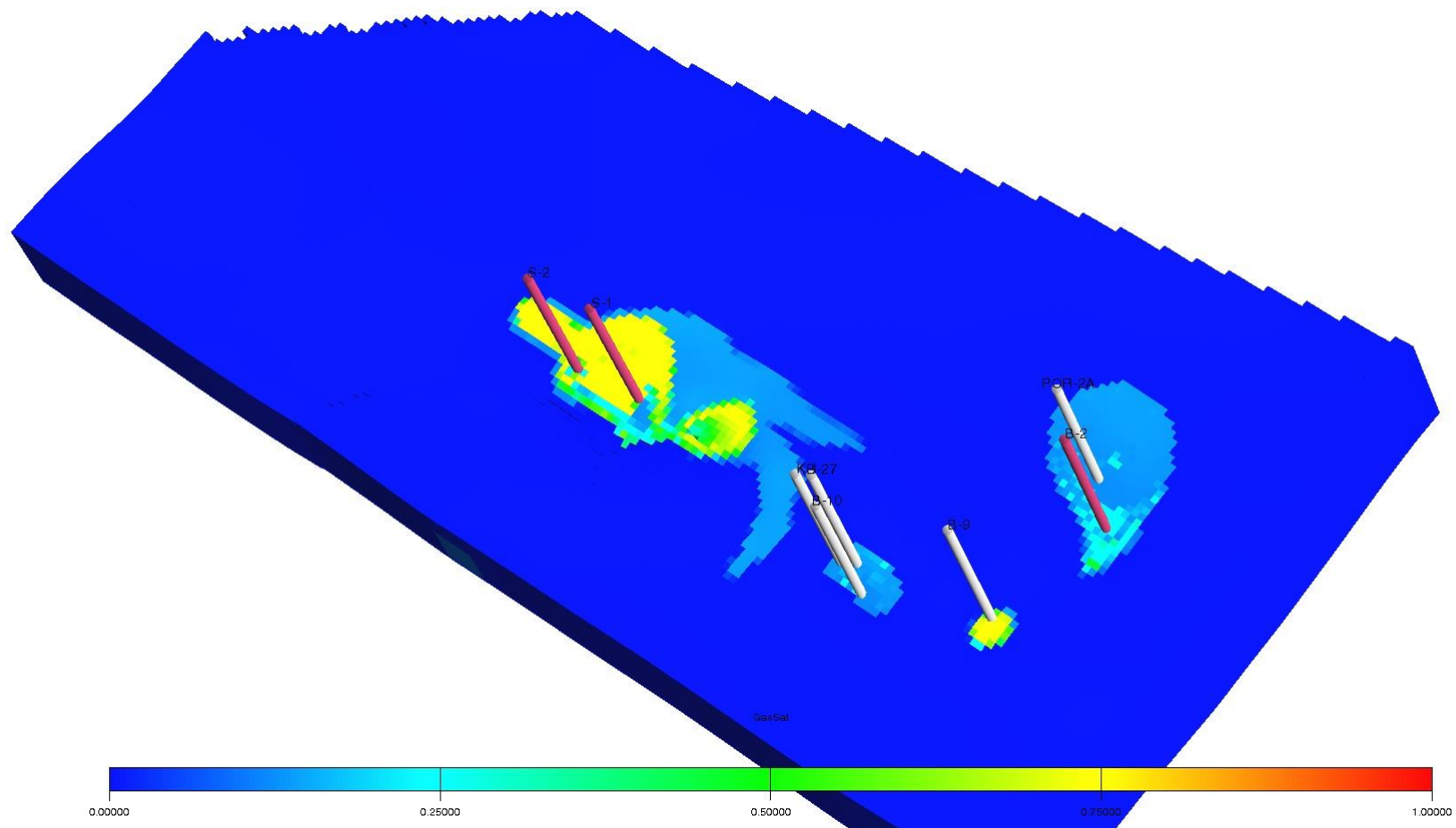


Fig. 1.1.16_201 Struktura Niecki Poznańskiej. Wariant I. Nasylenie gazem po relaksacji struktury

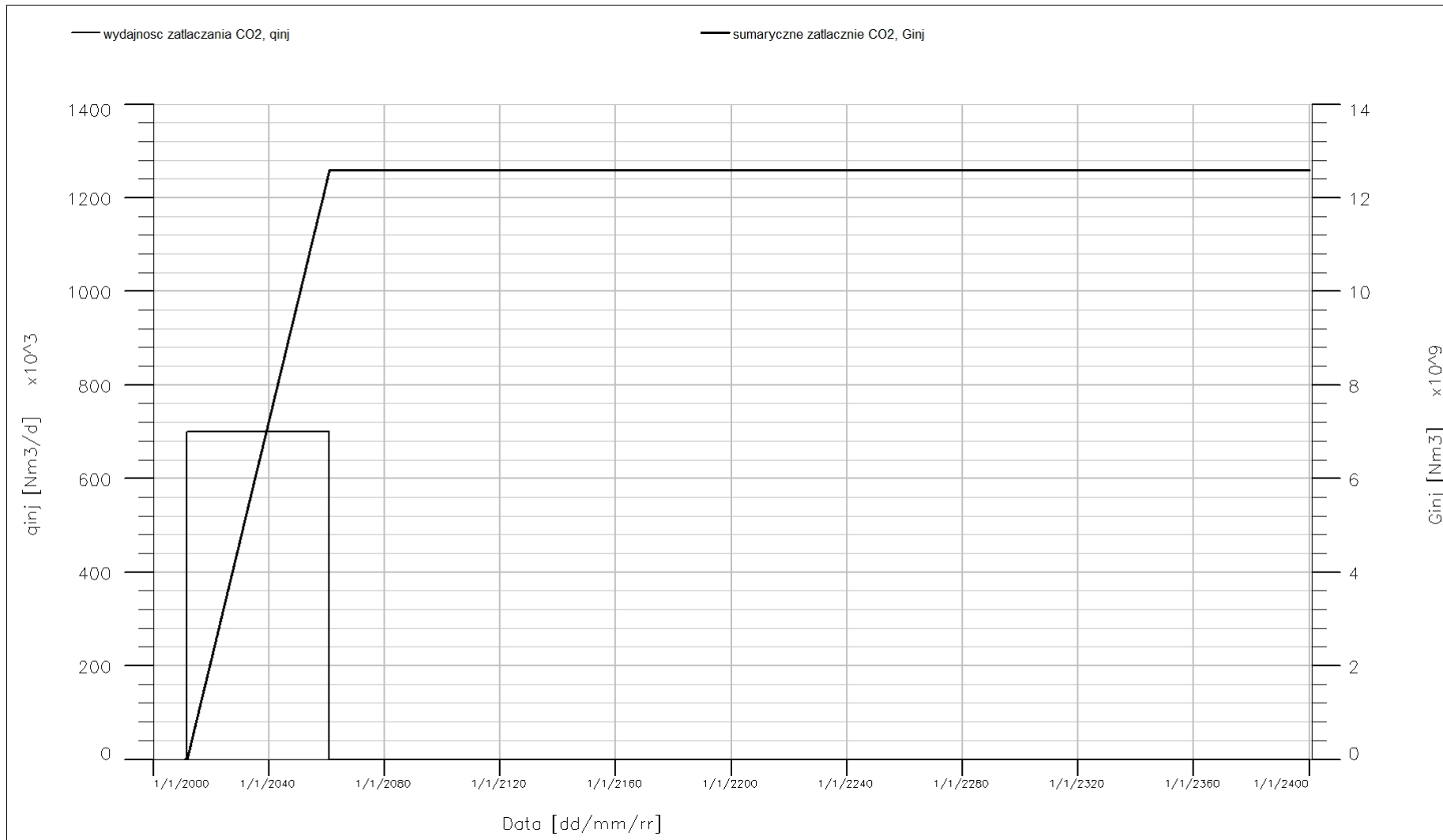


Fig. 1.1.16_202 Struktura Niecki Poznańskiej. Wariant II. Sumaryczne zatłaczanie oraz wydajność zatłaczania CO₂ do struktury 16-215

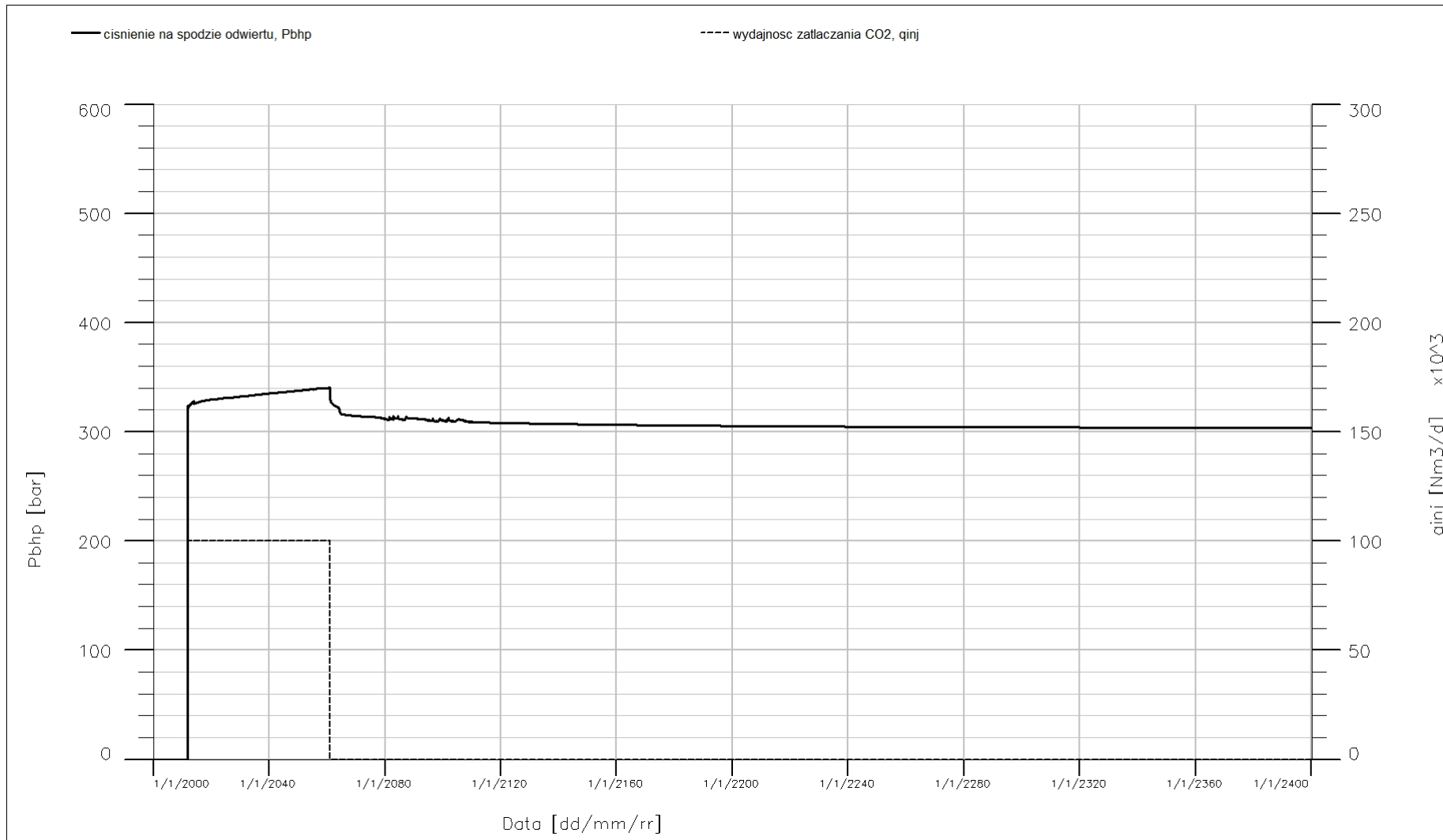


Fig. 1.1.16_203 Struktura Niecki Poznańskiej. Wariant II. Odwiert Bukowiec-2. Ciśnienie na spodzie odwiertu, P_{bhp} oraz wydajność zatłaczania CO_2 , q_{inj}

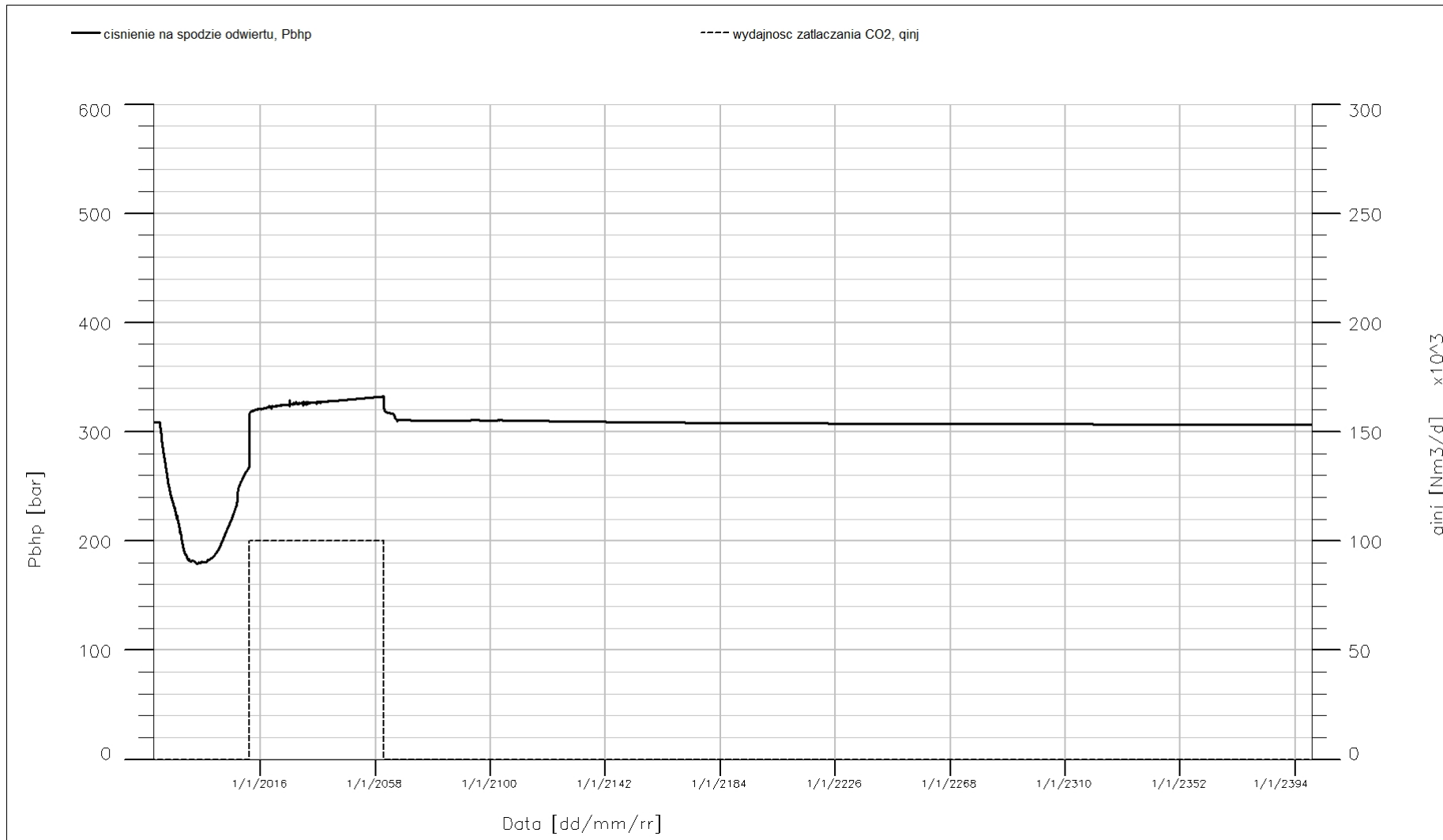


Fig. 1.1.16_204 Struktura Niecki Poznańskiej. Wariant II. Odwiert Bukowiec-3. Ciśnienie na spodzie odwiertu, P_{bhp} oraz wydajność zatłaczania CO_2 , q_{inj}

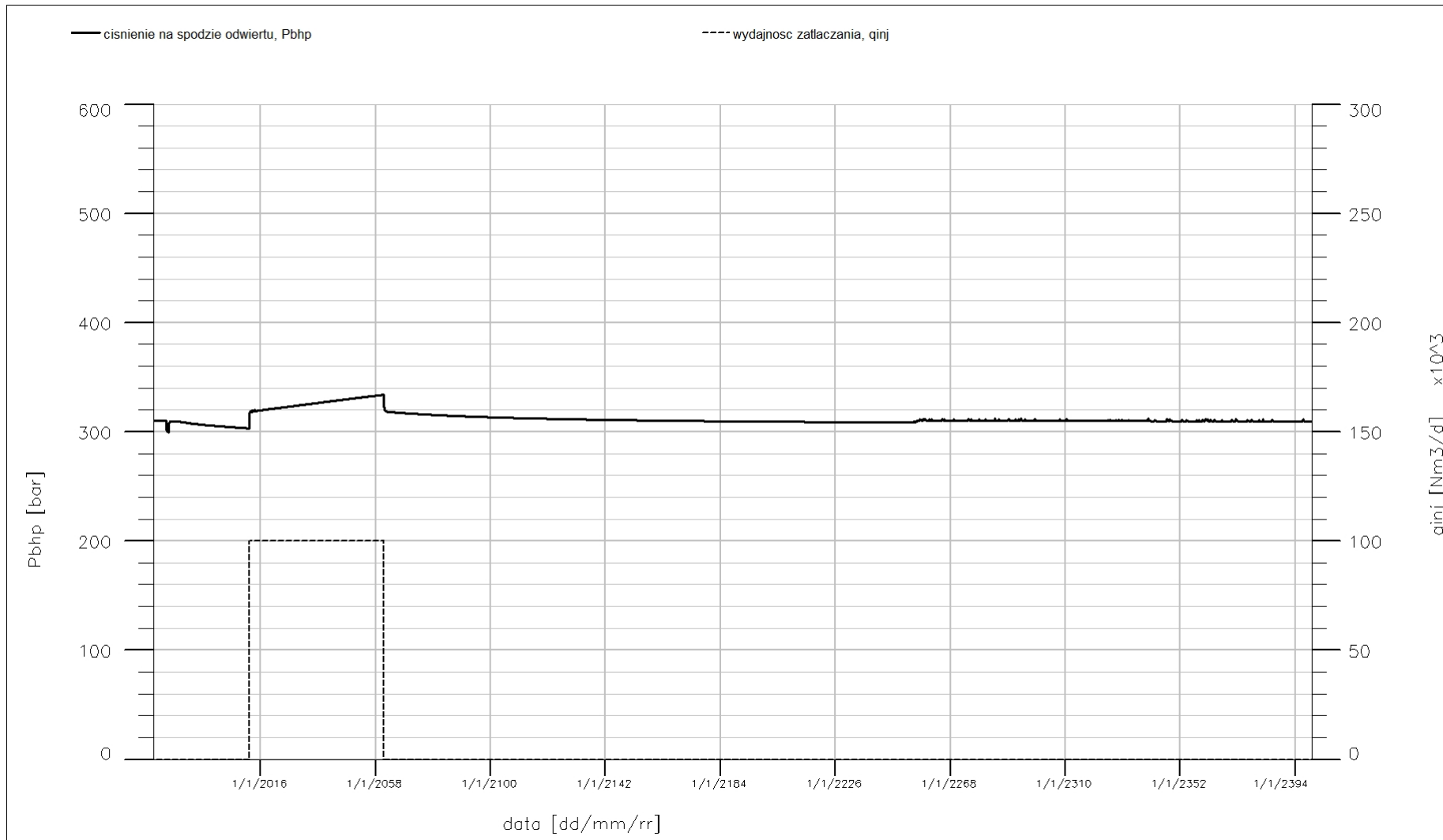


Fig. 1.1.16_205 Struktura Niecki Poznańskiej. Wariant II. Odwiert Bukowiec-9. Ciśnienie na spodzie odwiertu, P_{bhp} oraz wydajność zatłaczania CO_2 , q_{inj}

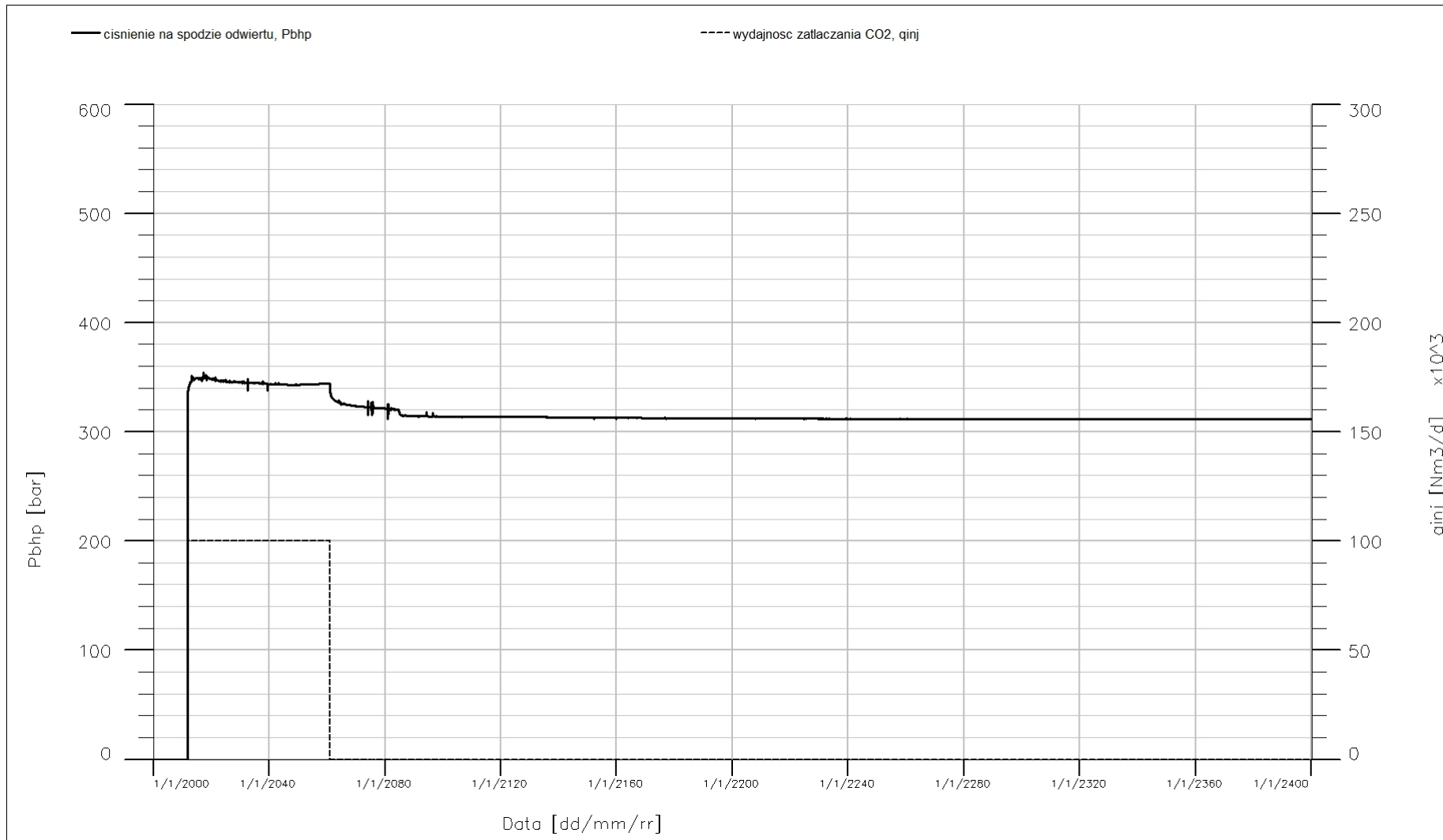


Fig. 1.1.16_206 Struktura Niecki Poznańskiej. Wariant II. Odwiert Sątopy-1. Ciśnienie na spodzie odwiertu, P_{bhp} oraz wydajność zatłaczania CO_2 , q_{inj}

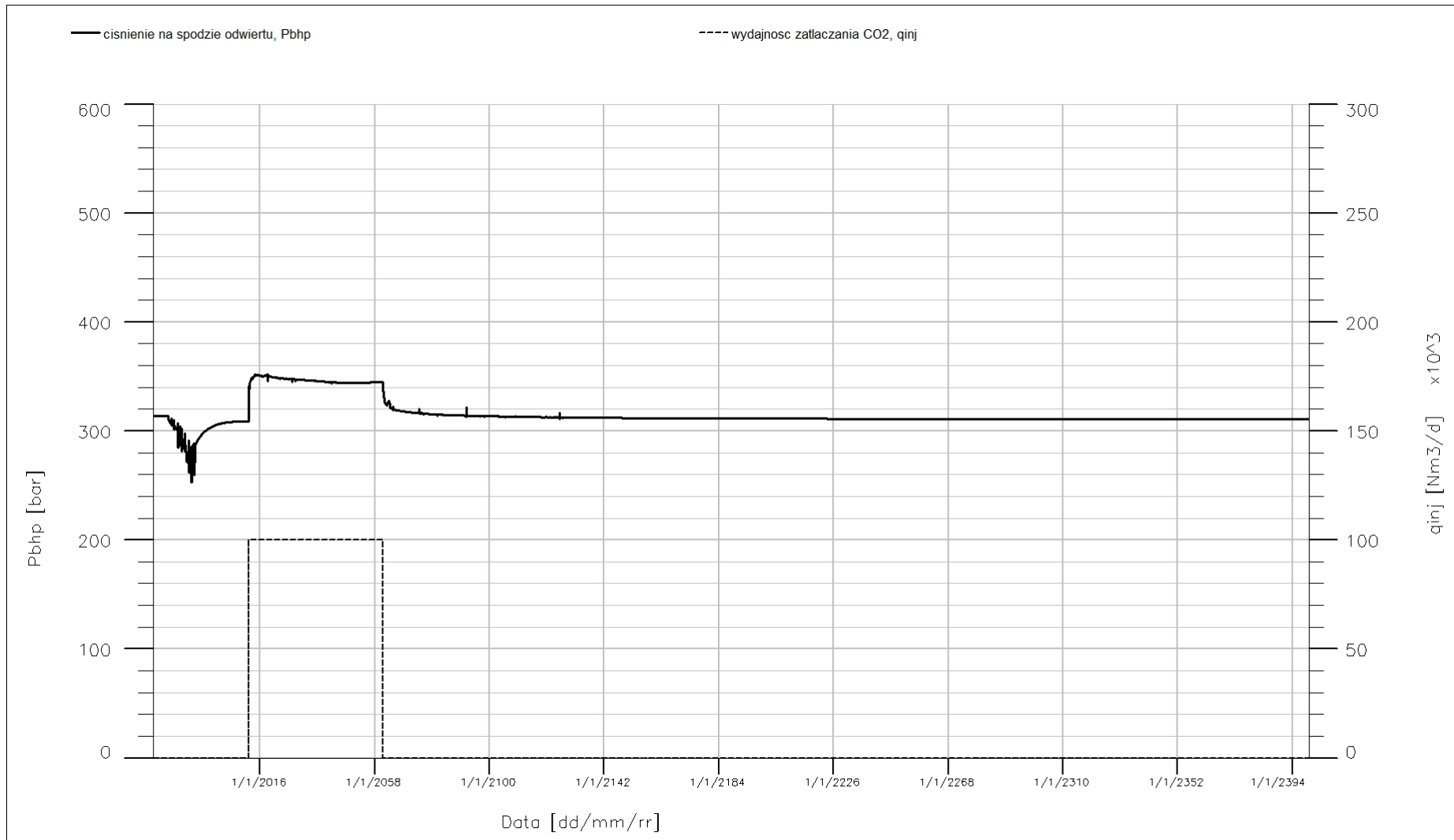


Fig. 1.1.16_207 Struktura Niecki Poznańskiej. Wariant II. Odwiert Sątopy-2. Ciśnienie na spodzie odwiertu, P_{bhp} oraz wydajność zatłaczania CO_2 , q_{inj}
16-220

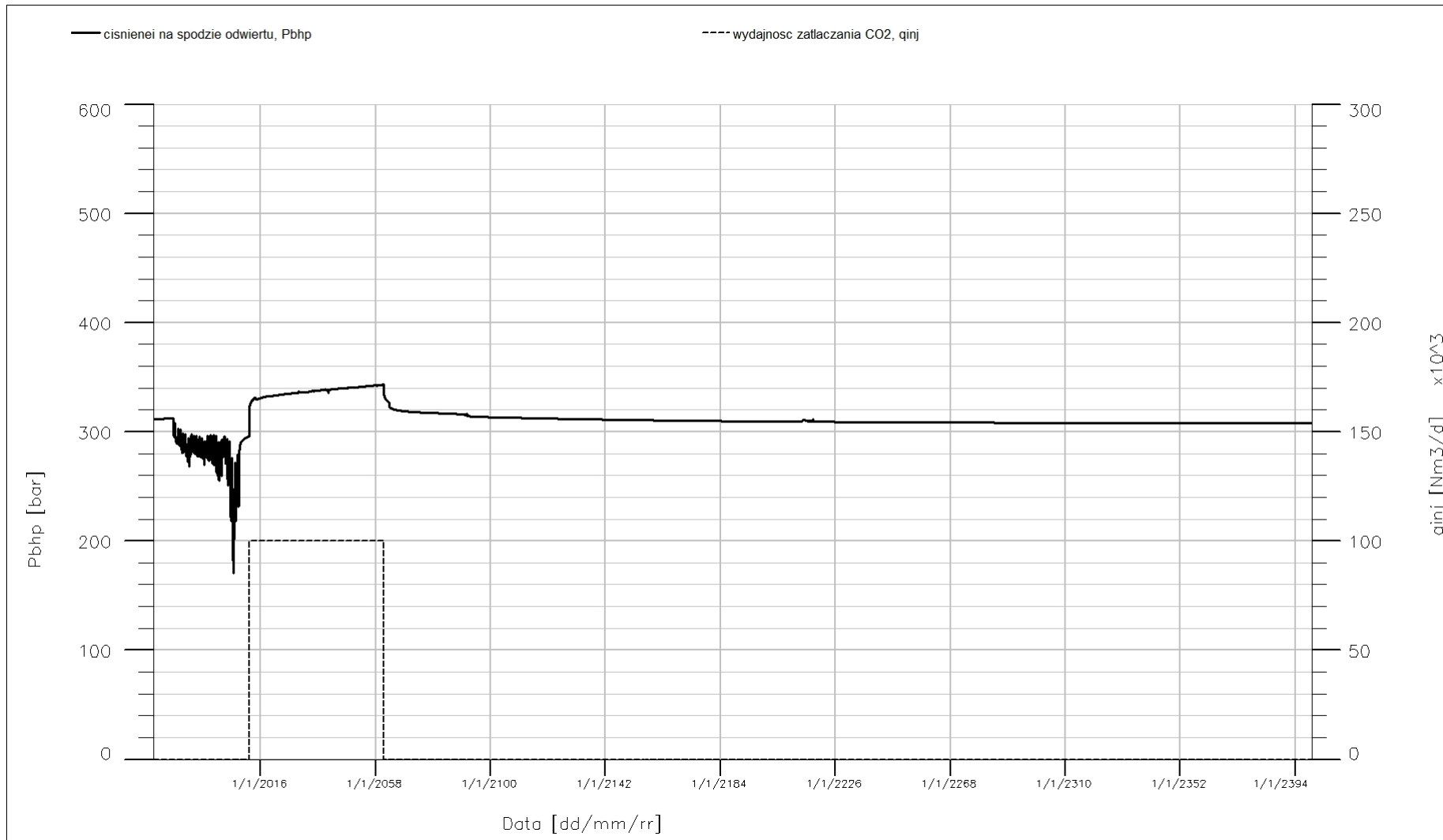


Fig. 1.1.16_208 Struktura Niecki Poznańskiej. Wariant II. Odwiert Porążyn-2a. Ciśnienie na spodzie odwiertu, P_{bhp} oraz wydajność zatłaczania CO_2 , q_{inj}

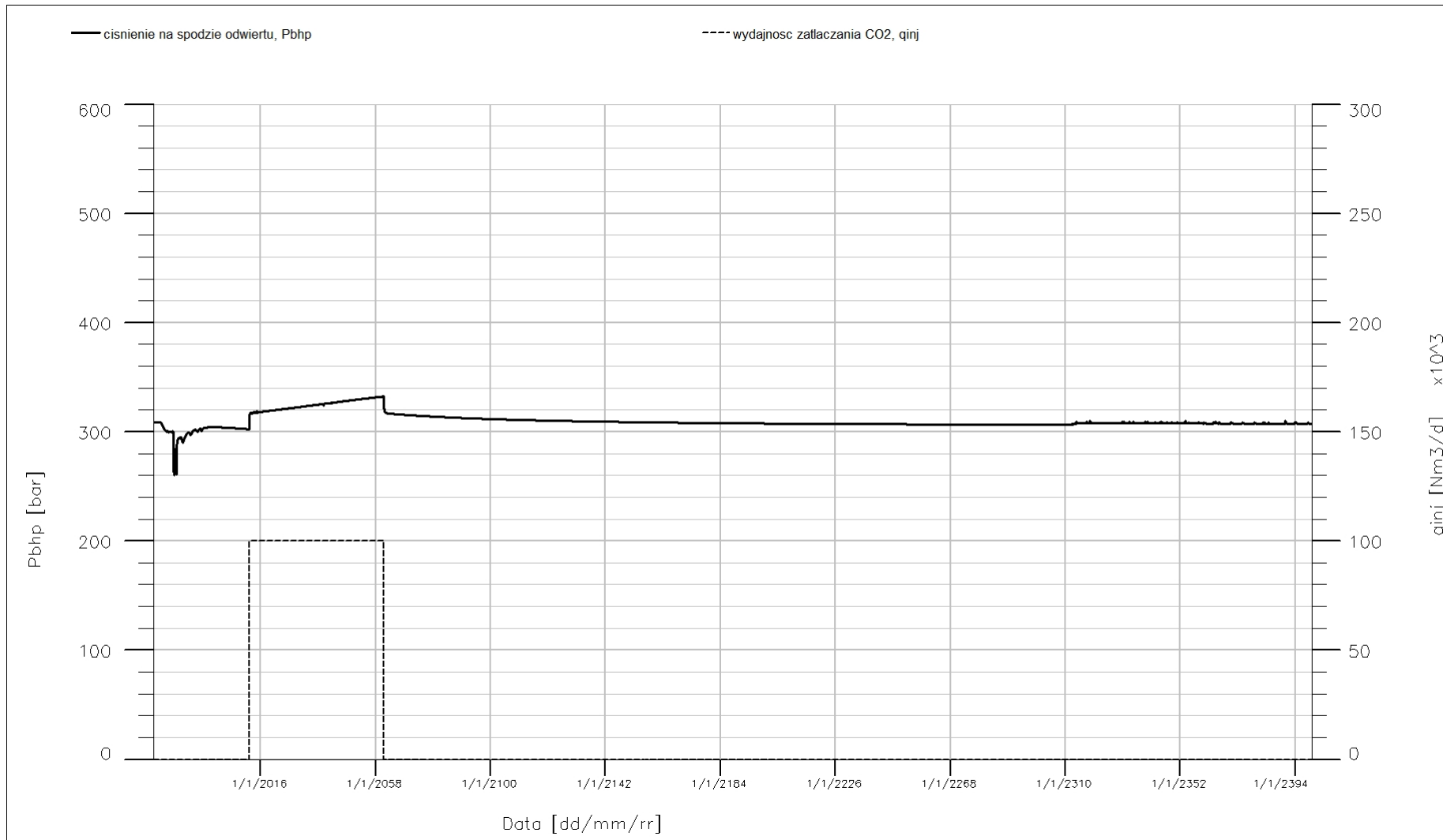


Fig. 1.1.16_209 Struktura Niecki Poznańskiej. Wariant II. Odwiert Kopanki-1. Ciśnienie na spodzie odwiertu, P_{bhp} oraz wydajność zatłaczania CO₂, q_{inj}

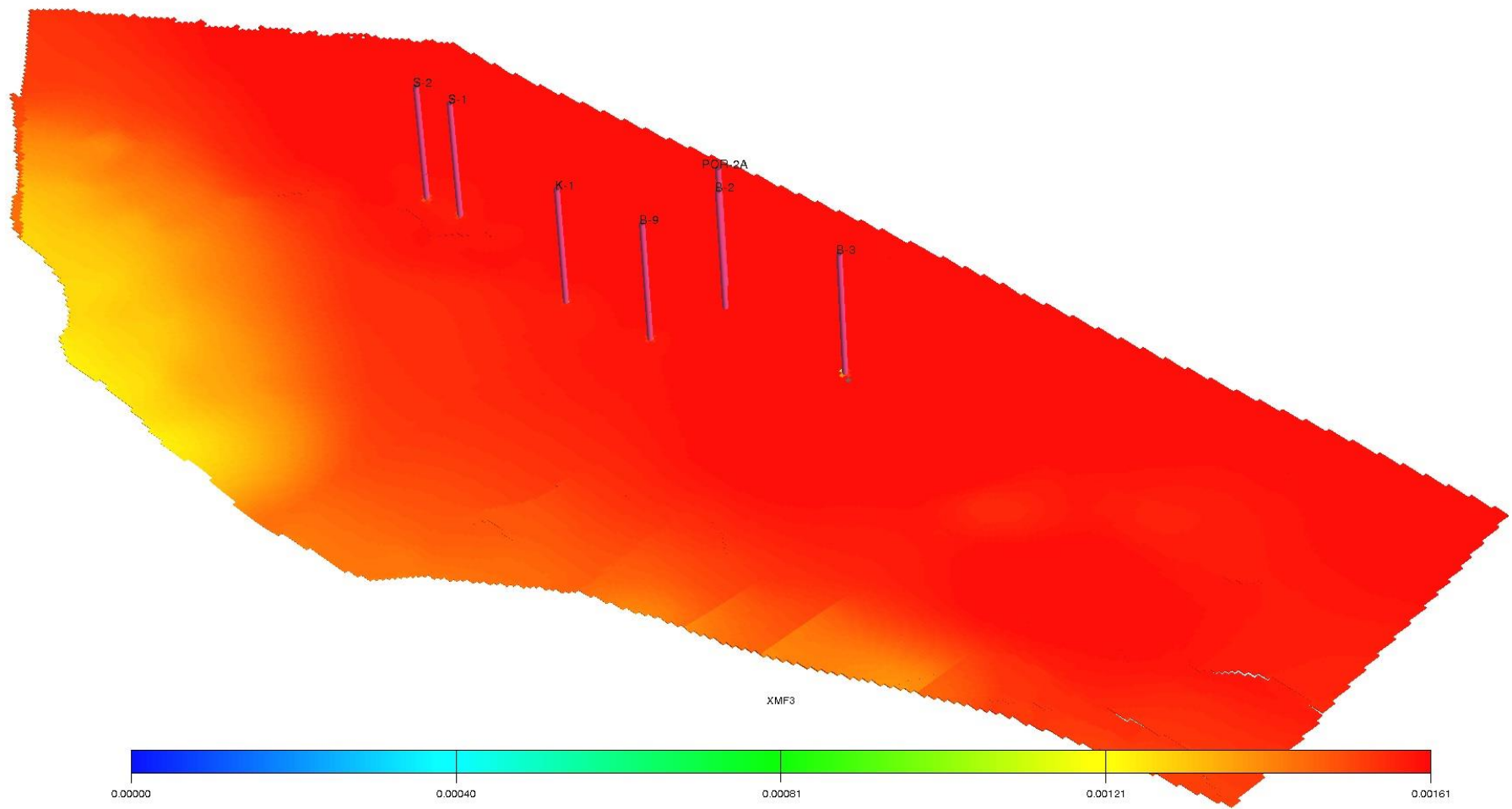


Fig. 1.1.16_210 Struktura Niecki Poznańskiej. Wariant II. Rozkład metanu rozpuszczonego w wodzie. Rozpoczęcie zatłaczania CO₂. Warstwa 10 modelu

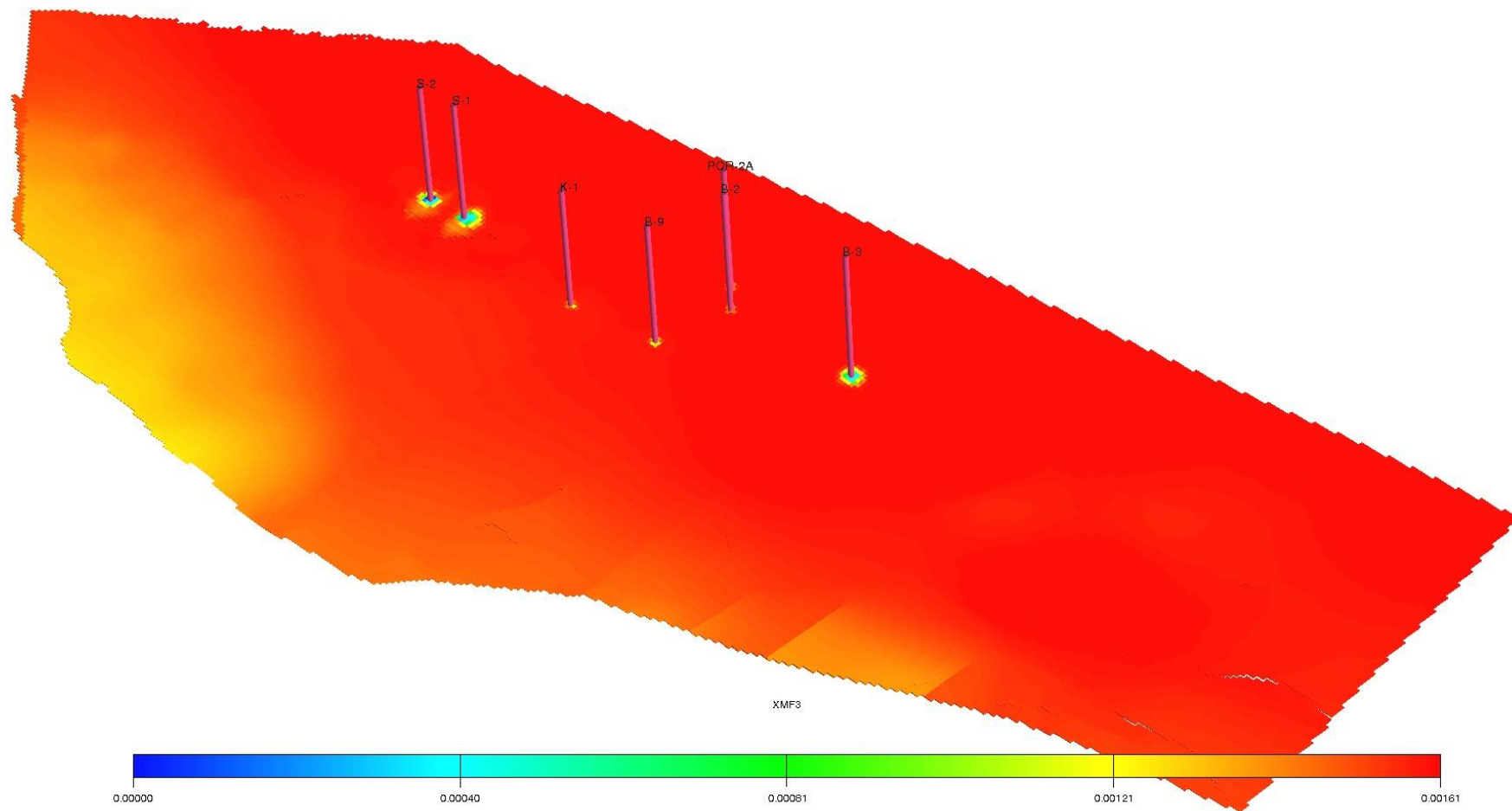


Fig. 1.1.16_211 Struktura Niecki Poznańskiej. Wariant II. Rozkład metanu rozpuszczonego w wodzie po dziesięciu latach zatłaczania CO₂. Warstwa 10 modelu

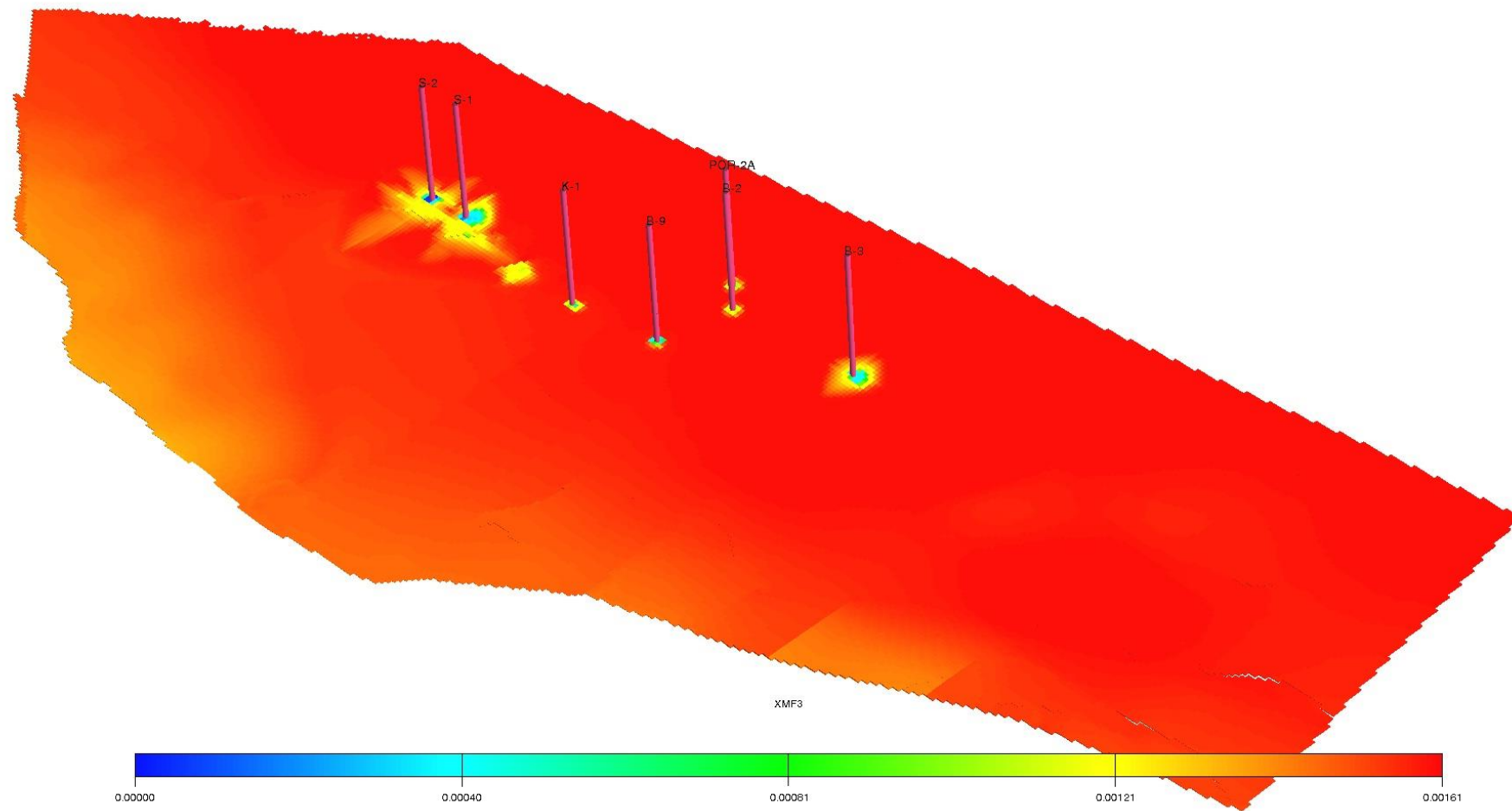


Fig. 1.1.16_212 Struktura Niecki Poznańskiej. Wariant II. Rozkład metanu rozpuszczonego w wodzie po zakończeniu zatłaczania CO₂. Warstwa 10 modelu

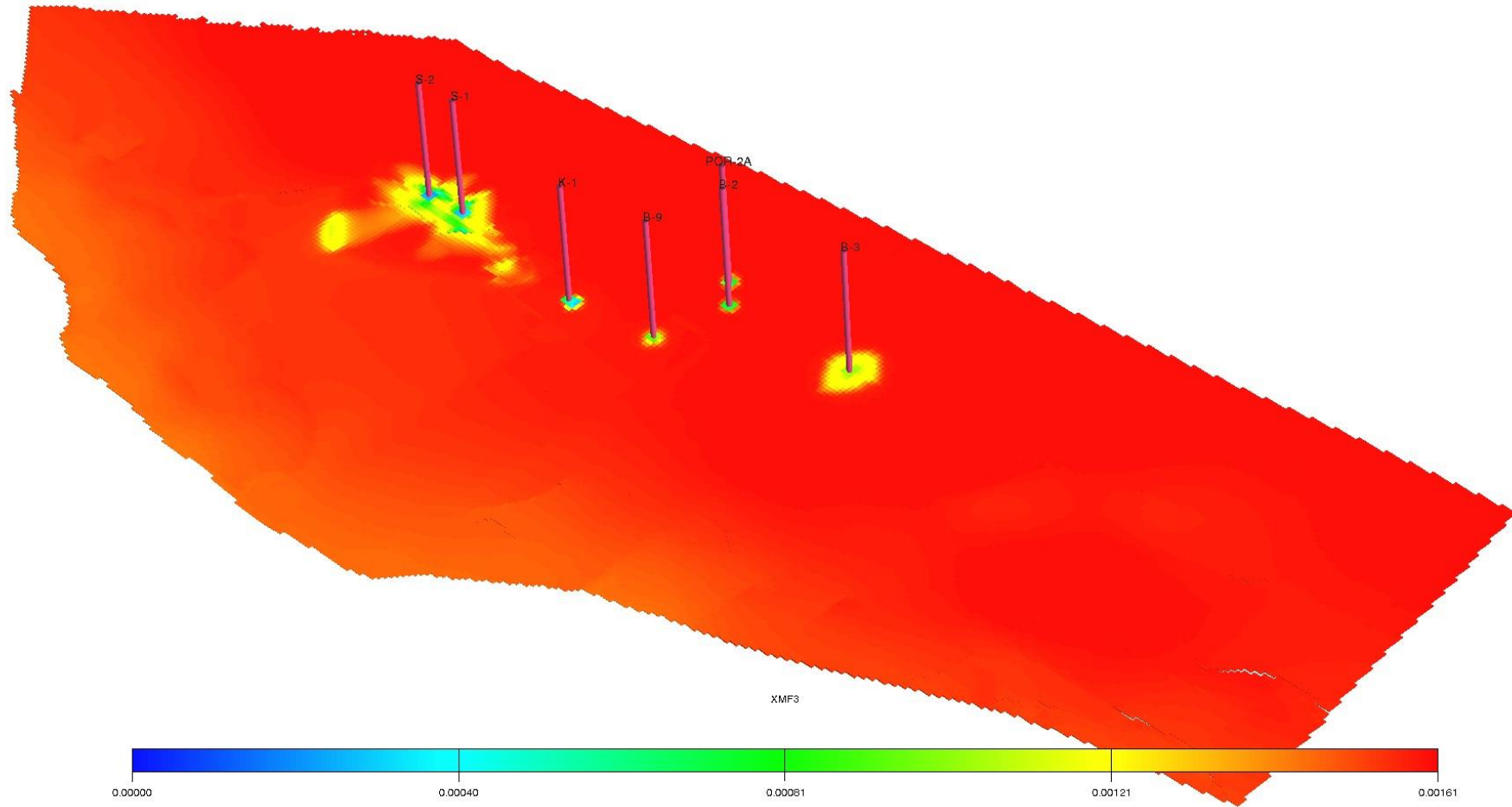


Fig. 1.1.16_213 Struktura Niecki Poznańskiej. Wariant II. Rozkład metanu rozpuszczonego w wodzie 300 lat po relaksacji. Warstwa 10 modelu

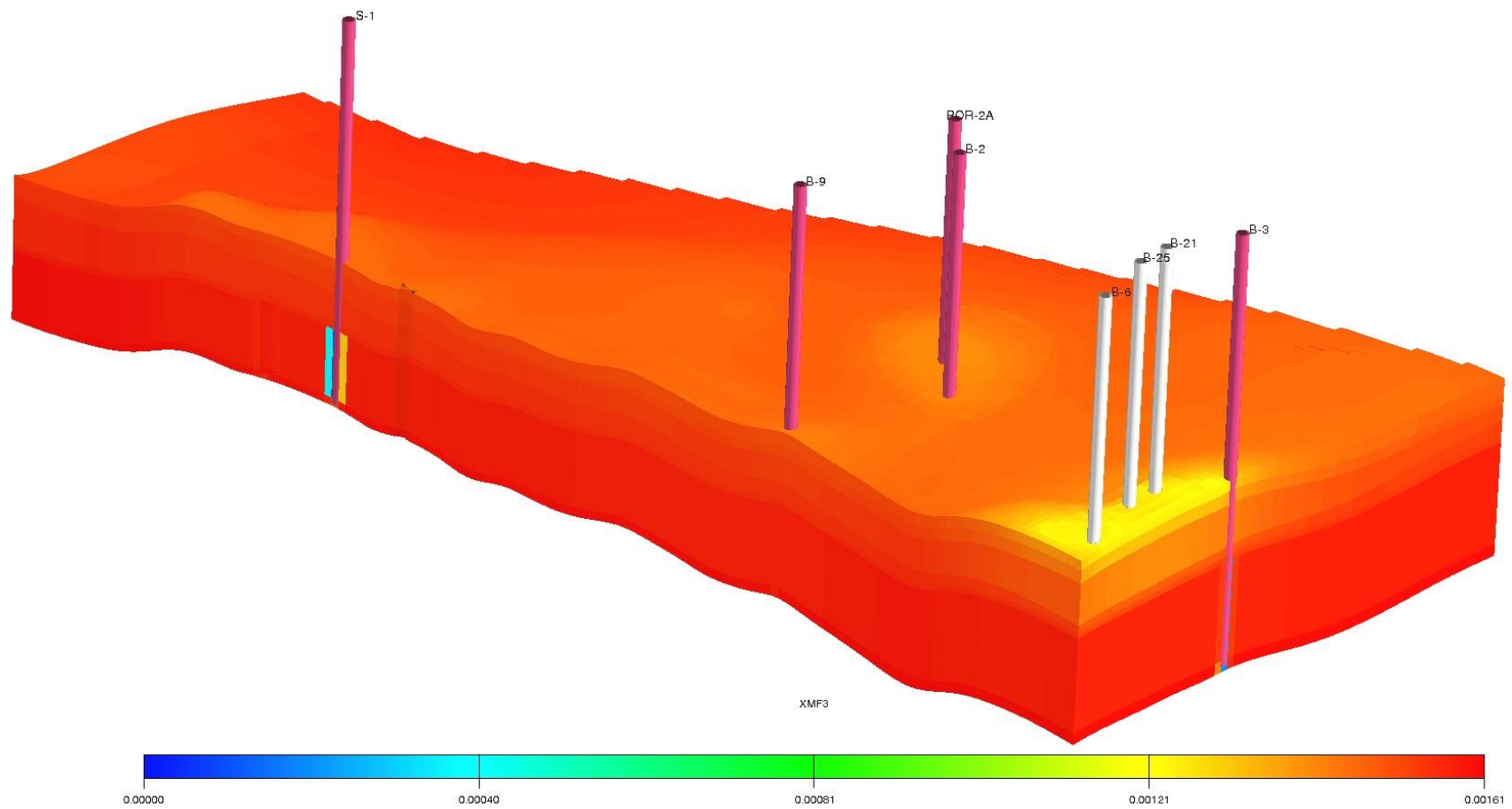


Fig. 1.1.16_214 Struktura Niecki Poznańskiej. Wariant II. Rozkład metanu rozpuszczonego w wodzie. Rozpoczęcie zatłaczania CO₂. Przekrój od południa i wschodu w rejonie złóż Sątopy i Porążyn

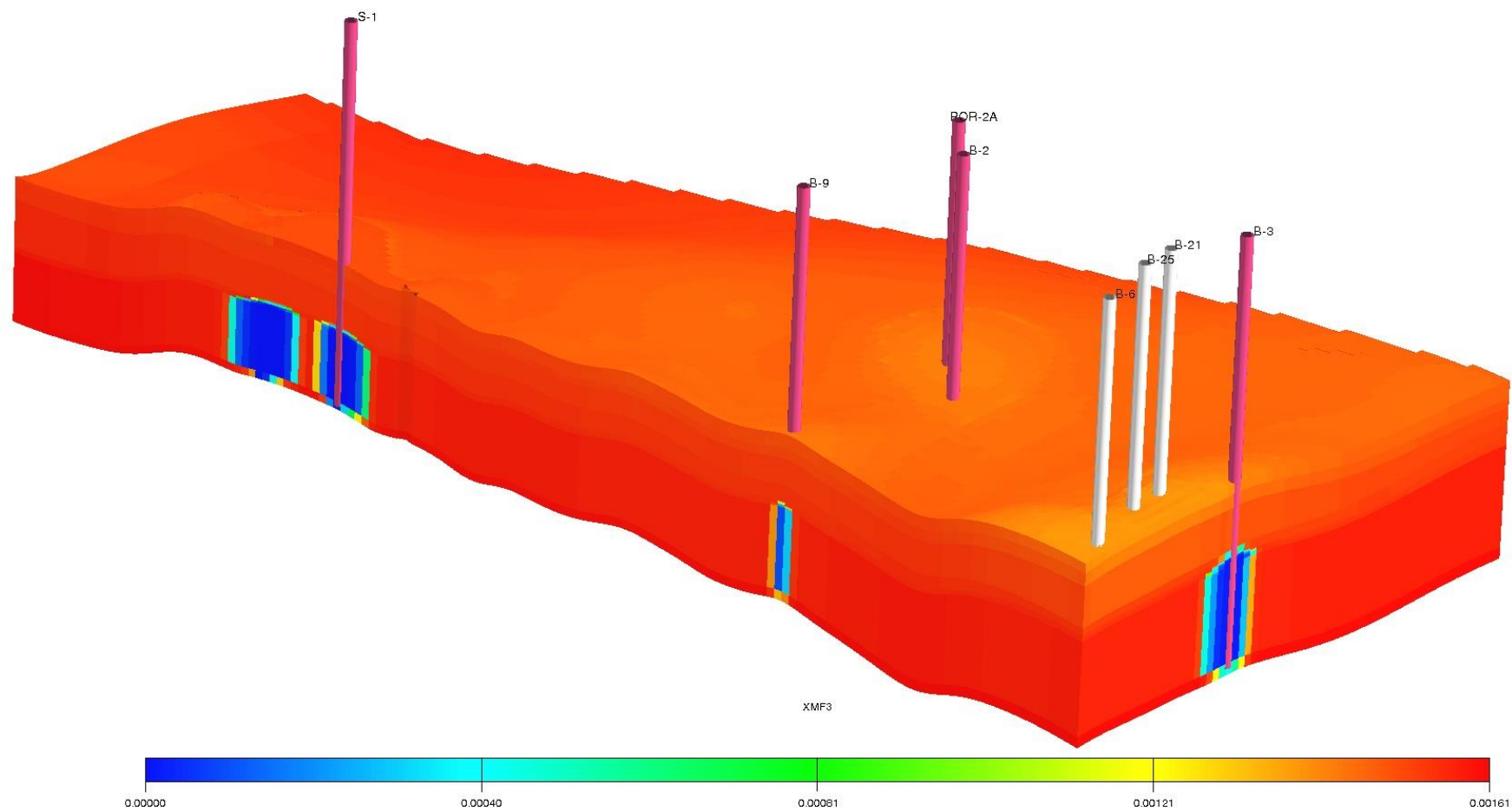


Fig. 1.1.16_215 Struktura Niecki Poznańskiej. Wariant II. Rozkład metanu rozpuszczonego w wodzie po dziesięciu latach zatłaczania CO₂.
Przekrój od południa i wschodu w rejonie złóż Sątopy i Porażyn

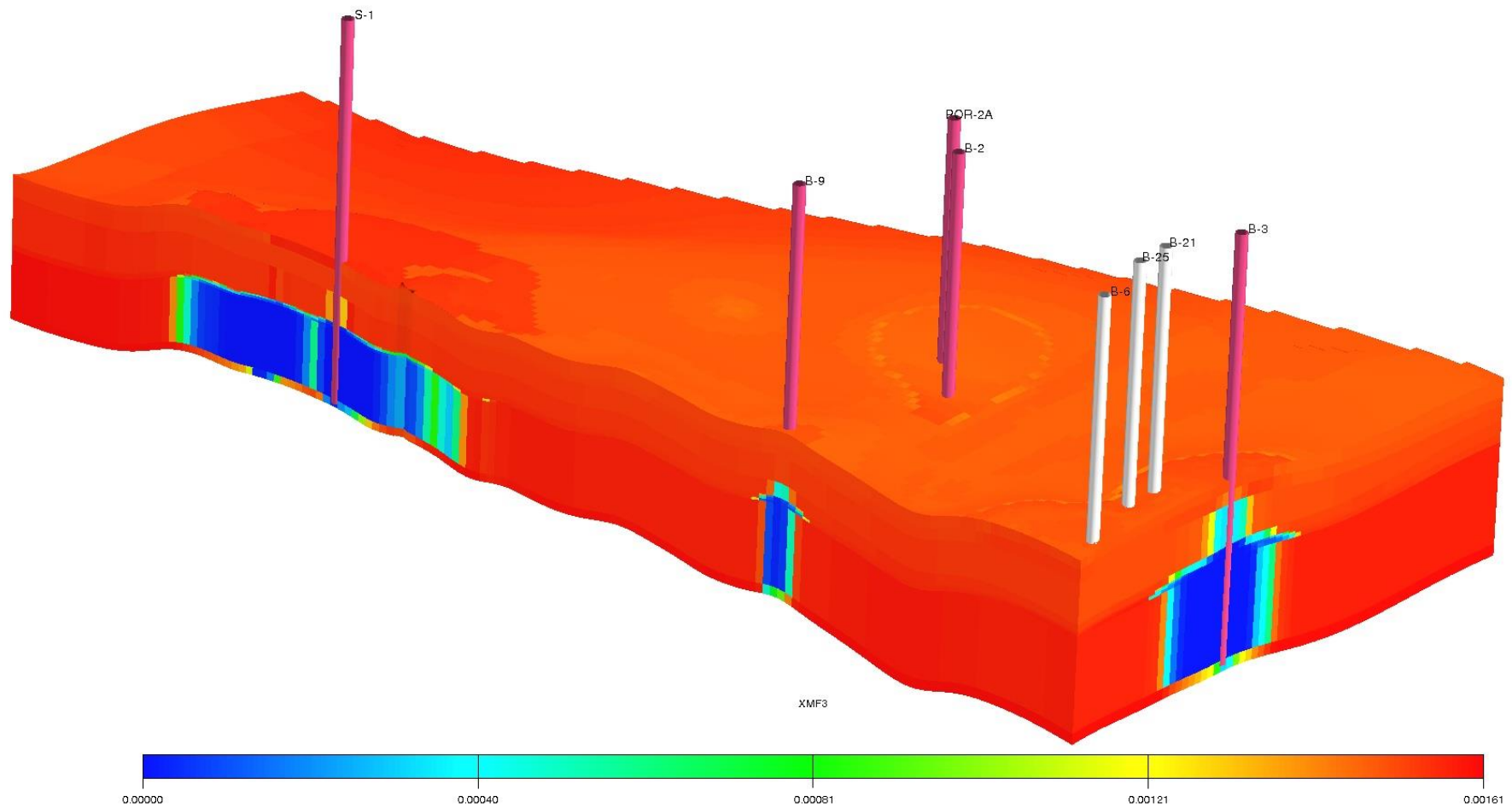


Fig. 1.1.16_216 Struktura Niecki Poznańskiej. Wariant II. Rozkład metanu rozpuszczonego w wodzie na zakończenie zatłaczania CO₂.
Przekrój od południa i wschodu w rejonie złóż Sątopy i Porażyn

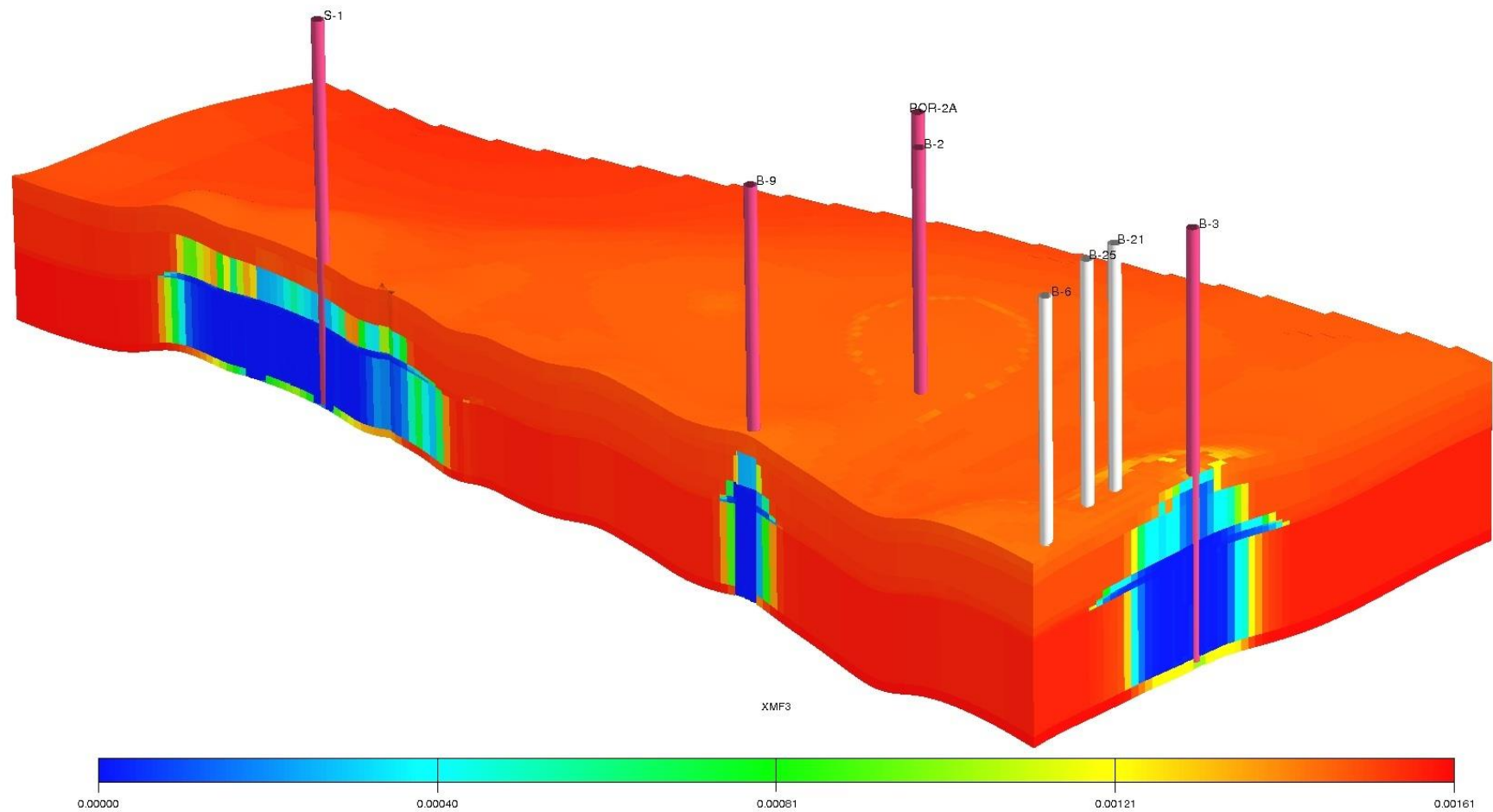


Fig. 1.1.16_217 Struktura Niecki Poznańskiej. Wariant II. Rozkład metanu rozpuszczonego w wodzie 300 lat po zatłoczeniu CO₂.
Przekrój od południa i wschodu w rejonie złóż Sątopy i Porażyn

16-230

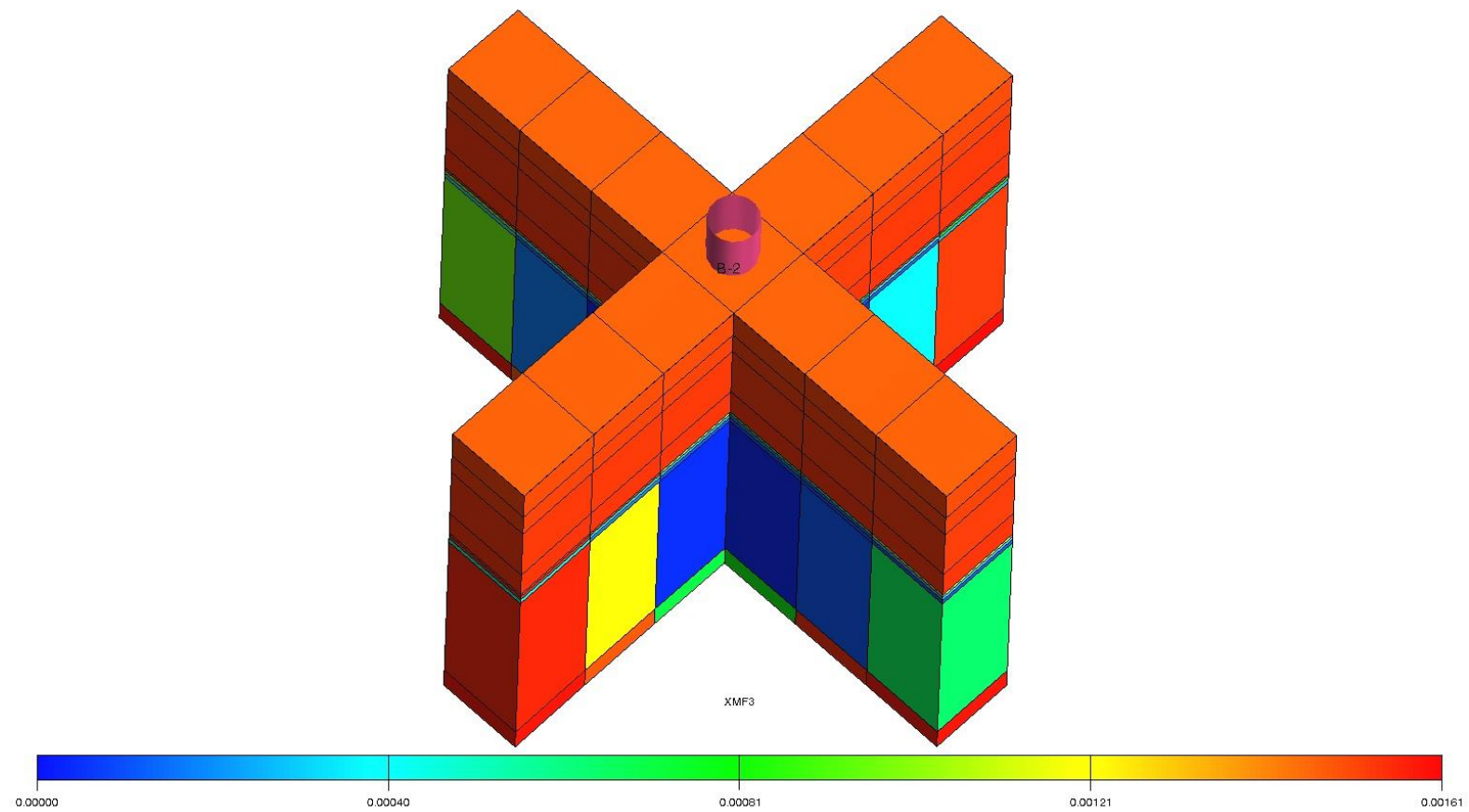


Fig. 1.1.16_218 Struktura Niecki Poznańskiej. Wariant II. Rejon złoża Porążyn. Odwiert Bukowiec-2

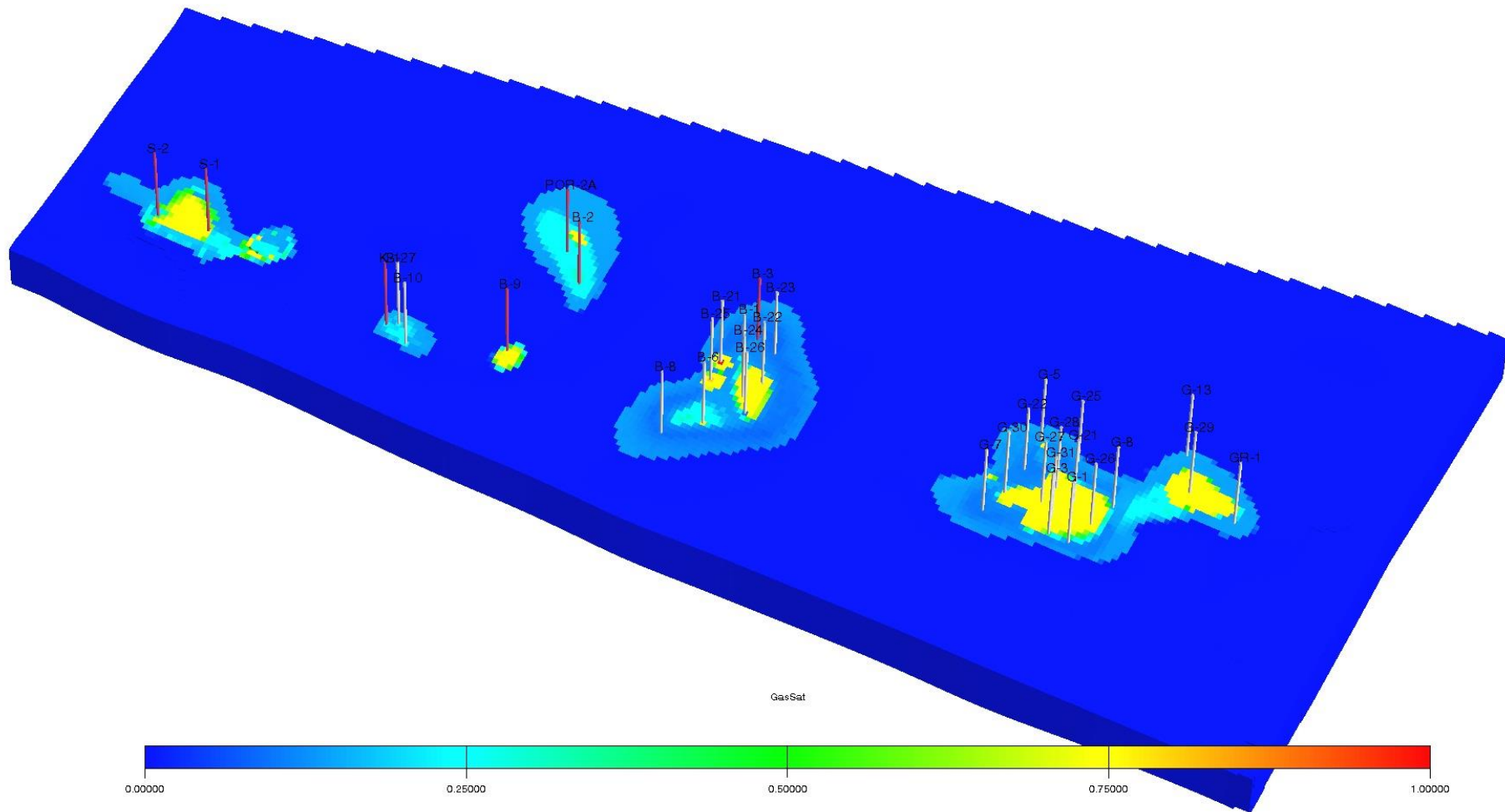


Fig. 1.1.16_219 Struktura Niecki Poznańskiej. Wariant II. Nasylenie gazem przed zatłaczaniem CO₂

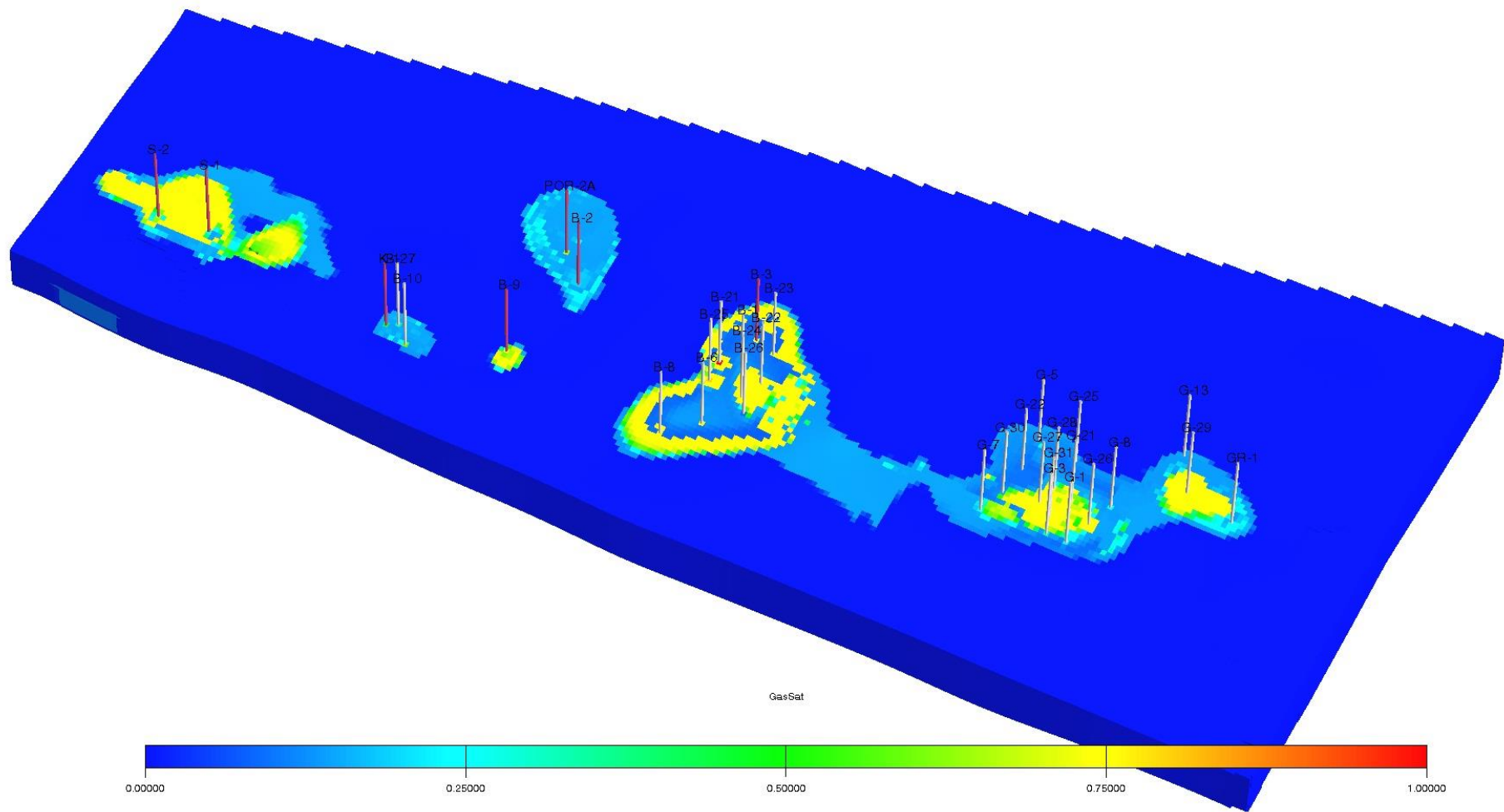


Fig. 1.1.16_220 Struktura Niecki Poznańskiej. Wariant II. Nasycenie gazem po relaksacji struktury

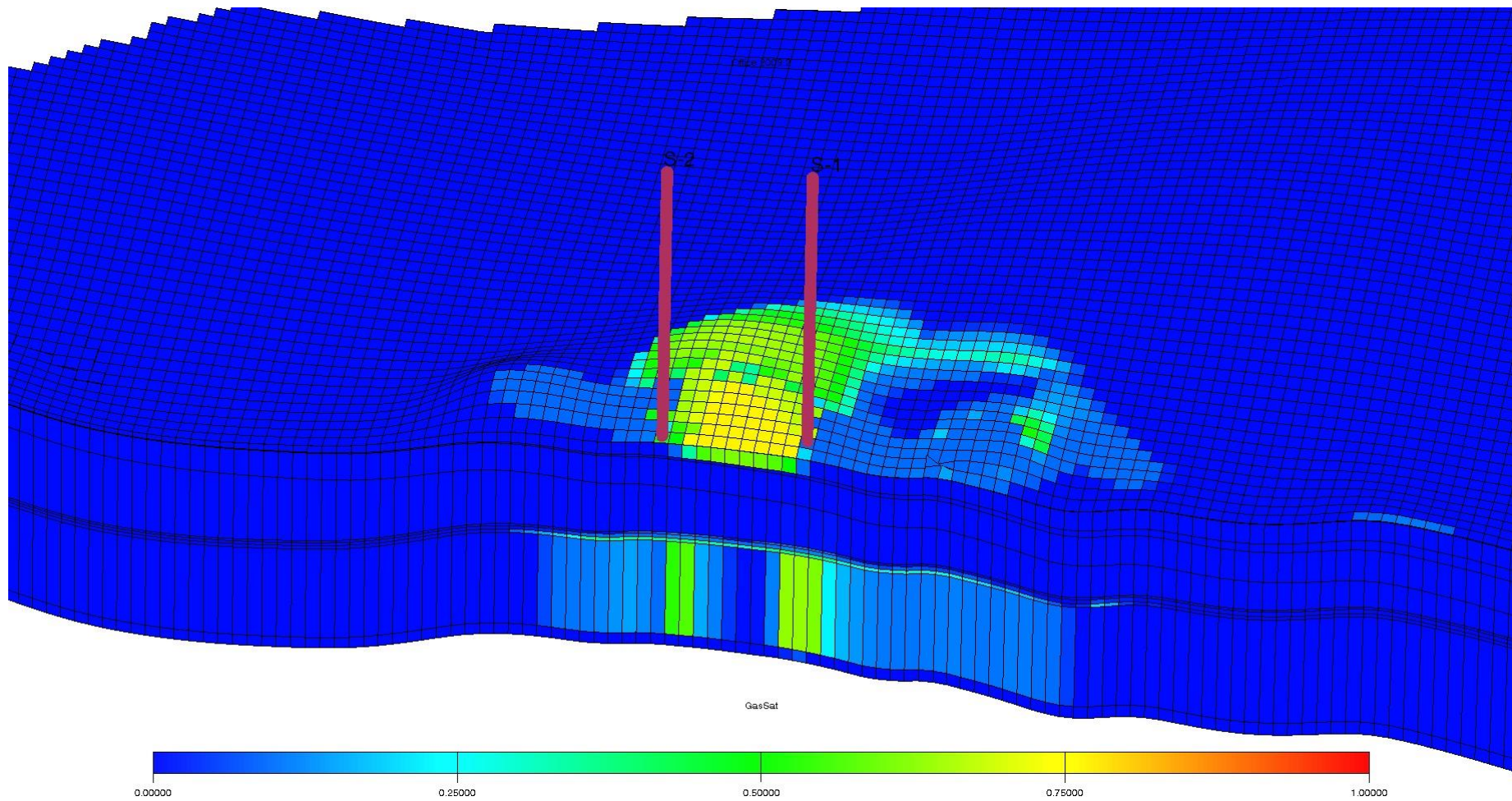


Fig. 1.1.16_221 Struktura Niecki Poznańskiej. Wariant II. Nasylenie gazem i CO₂ po zatłoczeniu CO₂. Przekrój od południa w rejonie złoża Sątopy

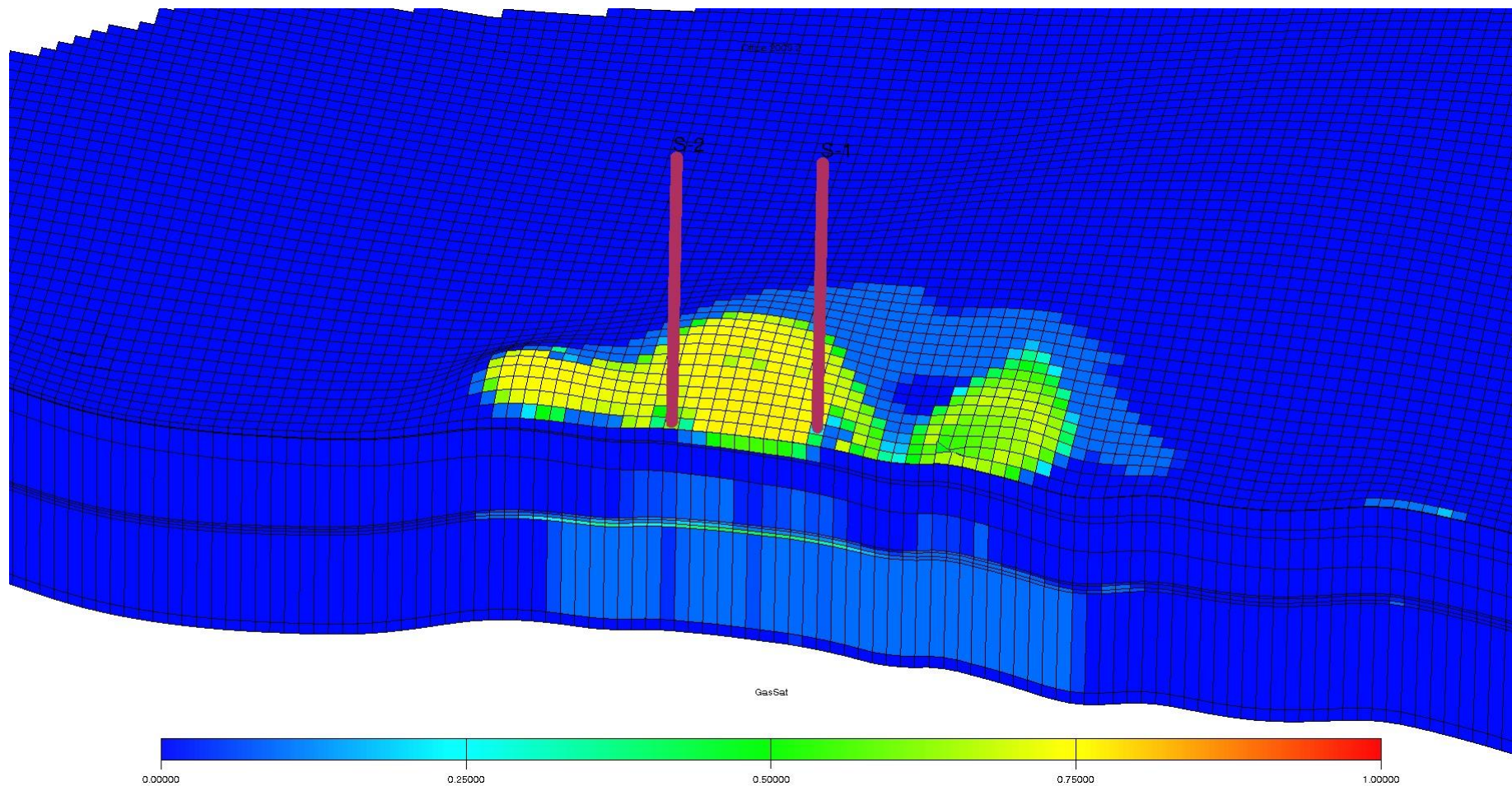


Fig. 1.1.16_222 Struktura Niecki Poznańskiej. Wariant II. Nasylenie gazem i CO₂ po relaksacji struktury. Przekrój od południa w rejonie złoża Sątopy

Podsumowanie i wnioski

W pracy skonstruowano dynamiczny model symulacyjny struktury Niecki Poznańskiej w utworach czerwonego spągowca w celu zweryfikowania możliwości składowania w niej CO₂ przy równoczesnym procesie wypierania z solanki metanu i jego migracji w strukturze. W tym celu:

1. Dokonano implementacji statycznego modelu geologicznego struktury. Informacje geologiczne uzupełniono własnościami termodynamicznymi płynów złożowych niezbędnymi do zastosowania symulacji kompozycyjnych tworzonego modelu, wykorzystano wyniki pomiarów rozpuszczalności gazów w solance oraz korelacje teoretyczne do określenia oddziaływania wzajemnego płynów i ich własności transportowych w skałach rozpatrywanej struktury.
2. Przeprowadzono kalibrację modelu statycznego na podstawie danych eksploatacyjnych z 7 złóż gazu ziemnego zlokalizowanych w obrębie struktury.
3. Wykonano dwa warianty symulacji prognostycznych.
4. Przeprowadzono analizę otrzymanych wyników pod kątem efektów towarzyszących sekwestracji CO₂ w strukturze.

Przeprowadzone symulacje i analiza ich wyników pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

1. Struktura posiada pojemność sekwestracyjną przewyższającą znacznie założone ilości zatłaczanego CO₂.
2. 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.
3. Procesowi zatłaczania CO₂ do struktury towarzyszą zjawiska:
 - a) konwekcji fazy CO₂ do wyższej położonych warstw struktury, równoczesnej z efektem
 - b) rozpuszczania CO₂ w solance w stopniu ograniczającym jego migrację zarówno w kierunku pionowym (do stropu struktury) jak i kierunkach lateralnych mogących stanowić potencjalną drogę ucieczki CO₂ poza strukturę,
 - c) wypieranie przez CO₂ metanu z solanki i migrację C₁ 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.

Modelowania dynamiczne procesów zatłaczania CO₂ do poziomów solankowych w rejonie Choszczno-Suliszewo (GIG; Petrel/Eclipse)

(Jarosław Chećko, Tomasz Urych, Tadeusz Bromek, Magdalena Głogowska, Robert Warzecha, Anna Wątor)

Model statyczny

Do budowy modelu dynamicznego wykorzystano statyczny model regionalny opracowany w ramach zadania 1.15 (Papiernik i in. 2011). Model wyjściowy składał się z 24 warstw (po 6 warstw dla każdego z pięter jury dolnej: Toark, Pliensbach, Synemur, Hetang) i skonstruowany został na bazie regularnej siatki 116x120 komórek o wymiarach powierzchniowych 500x500 m. W tym modelu wydzielono dwa rejony (Fig. 1.1.16_223), w których przeprowadzono symulacje procesu zatłaczania CO₂ do poziomów solankowych.

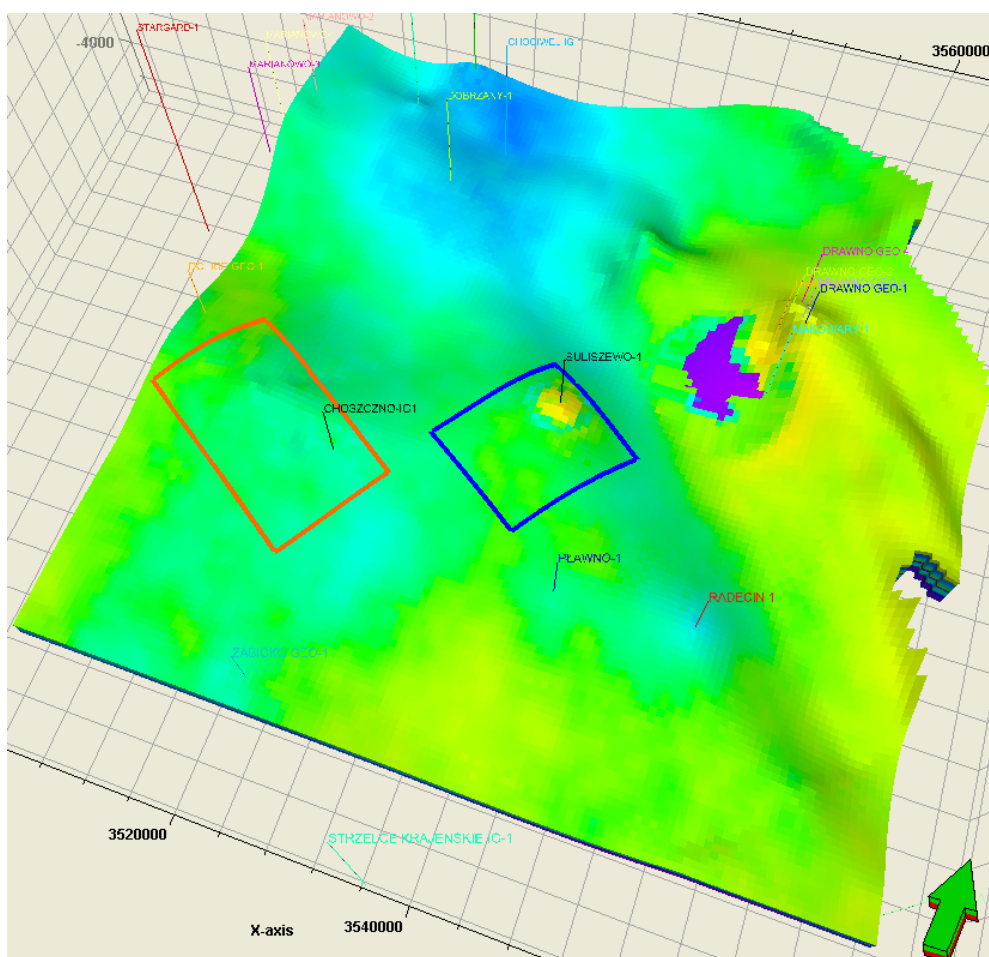


Fig. 1.1.16_223 Rejony wydzielone w modelu statycznym (kolorem czerwonym zaznaczono zasięg modelu Choszczno, a kolorem niebieskim – zasięg modelu Suliszewo)

Model Suliszewo

W pierwszym z wydzielonych modeli numerycznych o powierzchni 14288x14680 m, zlokalizowanym w rejonie otworu wiertniczego Suliszewo-1, zmodyfikowano horyzontalną rozdzielczość siatki (200x200 m) oraz orientację linii siatki w kierunku NW-SE i prostopadłym (Fig. 1.1.16_224). W efekcie powstał model o rozdzielczości 56x48x24 komórki (64512 komórek). Następnie zastosowano metodę *cut-offu* dla przepuszczalności (0.01 mD) i zailenia (70%) wykorzystując kryteria użyte podczas modelowania dynamicznego w rejonie otworów Pławno-1 i Radęcin-1 (Nagy i in. 2011). Stwierdzono nieciągłość hydrodynamiczną w warstwach Toarku (Fig. 1.1.16_225) stanowiących uszczelnienie kolektora Pliensbachu. W rezultacie ostateczna liczba aktywnych komórek podczas symulacji dla rejonu Suliszewo wynosi 47537.

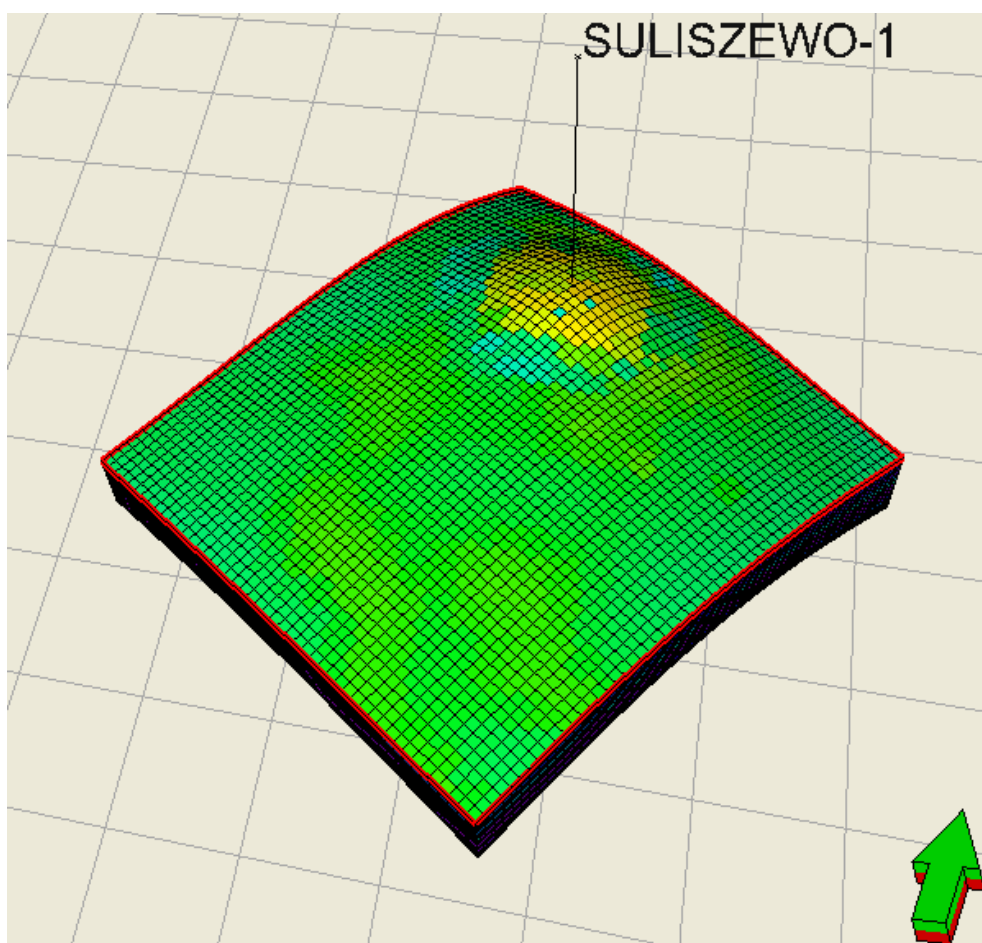


Fig. 1.1.16_224 Model numeryczny w rejonie otworu Suliszewo-1

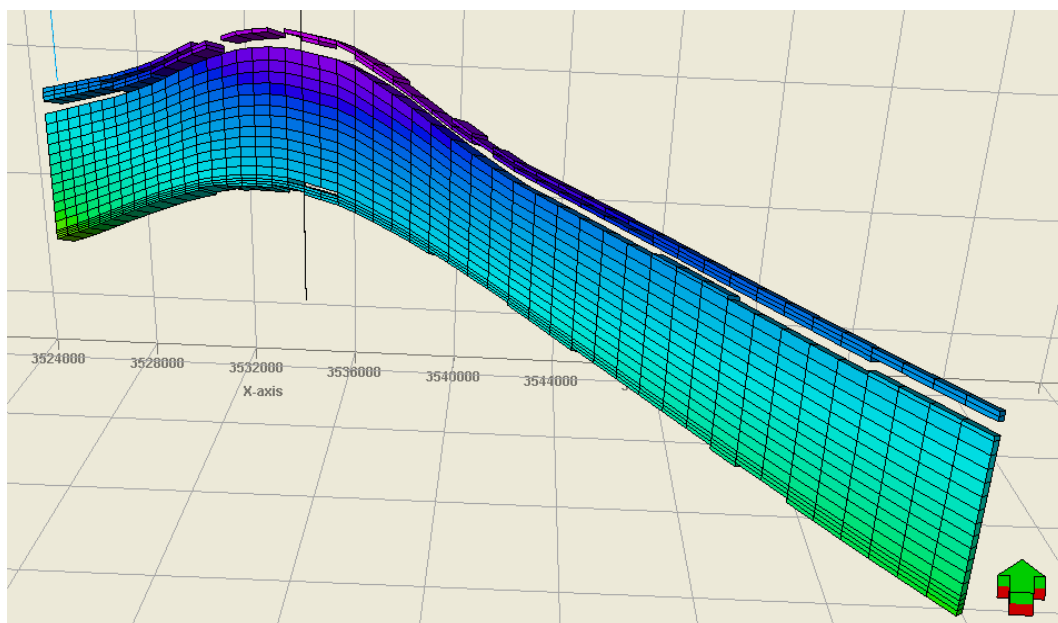


Fig. 1.1.16_225 Nieciągłość hydrodynamiczna w warstwach uszczelnienia kolektora Pliensbachu

Model Choszczno

Model symulacyjny, zlokalizowany w rejonie otworu wiertniczego Choszczno-IG1, obejmuje obszar o wymiarach 17240 x 19130 m. Horizontalna rozdzielczość siatki w tym modelu wynosi 200x200m, natomiast orientacja linii siatki w kierunku NW-SE i prostopadłym (**Fig. 1.1.16_226**). Pierwotnie model Choszczno składał się z 95616 komórek (83x48x24), jednak po wyłączeniu z symulacji komórek o przepuszczalności <0.01 mD i zaileniu $>70\%$ ostateczna liczba aktywnych komórek wynosi 78910.

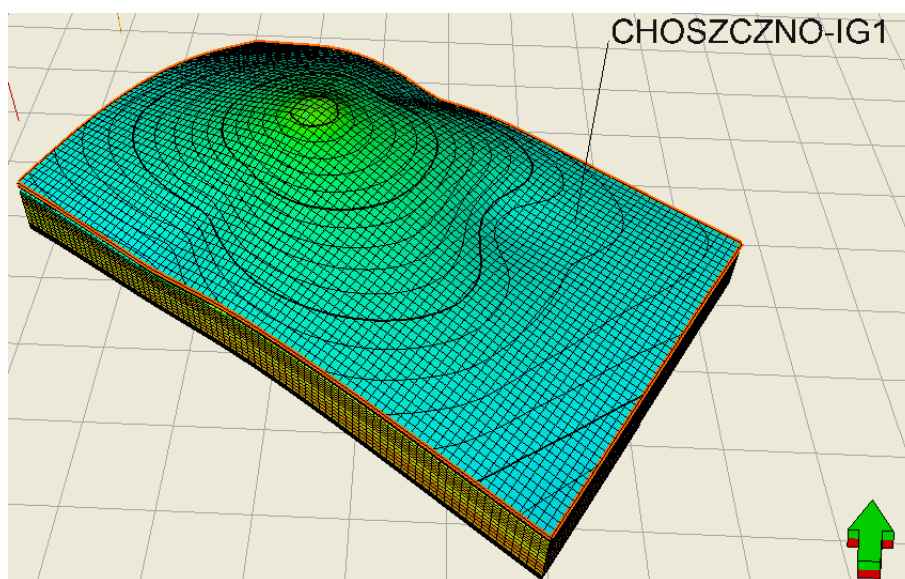


Fig. 1.1.16_211 Model numeryczny w rejonie otworu Choszczno IG-1
16-240

Po zastosowaniu metody *cut-offu* dla przepuszczalności i zailenia stwierdzono nieciągłość hydrodynamiczną w warstwach Toarku (Fig. 1.1.16_227) stanowiących uszczelnienie kolektora Pliensbachu.

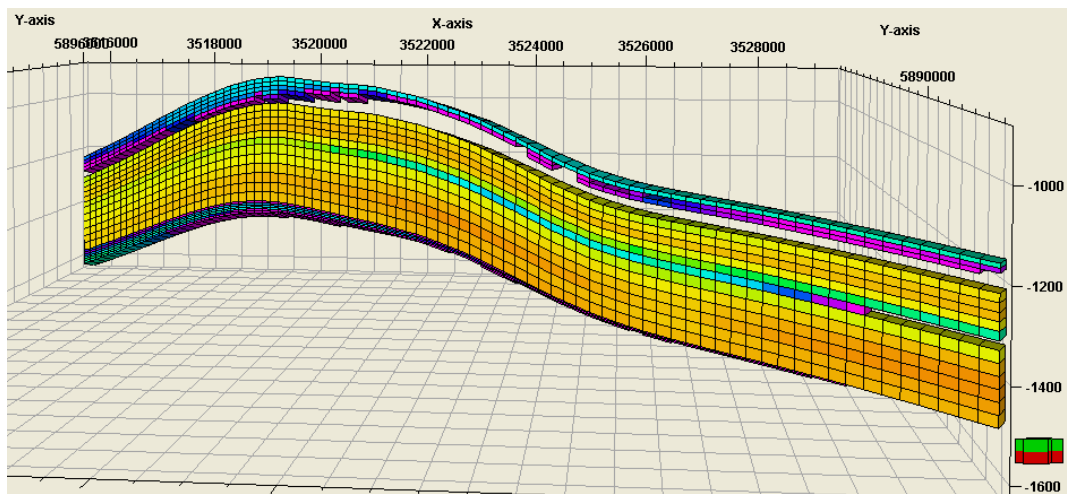


Fig. 1.1.16_227 Nieciągłość hydrodynamiczna w modelu Choszczno

Model dynamiczny

Warunki początkowe i modele płynów złożowych

Do celów symulacji procesu zatłaczania dwutlenku węgla do poziomów solankowych w rejonie Choszczno-Suliszewo wykorzystano kompozycyjną wersję symulatora ECLIPSE (E300). W modelach dynamicznych zastosowano opcję CO2SOL uwzględniającą w procesie sekwestracji zjawisko rozpuszczalności dwutlenku węgla w fazie wodnej. Wykorzystano równanie stanu Penga-Robinsona z nieznaczną modyfikacją dotyczącą objętości molowej, dzięki czemu parametry termodynamiczne dwutlenku są wyznaczone w sposób bardziej zbliżony do warunków rzeczywistych (Eclipse User Manual 2011). Lepkość dwutlenku węgla oszacowano przy użyciu korelacji Lorentza-Braya-Clarka (Lorentz et al. 1964).

Parametry dotyczące rozpuszczalności CO₂ w solance wyznaczone zostały z korelacji Changa-Coatsa-Nolena (Chang et al 1996).

W początkowej fazie symulacji model jest w 100 % nasycony solanką o zasoleniu 12.9 g/dm³ i gęstości 1009.3 kg/m³. Początkowe ciśnienie złożowe na głębokości 1069 m wynoszące około 10.7 MPa wyznaczone z pomiarów w otworze Radęcin-1. Przyjęto średnią temperaturę 38°C na głębokości 1000 m.

Ze względu na brak ograniczenia powierzchniowego analizowanej struktury w dolnej jurze model numeryczny zdefiniowano jako otwarty. Zastosowano model akifera okalającego zdefiniowanego przez Cartera i Tracy'ego (Carter, Tracy 1960). Ciśnienie początkowe w akiferze analitycznym jest zbliżone do ciśnienia w modelu numerycznym, a pozostałe parametry akifera przyjęto jako średnie wielkości z obszaru modelu numerycznego.

Warianty zatłaczania

Symulacje procesu sekwestracji CO₂ w poziomach solankowych przeprowadzono za pomocą otworów pionowych. Dla każdego z dwóch modeli numerycznych przyjęto po dwa scenariusze symulacji procesu zróżnicowane pod względem wydajności zatłaczania. Dla każdego z odwiertów założono wielkość iniekcji rzędu 1 Mt CO₂/rok oraz 2 Mt CO₂/rok. W związku z tym sumaryczna ilość zatłoczonego dwutlenku węgla w obu scenariuszach wynosi odpowiednio 25 i 50 Mt (**Tab. 1.1.16_23**).

Tab. 1.1.16_23 Zestawienie wydajności zatłaczania w poszczególnych wariantach symulacji

Nazwa modelu	Scenariusz symulacji	wydajność zatłaczania [sm ³ /d]	Sumaryczna ilość CO ₂
Suliszewo	1	1449667	1.323836 e+10 sm ³ = 35526840 rm ³ = 25 Mt
	2	2899334	2.647672 e+10 sm ³ = 70130824 rm ³ = 50 Mt
Choszczno	1	1449667	1.323836 e+10 sm ³ = 35526840 rm ³ = 25 Mt
	2	2899334	2.647672 e+10 sm ³ = 70130824 rm ³ = 50 Mt

Dwutlenek węgla zatłaczany jest do warstw stropowych kolektora pliensbachu oraz kolektora synemuru (**Fig. 1.1.16_228**). Symulacje procesu migracji CO₂ w analizowanej strukturze prowadzono dla 200/1000-letniego interwału czasowego po zakończeniu zatłaczania.

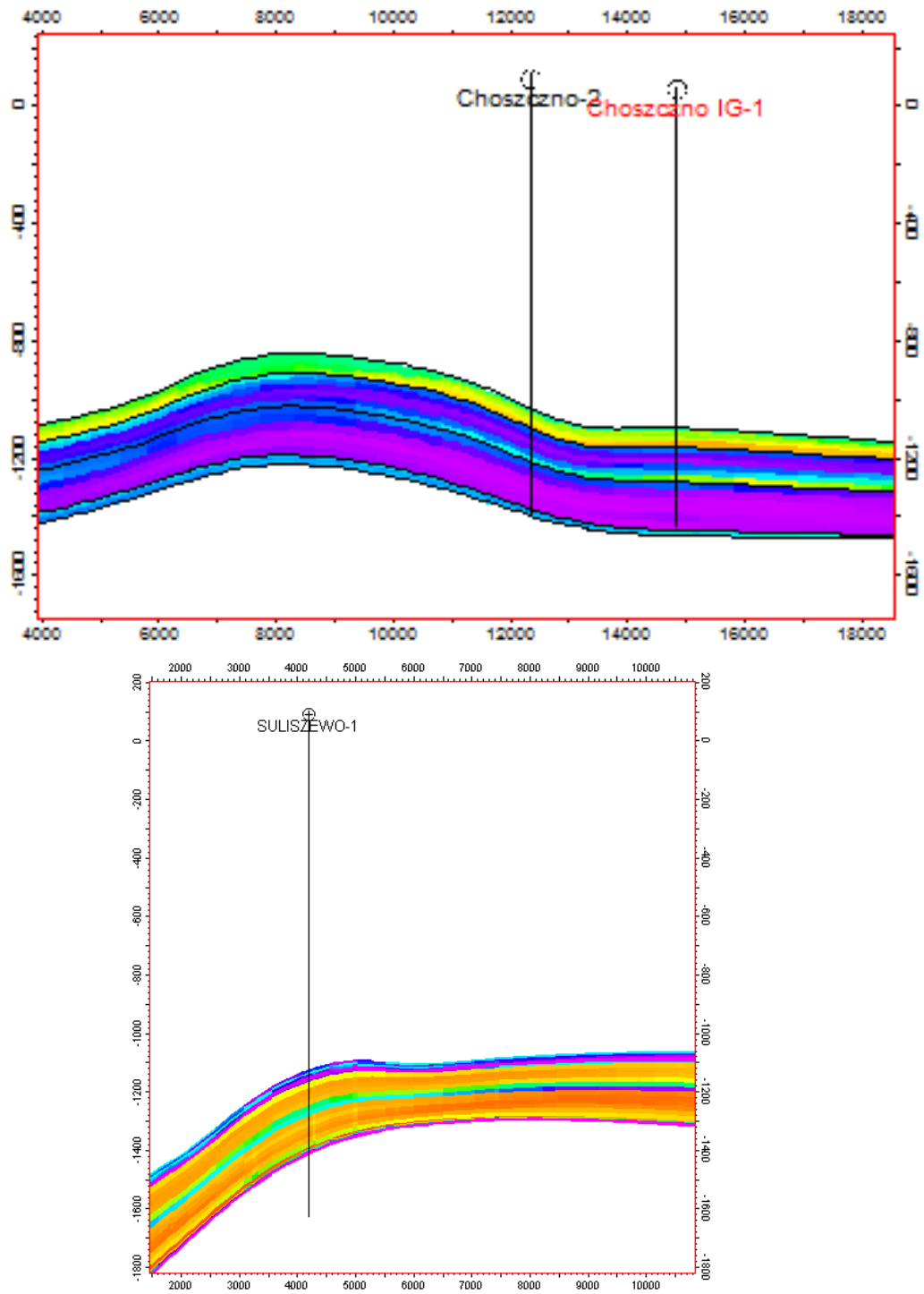


Fig. 1.1.16_228 Przekroje przez struktury w rejonie otworów iniekcyjnych

Wyniki symulacji numerycznych

Model Suliszewo

Scenariusz 1

W trakcie symulacji zatłaczania CO₂ dla scenariusza nr 1 w modelu Suliszewo utrzymano stałą dobową wydajność zatłaczania równą około 1449667 sm³/d, co odpowiada sumarycznej ilości zatłoczonego CO₂ równej 1.323836e+10 sm³ = 35526840 rm³ = 25 Mt CO₂. Ciśnienie na spodzie otworu iniekcyjnego gwałtownie spada po zakończeniu zatłaczania i w dalszym etapie symulacji dąży do osiągnięcia ciśnienia pierwotnego. Ciśnienie denne w odwiercie zatłaczającym zmienia się o około 0.35 MPa, natomiast średnie ciśnienie w strefie zatłaczania – o około 0.4 MPa (Fig. 1.1.16_229).

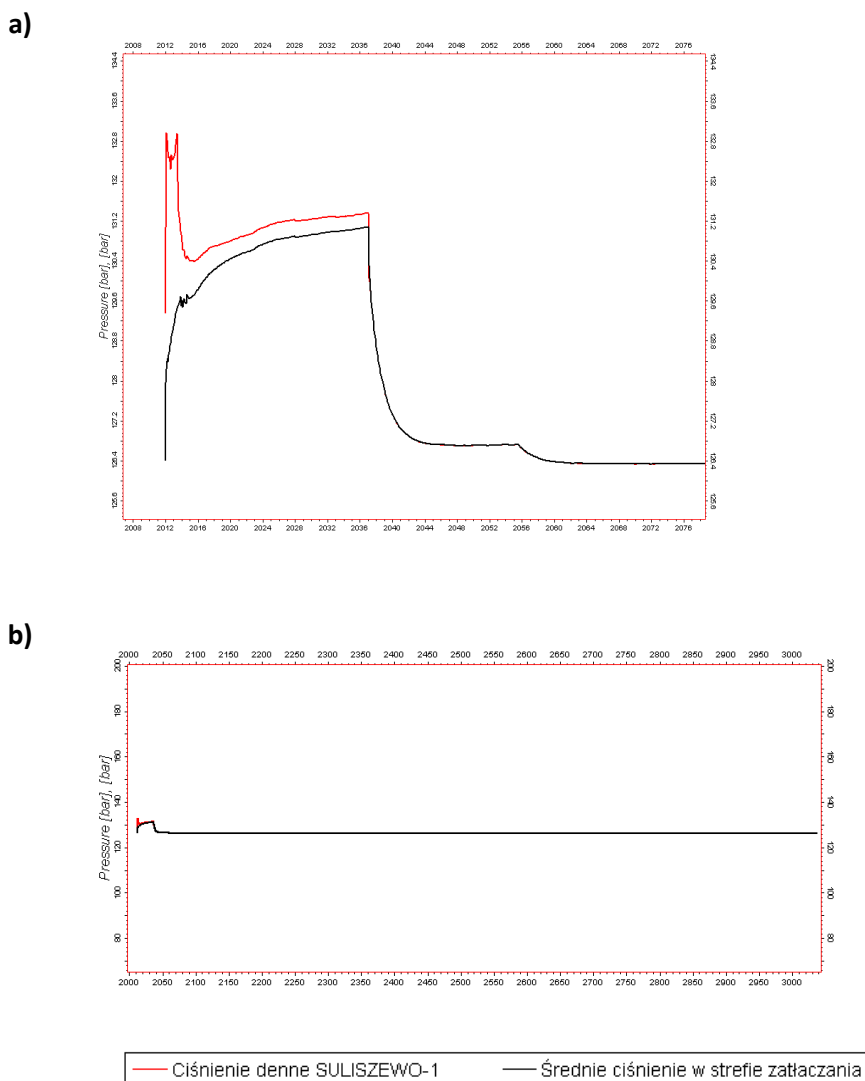
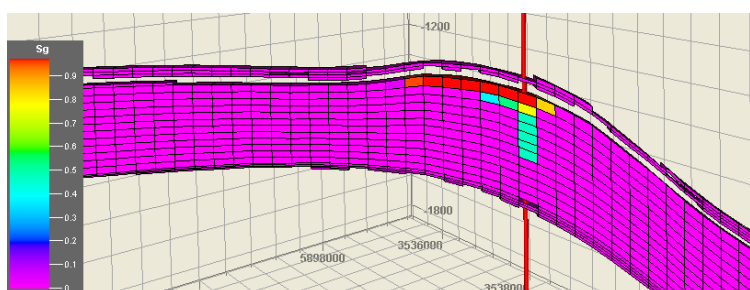


Fig. 1.1.16_229 Ciśnienie denne w otworze Suliszewo-1 i średnie ciśnienie złożowego w strefie zatłaczania w trakcie zatłaczania (a) i po jego zakończeniu (b)

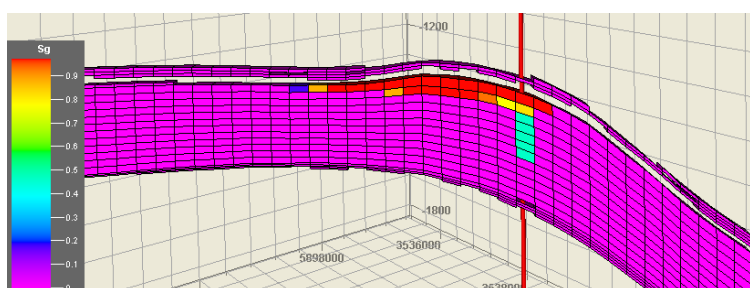
Wzrost ciśnienia w warstwach stropowych kolektora wynosi maksymalnie około 0.5 MPa po 25 latach zatłaczania. W kolejnych latach zaobserwowano spadek ciśnienia w szczytowych partiach struktury wynikający z rozpuszczania się CO_2 w solance oraz wskutek dalszej migracji w warstwach stropowych kolektora. W efekcie przeprowadzenia długoczasowych symulacji przez kolejne 1000 lat od zakończenia zatłaczania stwierdzono, że już po około 70 latach ciśnienie złożowe w stropie struktury jest już zbliżone do pierwotnego ciśnienia przed rozpoczęciem zatłaczania dwutlenku węgla.

W początkowej fazie symulacji zatłaczany dwutlenek węgla gromadzi się w rejonie otworu iniekcyjnego. Dzięki zróżnicowaniu właściwości poszczególnych warstw modelu, a także wskutek obecności sił wyporu oraz gradientu ciśnień złożowych obserwujemy się koncentrację swobodnego CO_2 w górnych warstwach kolektora. Wraz z upływem czasu następuje powolne przemieszczanie się dwutlenku węgla po stropie kolektora w kierunku S-E. Rozkład nasycenia struktury dwutlenkiem węgla pozostającym w stanie rezydualnym dla poszczególnych interwałów czasowych symulacji przedstawiono na przekrojach przechodzących przez strefę przyodwiertową (Fig. 1.1.16_230i Fig. 1.1.16_231).

a) 5 lat



b) 15 lat



c) 25 lat

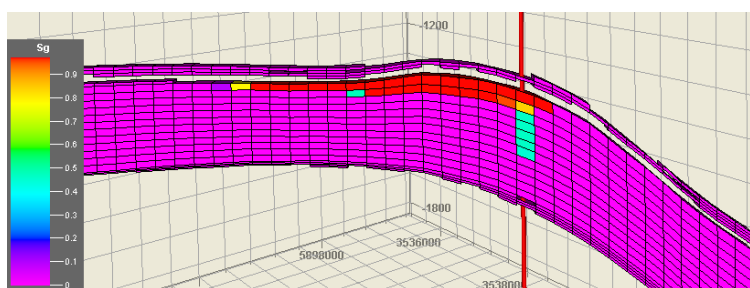
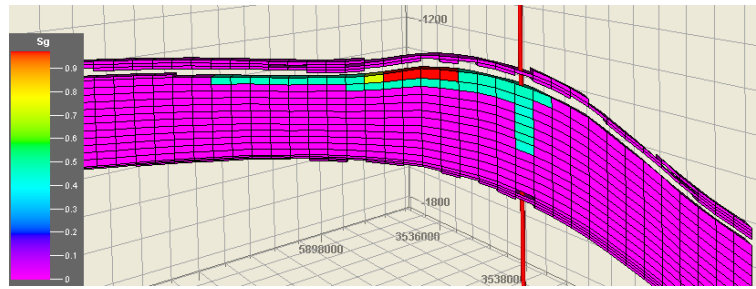
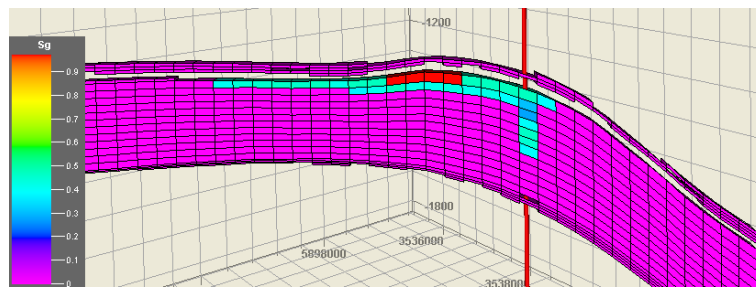


Fig. 1.1.16_230 Rozkład nasycenia swobodnego CO_2 w strukturze po a) 5, b) 15 i c) 25 latach od rozpoczęcia zatłaczania

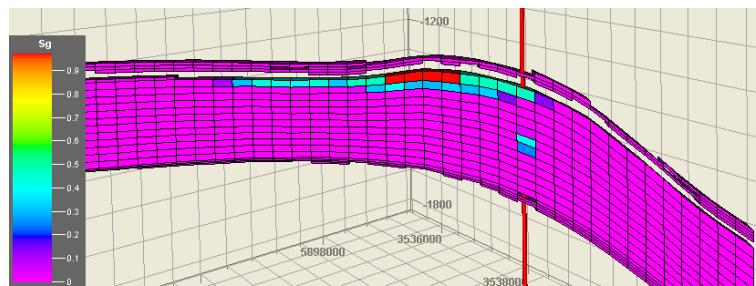
a) 50 lat



b) 200 lat



c) 500 lat



d) 1000 lat

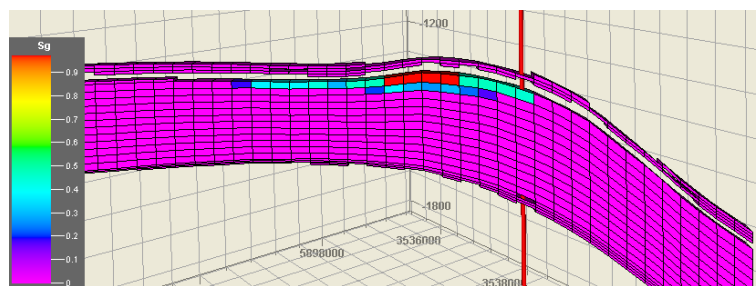
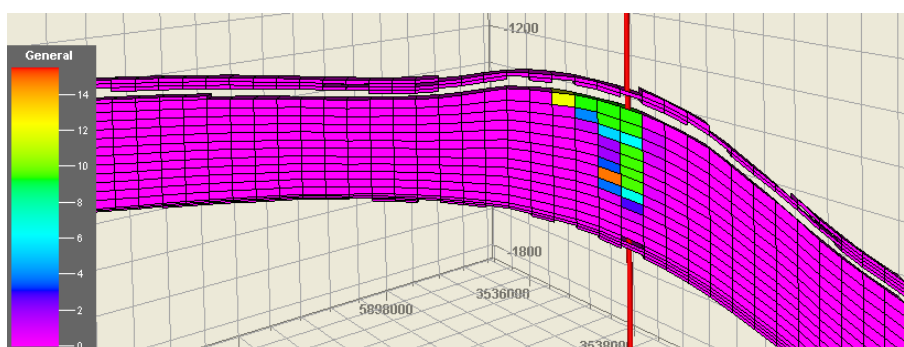


Fig. 1.1.16_231 Rozkład nasycenia swobodnego CO₂ w strukturze po a) 50, b) 200, c) 500 i d) 1000 latach od rozpoczęcia zatłaczania

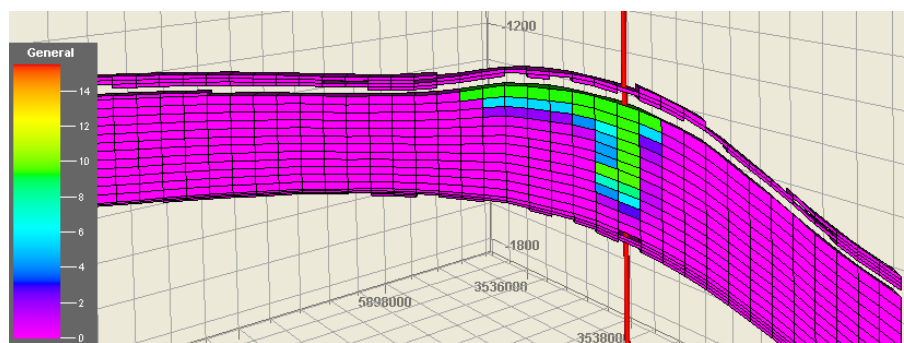
Podczas procesu grawitacyjnej migracji CO₂ w kierunku lokalnego szczytu struktury ma miejsce zjawisko rozpuszczania dwutlenku węgla w solance. Im dłuższy czas migracji gazu, tym większa możliwość rozpuszczania się CO₂ i pozostawania w przestrzeniach porowych skał.

Rozkład rozpuszczonego CO₂ w analizowanej strukturze przedstawiono za pomocą ułamka molowego dla poszczególnych interwałów czasowych symulacji (**Fig. 1.1.16_232i Fig. 1.1.16_233**). Na poniższych figurach można obserwować powolny proces redukcji fazy swobodnej CO₂ wskutek rozpuszczania się CO₂ w solance i opadania ku dolnym warstwom kolektora. Zjawisko konwekcji solanki powstaje w wyniku zmian jej gęstości spowodowanej rozpuszczaniem CO₂.

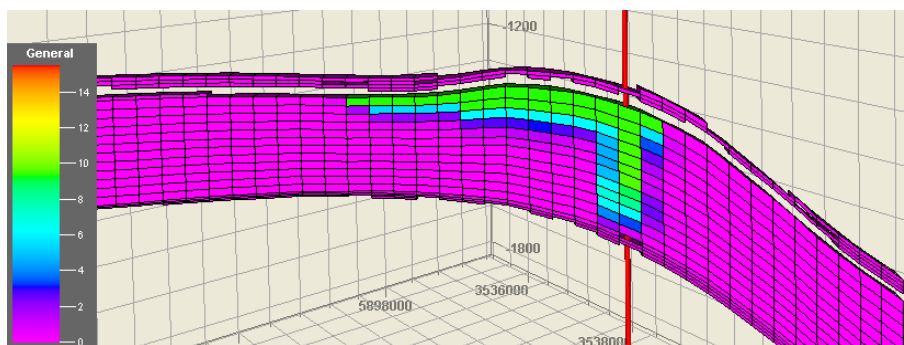
a) 1 rok



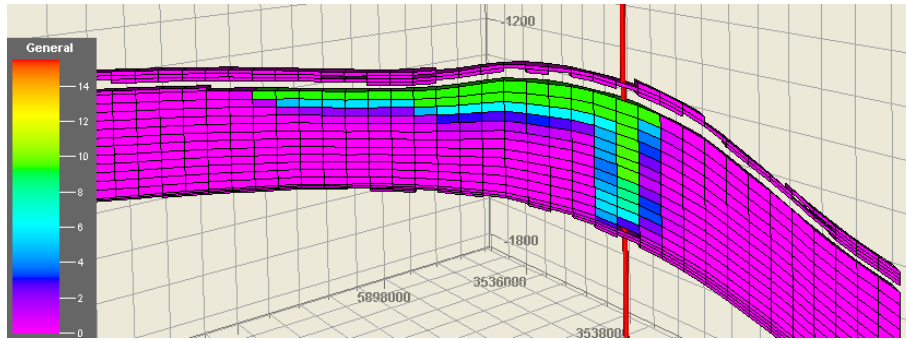
b) 5 lat



c) 15 lat



d) 25 lat



e) 50 lat

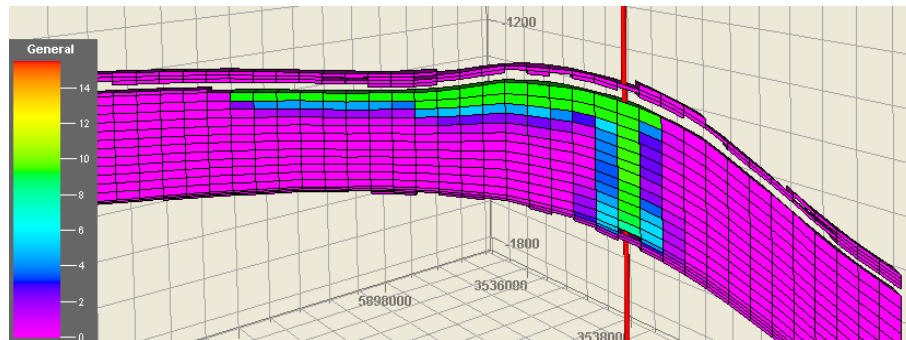
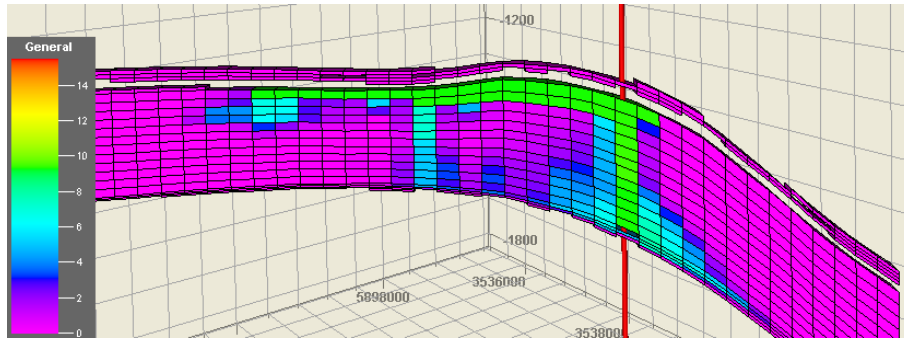
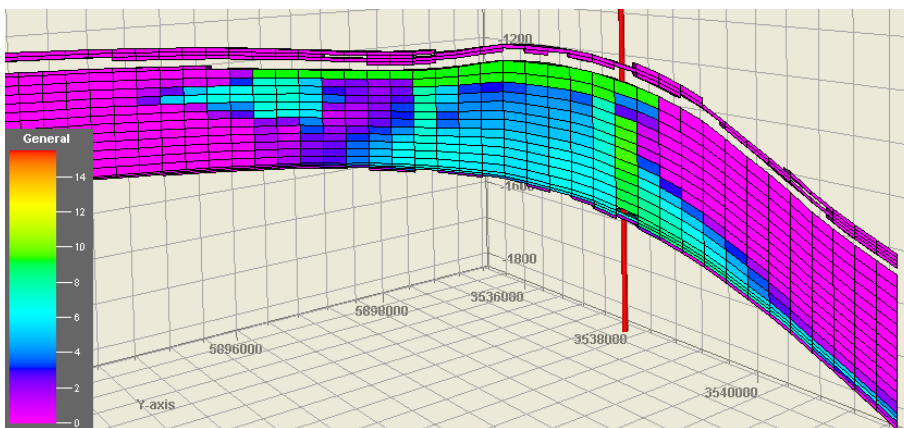


Fig. 1.1.16_232 Rozkład nasycenia struktury dwutlenkiem węgla rozpuszczonym w solance po a) 1, b) 5, c) 15, d) 25 i e) 50 latach od rozpoczęcia zatłaczania

a) 200



b) 500



c) 1000

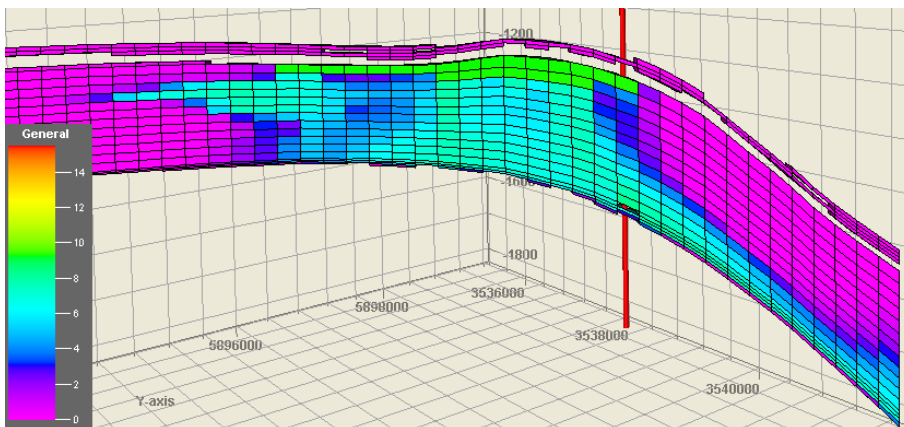


Fig. 1.1.16_233 Rozkład nasycenia struktury dwutlenkiem węgla rozpuszczonym w solance po a) 200, b) 500, c) 1000 latach od rozpoczęcia zatłaczania

Scenariusz 2

Wyniki symulacji zatłaczania CO₂ dla scenariusza nr 2 w modelu Suliszewo wykazują stałą dobową wydajność zatłaczania wynoszącą około 2899334 sm³/d, co odpowiada sumarycznej ilości zatłoczonego CO₂ równej 2.647672 e+10 sm³ = 70130824 rm³ = 50 Mt CO₂. Podobnie jak w przypadku scenariusza nr 2 ciśnienie na spodzie otworu iniekcyjnego gwałtownie spada po zakończeniu zatłaczania i w dalszym etapie symulacji dąży do osiągnięcia ciśnienia pierwotnego. Ciśnienie denne w odwiercie zatłaczającym zmienia się o około 0.4 MPa, średnie ciśnienie w strefie zatłaczania – około 0.7 MPa (Fig. 1.1.16_234 i Fig. 1.1.16_235).

Wzrost ciśnienia w warstwach stropowych kolektora wynosi maksymalnie około 0.95 MPa po 25 latach zatłaczania. Jednak po zakończeniu iniekcji ciśnienie w stropie maleje i już po upływie około 10 lat od zakończenia zatłaczania obserwowano przewyższenie jedynie o około 0.15 MPa względem pierwotnego ciśnienia w stropie struktury.

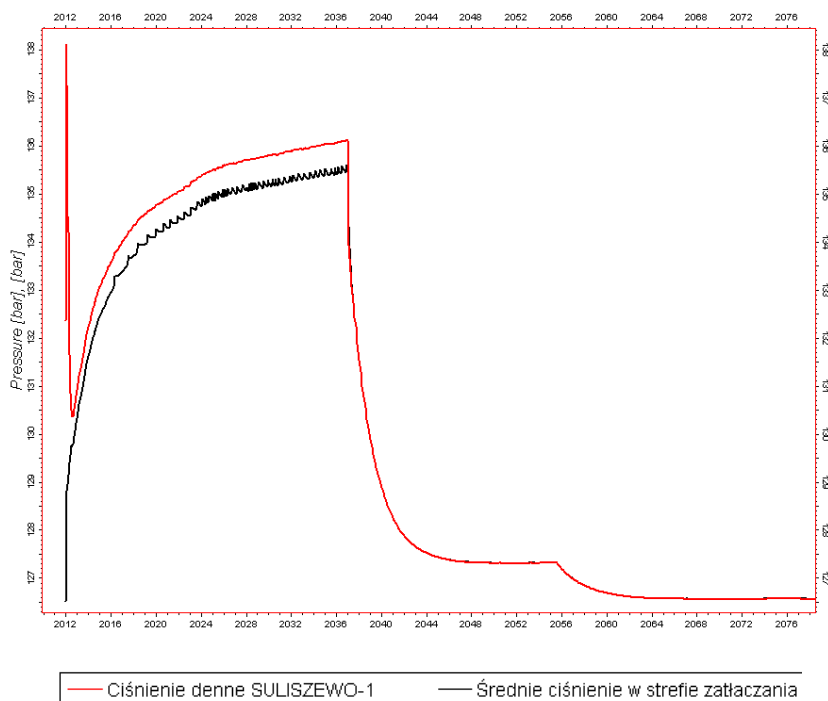


Fig. 1.1.16_234 Ciśnienie denne w otworze Suliszewo-1 i średnie ciśnienie złożowe w strefie zatłaczania w trakcie zatłaczania

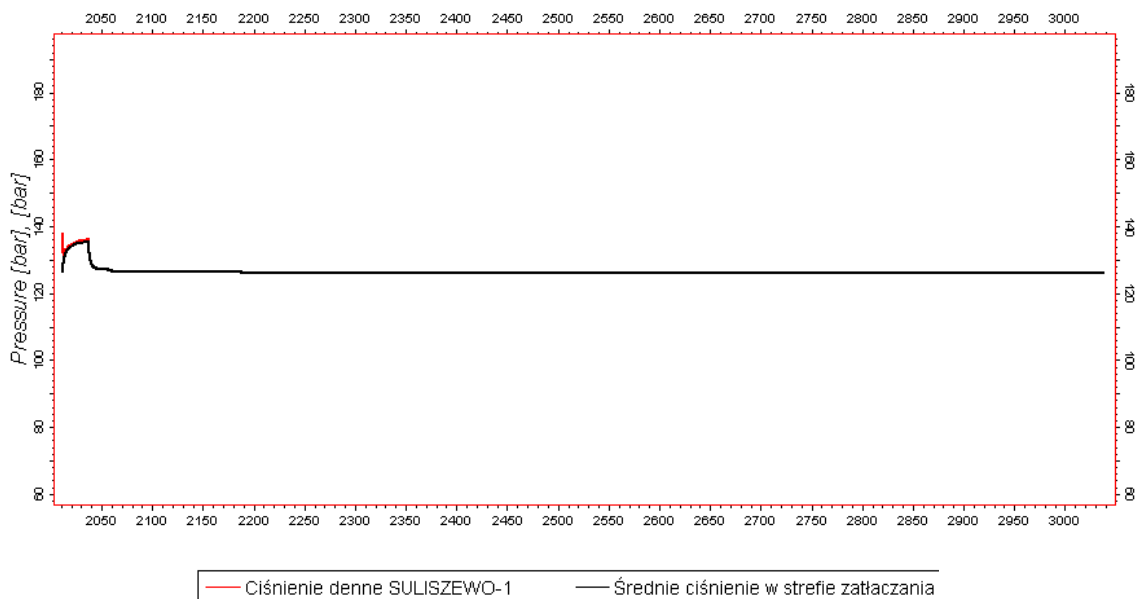


Fig. 1.1.16_235 Ciężnienie denne w otworze Suliszewo-1 i średnie ciśnienie złożowe w strefie zatłaczania w trakcie zatłaczania i po jego zakończeniu

W tym scenariuszu zatłaczania (2 Mt CO₂/rok) także mamy do czynienia z powstawaniem i stopniowym rozwojem stref swobodnego CO₂ wokół odwiertu iniekcyjnego. Zauważalne jest także przemieszczanie się CO₂ w kierunku warstw stropowych kolektora i dalej w kierunku lokalnego szczytu struktury wskutek dominujących sił wyporu. Ponadto ma tu miejsce zjawisko rozpuszczania się CO₂ w solance. Na figurach poniżej (**Fig. 1.1.16_236**, **Fig. 1.1.16_237**, **Fig. 1.1.16_238**) przedstawiono zmiany nasycenia swobodnego CO₂ (figury po prawej stronie) i rozpuszczonego CO₂ (figury po lewej) dla tych samych interwałów czasowych. Wyraźnie zaznacza się na poniższych ilustracjach fakt, że solanka zawierająca rozpuszczony CO₂ rozprzestrzenia się na znacznie większym obszarze w porównaniu do strefy rezydualnego CO₂.

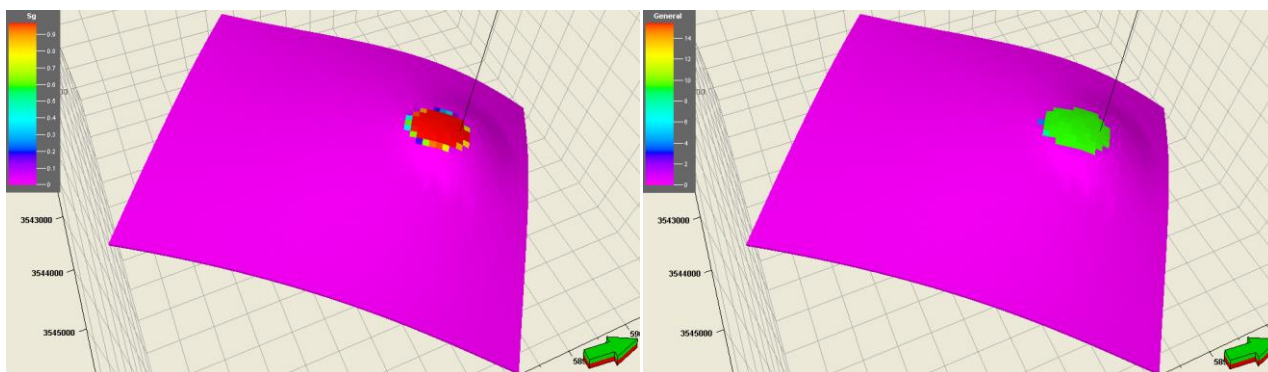
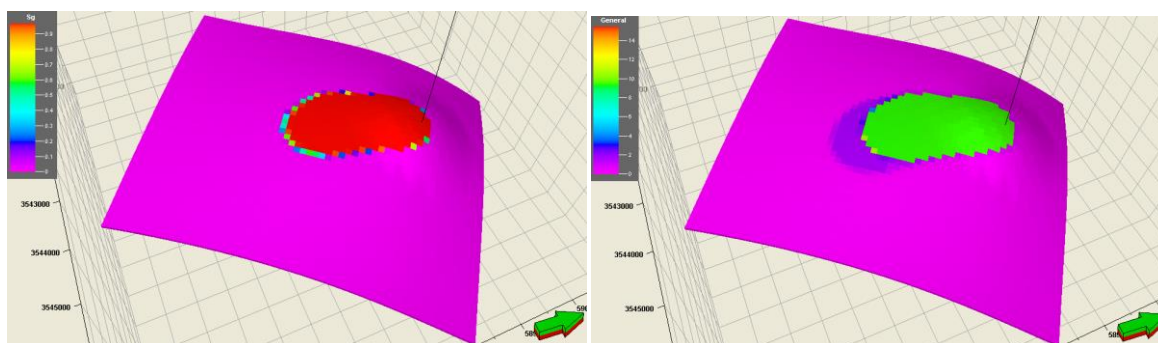
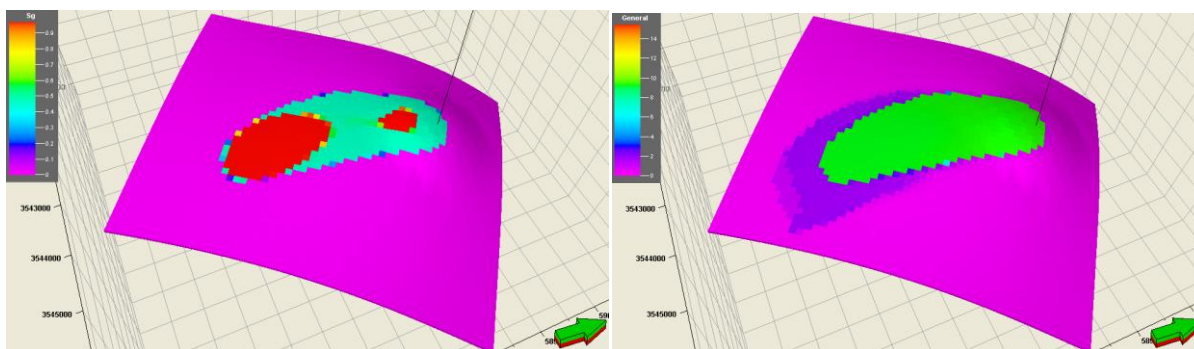


Fig. 1.1.16_236 Zmiany nasycenia swobodnego CO₂ (figury po prawej stronie) i rozpuszczonego CO₂ (figury po lewej) w stropowej warstwie kolektora piensbachu po 5 latach zatłaczania

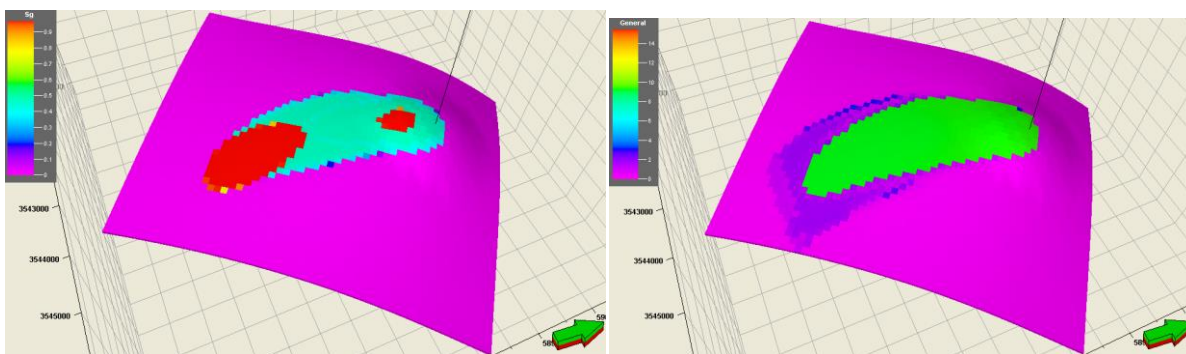
a) po 25 latach zatłaczania



b) 50 lat po zakończeniu zatłaczania



c) 200 lat po zakończeniu zatłaczania



d) 500 lat po zakończeniu zatłaczania

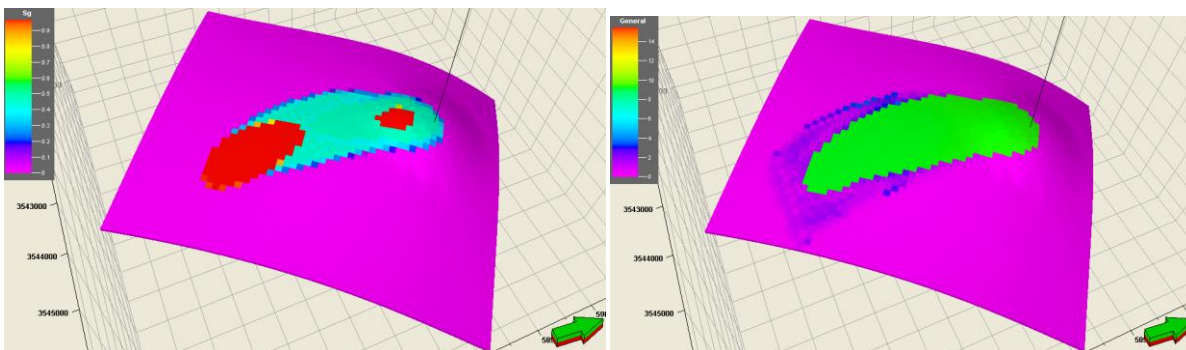


Fig. 1.1.16_237 Zmiany nasycenia swobodnego CO₂ (figury po prawej stronie) i rozpuszczonego CO₂ (figury po lewej) w stropowej warstwie kolektora pliensbachu po a) 25, b) 50, c) 200, d) 500 latach po zakończeniu zatłaczania

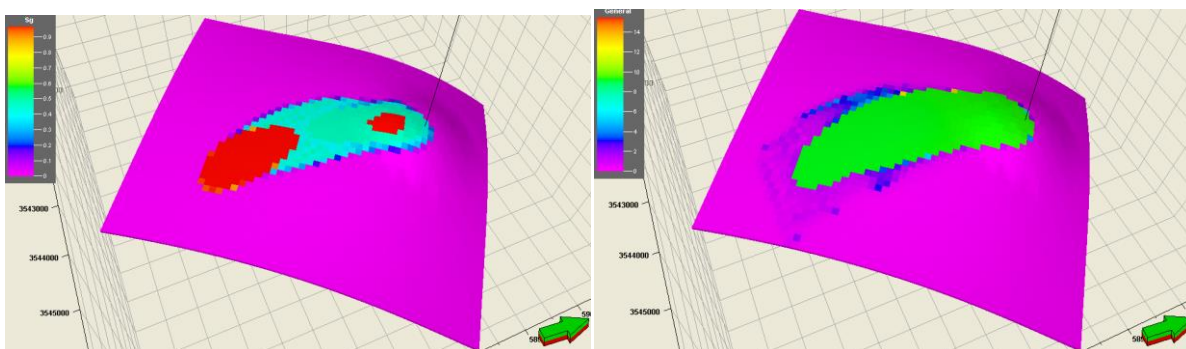


Fig. 1.1.16_238 Zmiany nasycenia swobodnego CO₂ (figury po prawej stronie) i rozpuszczonego CO₂ (figury po lewej) w stropowej warstwie kolektora pliensbachu po 1000 latach po zakończeniu zatłaczania

Na **Fig. 1.1.16_239** przedstawiono zmiany czasowe wielkości dopływu wody do akifera analitycznego w strukturze Suliszewo dla dwóch scenariuszy zatłaczania. Ujemna wartość dopływu oznacza odpływ wody z modelu.

Natomiast **Fig. 1.1.16_240** ilustruje tempo rozpuszczania się zatłaczanego dwutlenku węgla w solance dla dwóch scenariuszy symulacji. Przebieg procesu rozpuszczania się CO₂ w solance w dużej mierze zależy od efektywnej powierzchni kontaktu dwutlenku węgla z solanką (Szott i in. 2010).

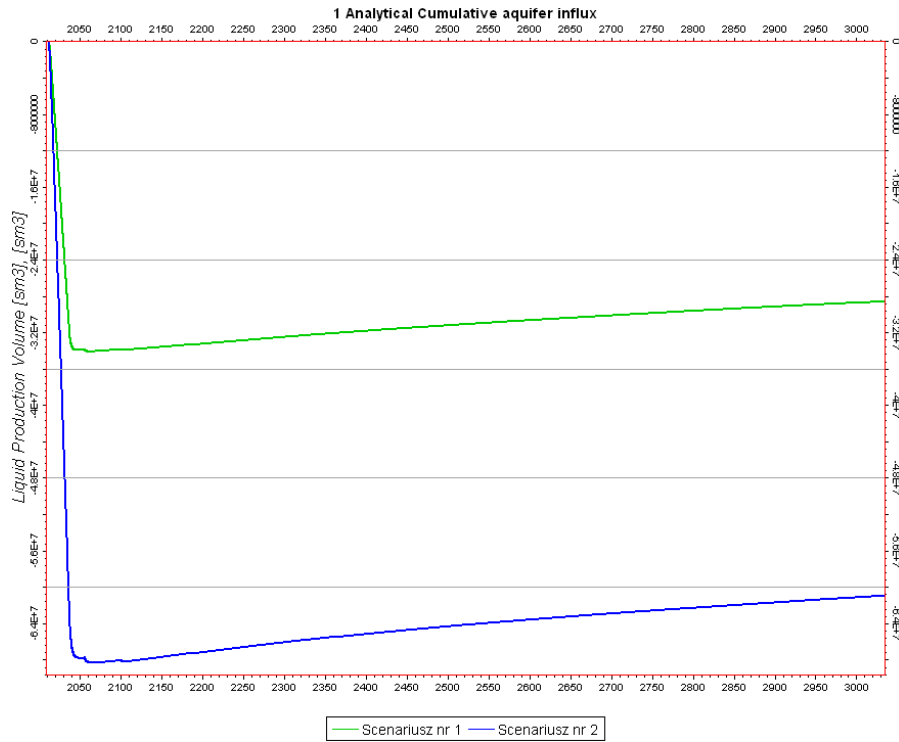


Fig. 1.1.16_239 Porównanie zmian w czasie wielkości dopływu wody do akifera analitycznego dla dwóch scenariuszy zatłaczania CO₂ w strukturze Suliszewo

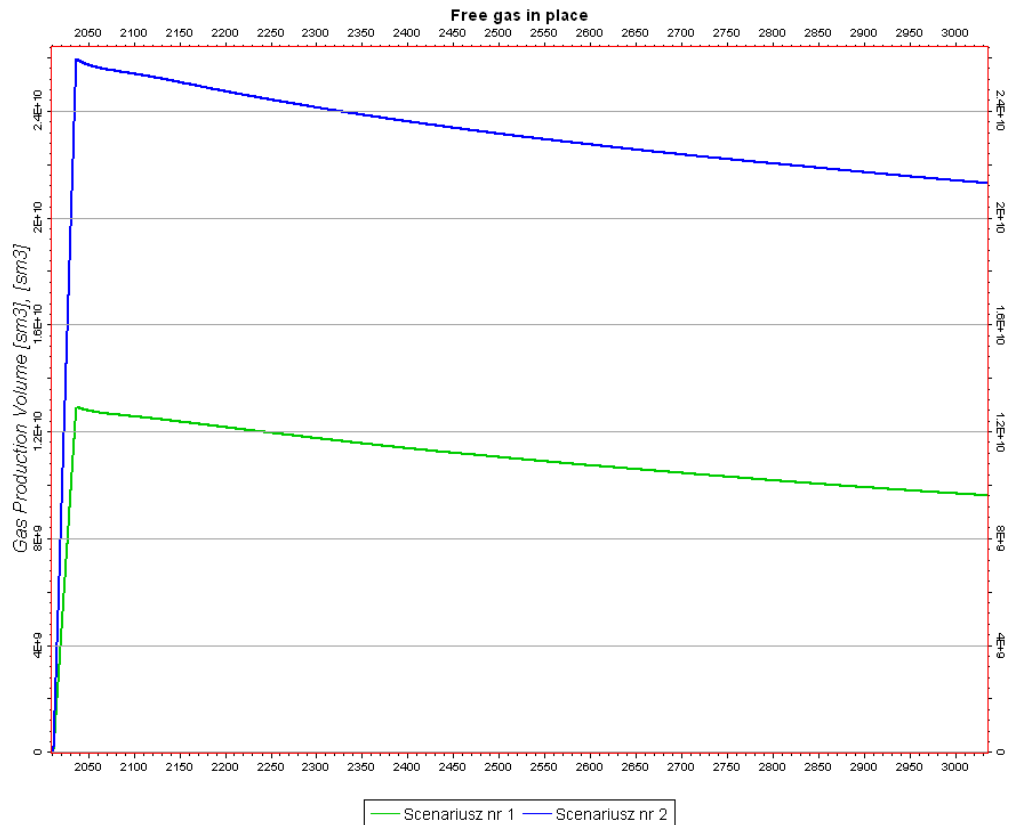
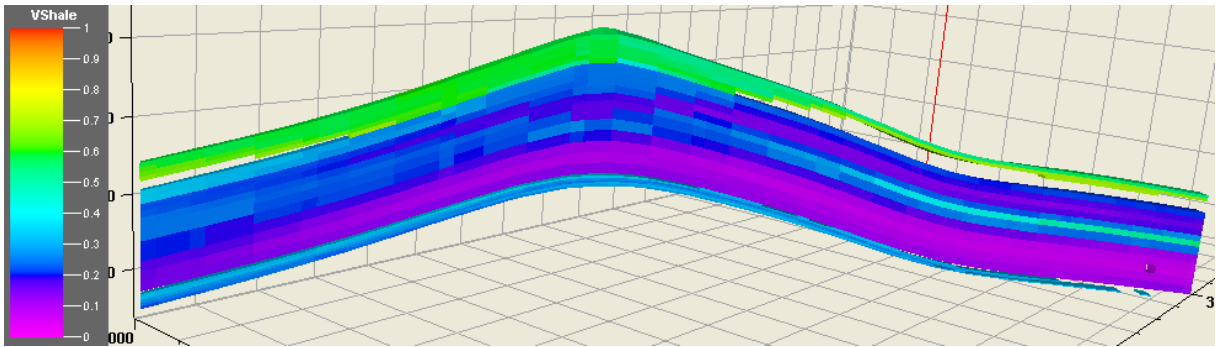


Fig. 1.1.16_240 Porównanie zmian w czasie ilości swobodnego CO₂ w strukturze dla scenariuszy nr 1 i nr 2 w strukturze Suliszewo

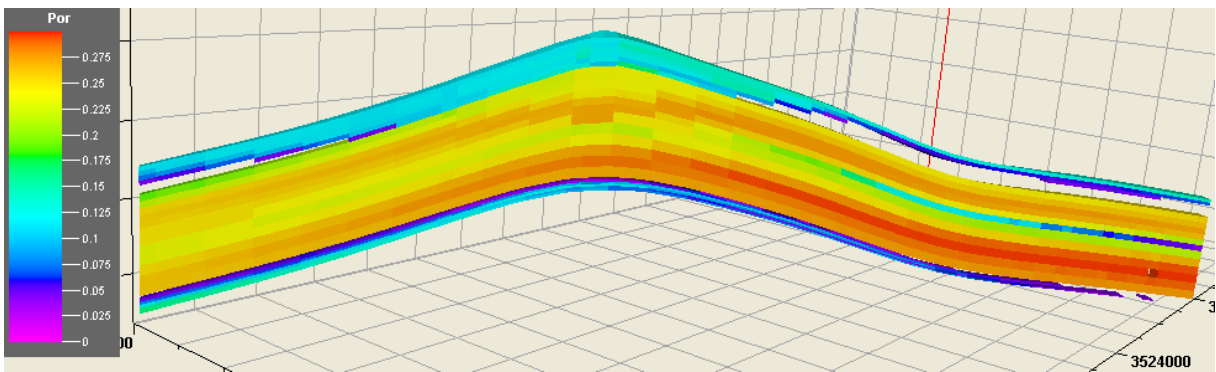
Model Choszczno

Po zastosowaniu metody *cut-offu* dla przepuszczalności i zailenia stwierdzono nieciągłość hydrodynamiczną w przeważającej części warstw Toarku stanowiących uszczelnienie kolektora Pliensbachu. Warstwy uszczelnienia w modelu Choszczno charakteryzują się gorszymi własnościami w porównaniu z analogicznymi skałami nadkładu w analizowanym wcześniej modelu Suliszewo. Modelowane uszczelnienie zbiornika w tym rejonie, zwłaszcza w niektórych rejonach szczytowej partii struktury, posiada niższe wartości zailenia (42-60%) niż w pozostałej części modelu (powyżej 70%). Przepuszczalność warstw uszczelnienia w szczytowej partii struktury zawiera się w przedziale od 12 do 61 mD, a porowatość – od 10 do 16 %. W związku z tym po zastosowaniu metody *cut-offu* dla przepuszczalności na poziomie 0.01 mD, a dla zailenia - 70% stwierdzono przenikanie zatłaczanego CO₂ do komórek warstw uszczelnienia połączonych z warstwami kolektora Pliensbachu. Komórki niewyłączone z symulacji poprzez proces *cut-offu* znajdują się głównie w szczytowej partii struktury (**Fig. 1.1.16_241**).

a)



b)



c)

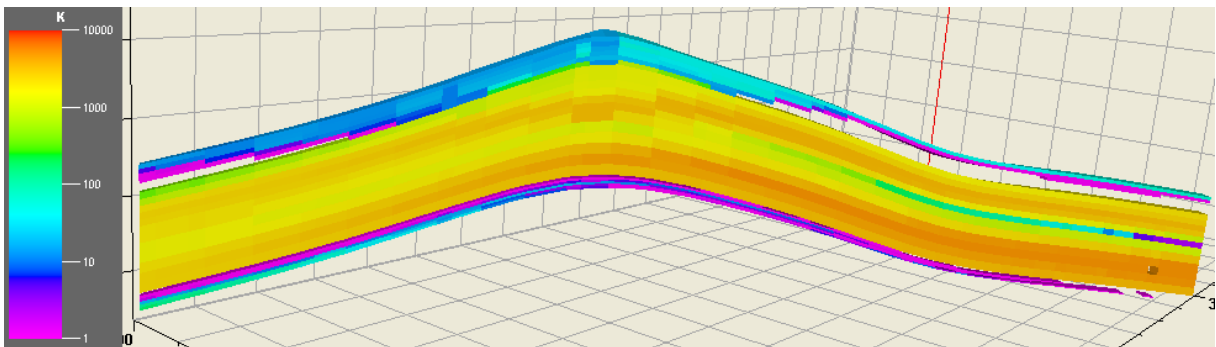


Fig. 1.1.16_241 Parametry warstw uszczelnienia w szczytowej partii struktury:

a) zailenie, b) porowatość, c) przepuszczalność

Scenariusz 1

Ze względu na efektywność procesu sekwestracji rozważano wybór lokalizacji odwiertu iniekcyjnego. Zdecydowano zlokalizować odwiert zatłaczający Choszczno-2 w odległości ok. 2 km od odwiertu Choszczno IG-1 (Fig. 1.1.16_242).

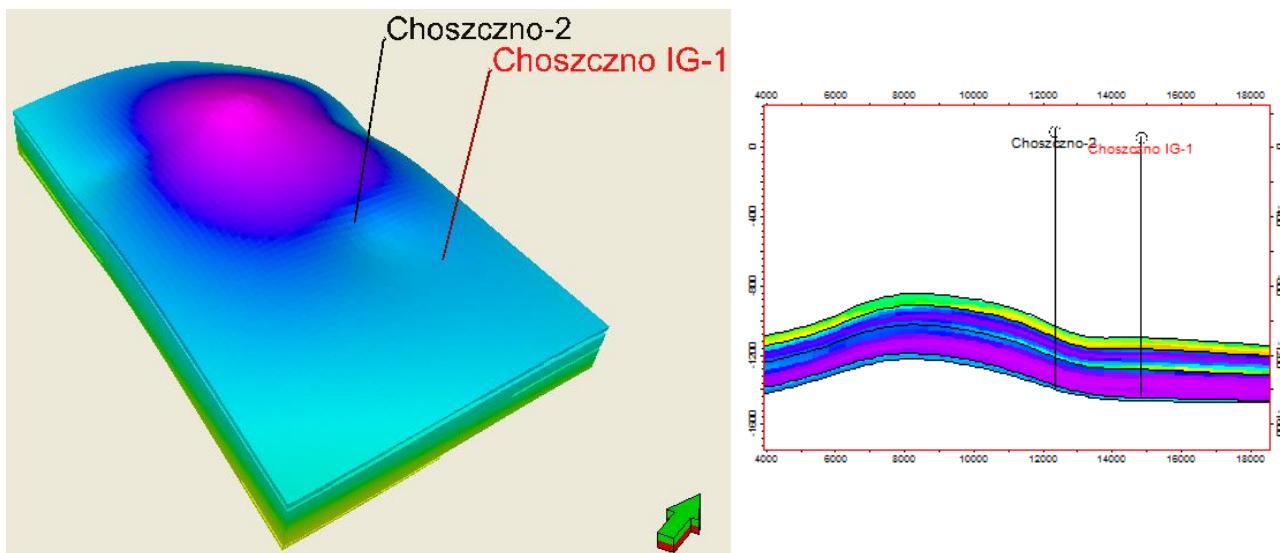


Fig. 1.1.16_242 Lokalizacja odwiertu iniekcyjnego w strukturze Choszczno

W trakcie symulacji zatłaczania CO₂ dla scenariusza nr 1 w modelu Choszczno utrzymano stałą dobową wydajność zatłaczania równą około 1449667 sm³/d (1 Mt CO₂/rok).

Wzrost ciśnienia w warstwach stropowych uszczelnienia (wynikająca z własności i częściowego przenikania CO₂) wyniósł około 0,5 MPa po 25 latach zatłaczania. Następnie zaobserwowano spadek ciśnienia w szczytowych partiach struktury wynikający z rozpuszczania się CO₂ w solance. W efekcie przeprowadzenia długoczasowych symulacji przez kolejne 1000 lat od zakończenia zatłaczania stwierdzono, że już po około 100 latach ciśnienie złożowe w stropie struktury jest już większe o jedynie około 0,15 MPa w stosunku do pierwotnego ciśnienia przed rozpoczęciem zatłaczania dwutlenku węgla.

Ciśnienie denne w odwiercie zatłaczającym zmienia się o około 0,6 MPa, natomiast średnie ciśnienie w strefie zatłaczania – o około 0,5 MPa (Fig. 1.1.16_243).

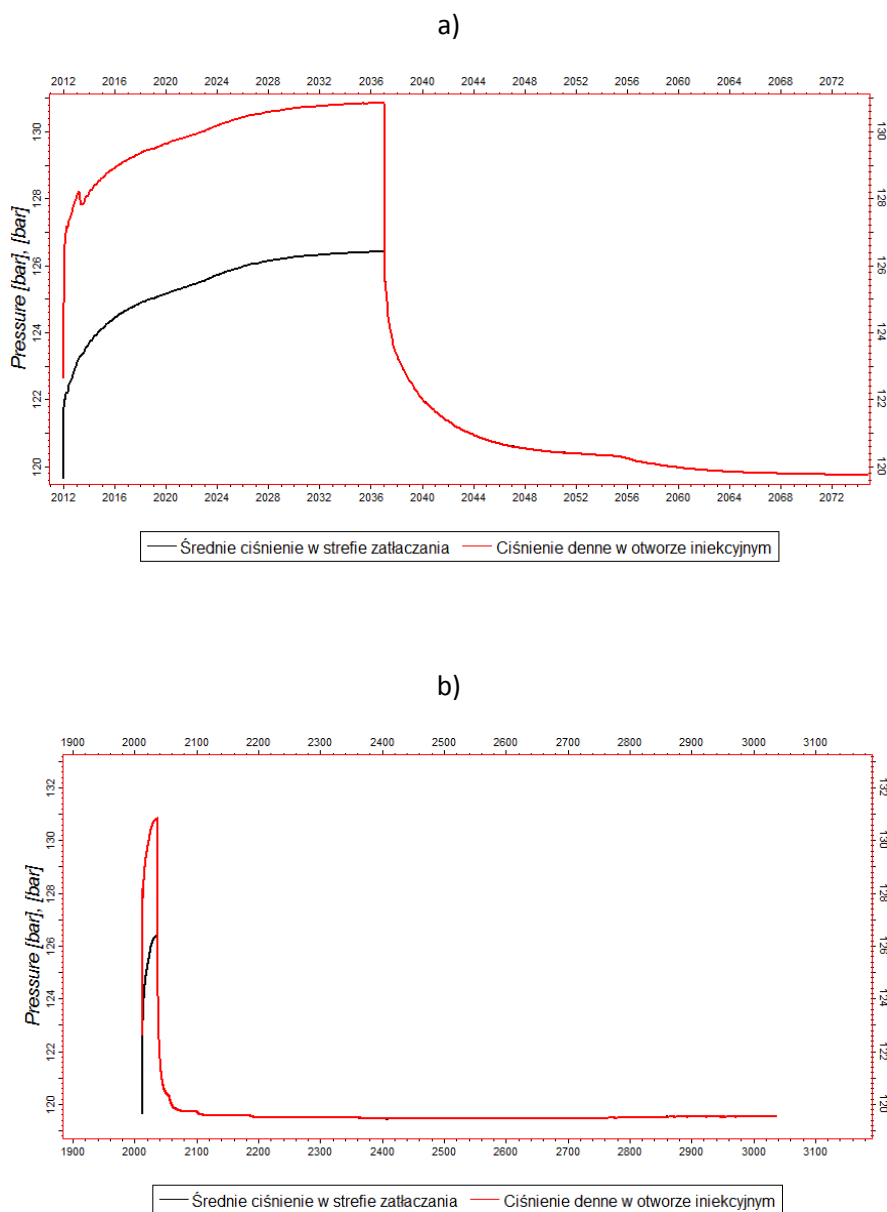


Fig. 1.1.16_243 Ciśnienie denne w otworze Choszczno-2 i średnie ciśnienie złożowego w strefie zatłaczania w trakcie zatłaczania (a) i po jego zakończeniu (b)

W przypadku symulacji procesu iniekcji CO₂ do struktury Choszczno zaobserwowano podobne zachowanie zatłaczanego dwutlenku węgla, a więc grawitacyjną migrację CO₂ w kierunku lokalnego szczytu struktury i równoczesne rozpuszczanie dwutlenku węgla w solance. Jednak, jak już wspomniano wcześniej, warstwy uszczelnienia w niektórych rejonach szczytowej partii omawianej struktury, posiadają niższe wartości zailenia (42-60%) niż w pozostałej części modelu (powyżej 70%). Także przepuszczalność warstw uszczelnienia w szczytowej partii struktury jest wysoka i zawiera się w przedziale od 12 do 61 mD. Po przeprowadzeniu symulacji stwierdzono częściowe przenikanie dwutlenku węgla do komórek warstw uszczelnienia połączonych z warstwami kolektora Pliensbachu. Rozkład nasycenia swobodnego CO₂ w strukturze po 25 latach zatłaczania przedstawiono na przekroju pionowym (**Fig. 1.1.16_244**).

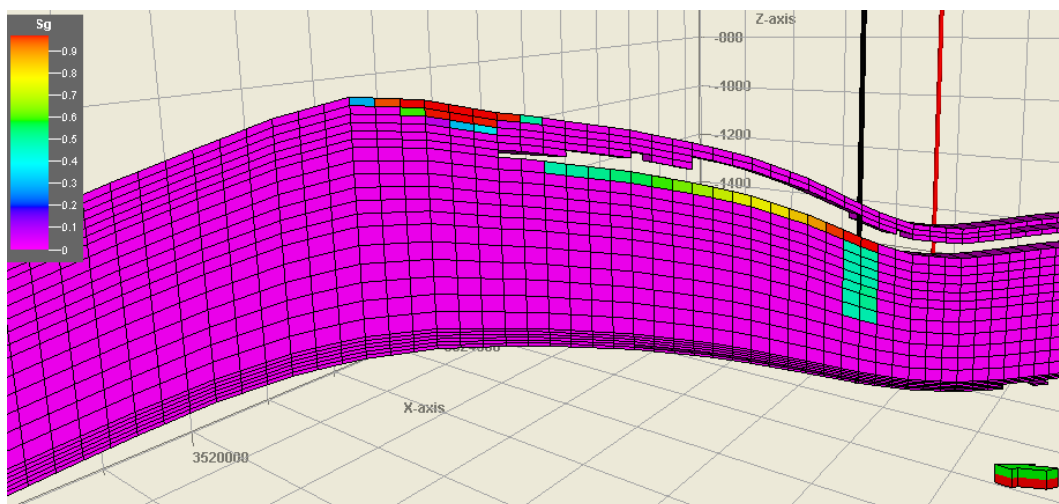


Fig. 1.1.16_244 Rozkład nasycenia swobodnego CO₂ w strukturze po 25 latach zatłaczania

Na kolejnej figurze można zaobserwować powolny proces redukcji fazy swobodnej CO₂ wskutek rozpuszczania się CO₂ w solance i opadania ku dolnym warstwom kolektora. Rozkład nasycenia CO₂ rozpuszczonego w solance po 25 latach zatłaczania przedstawiono na przekroju pionowym za pomocą ułamka molowego (Fig. 1.1.16_245). Ponadto zilustrowano rozkład nasycenia zatłaczanego dwutlenku węgla w warstwie stropowej kolektora pliensbachu (Fig. 1.1.16_246) oraz w warstwie stropowej uszczelnienia zbiornika (Fig. 1.1.16_247).

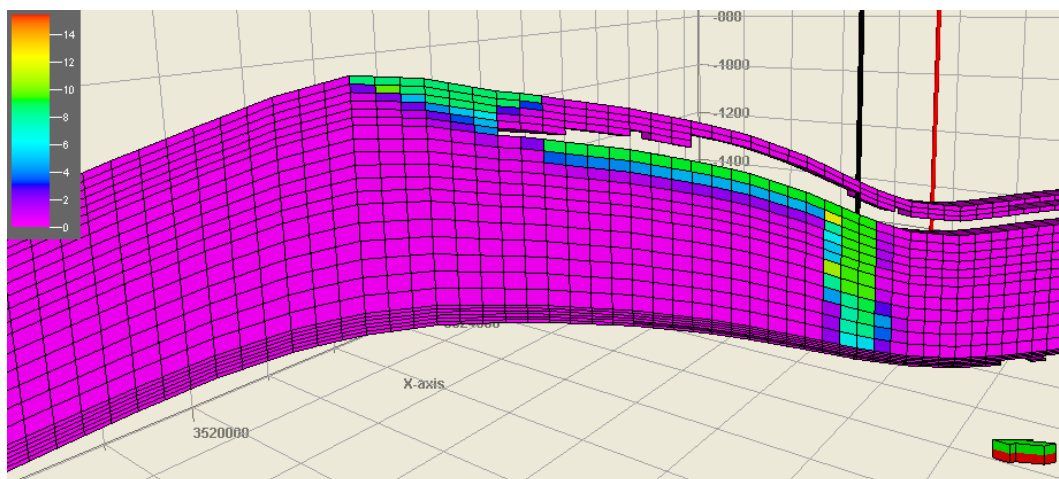


Fig. 1.1.16_245 Rozkład nasycenia CO₂ rozpuszczonego w solance po 25 latach zatłaczania

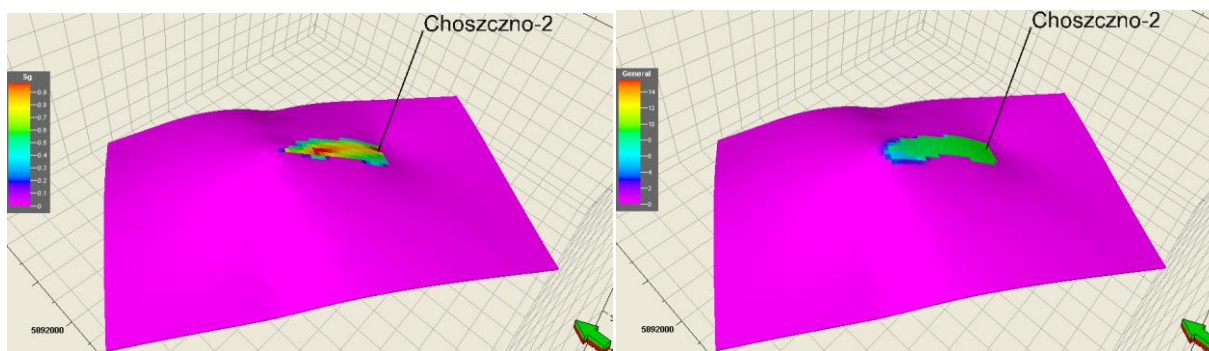


Fig. 1.1.16_246 Rozkład nasycenia swobodnego CO₂ (po lewej) oraz rozpuszczonego CO₂ (po prawej) w warstwie stropowej kolektora piensbachu po 25 latach zatłaczania

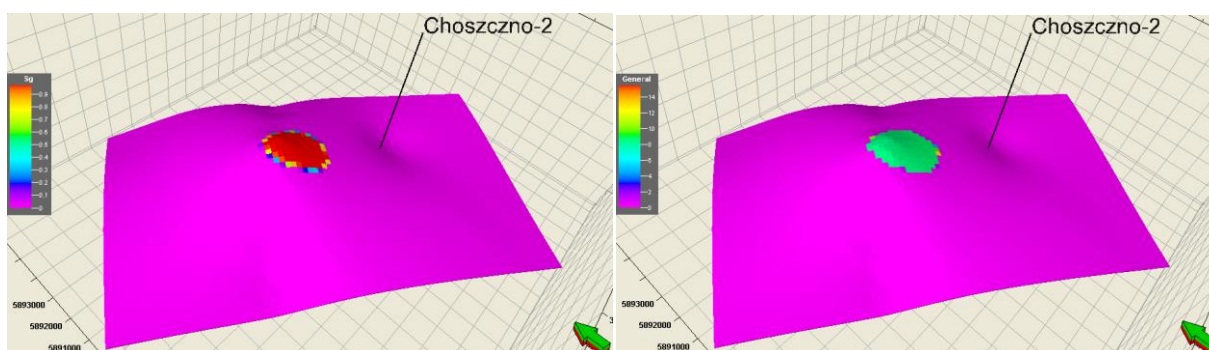


Fig. 1.1.16_247 Rozkład nasycenia swobodnego CO₂ (po lewej) oraz rozpuszczonego CO₂ (po prawej) w warstwie stropowej uszczelnienia toarku po 25 latach zatłaczania

Scenariusz 2

W trakcie symulacji zatłaczania CO₂ dla scenariusza nr 2 w modelu Choszczno utrzymano stałą dobową wydajność zatłaczania równą około 2899334sm³/d (2 Mt CO₂/rok).

Ciśnienie denne w odwiercie zatłaczającym zmienia się o około 0,7 MPa, natomiast średnie ciśnienie w strefie zatłaczania – o około 0,9 MPa (**Fig. 1.1.16_248**). Na **Fig. 1.1.16_249** oraz **Fig. 1.1.16_250** przedstawiono porównanie wyżej wymienionych wielkości ciśnienia dla dwóch scenariuszy zatłaczania.

Wzrost ciśnienia w warstwach stropowych uszczelnienia wyniósł około 1,2 MPa po 25 latach zatłaczania. Dla porównania wzrost tego samego ciśnienia dla scenariusza 1 (zatłaczanie z wydajnością 1 Mt CO₂/rok) wyniósł około 0,5 MPa.

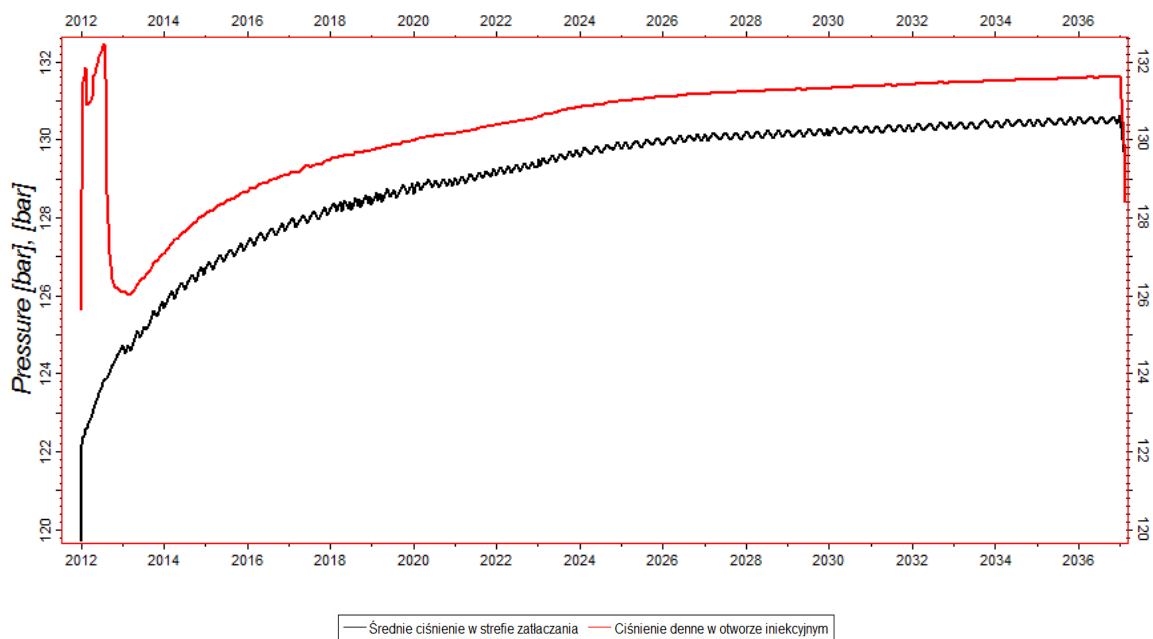


Fig. 1.1.16_248 Ciśnienie denne w otworze Choszczno-2 i średnie ciśnienie złożowego w strefie zatłaczania

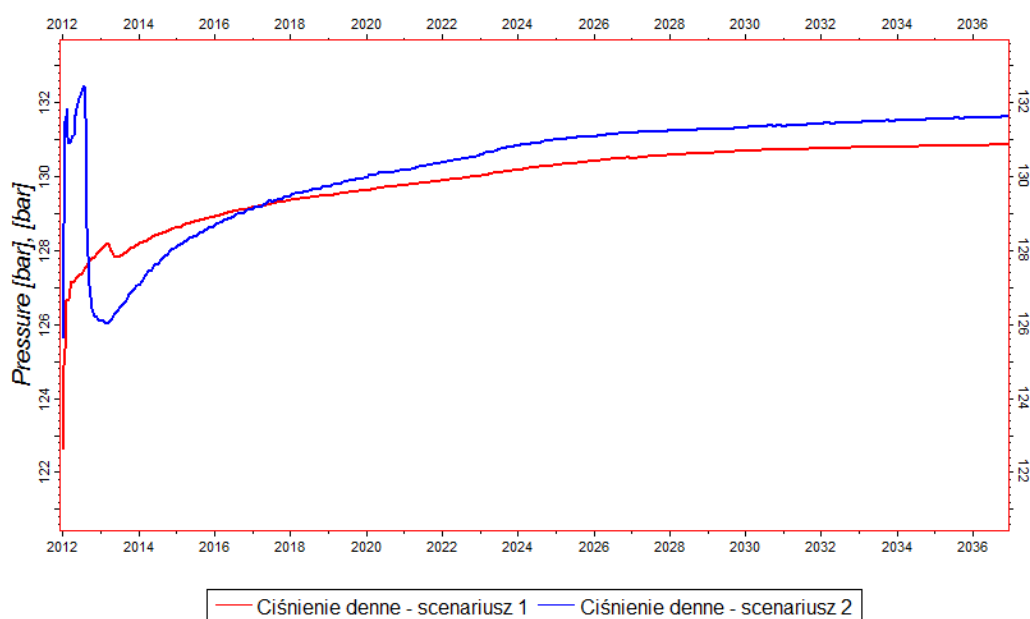


Fig. 1.1.16_249 Porównanie zmian w czasie ciśnienia dennego w otworze iniekcyjnym dla dwóch scenariuszy zatłaczania

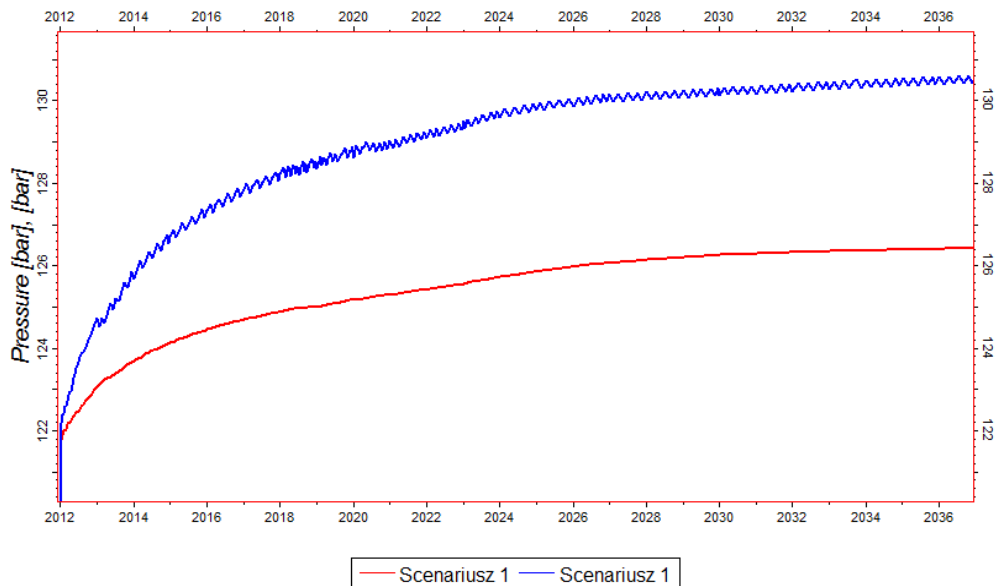


Fig. 1.1.16_250 Porównanie zmian w czasie średniego ciśnienia w strefie zatłaczania dla dwóch scenariuszy zatłaczania

W przypadku symulacji procesu zatłaczania CO₂ z wydajnością 2 Mt CO₂/rok tempo rozprzestrzeniania się dwutlenku węgla i wielkość obszaru nasyconego CO₂ jest większe w porównaniu do wyników symulacji zatłaczania z wydajnością 1 Mt CO₂/rok. Na figurach **Fig. 1.1.16_251 – 1.1.16_254** przedstawiono, w analogiczny sposób jak dla scenariusza nr 1, wyniki symulacji według scenariusza nr 2 dla struktury Choszczno.

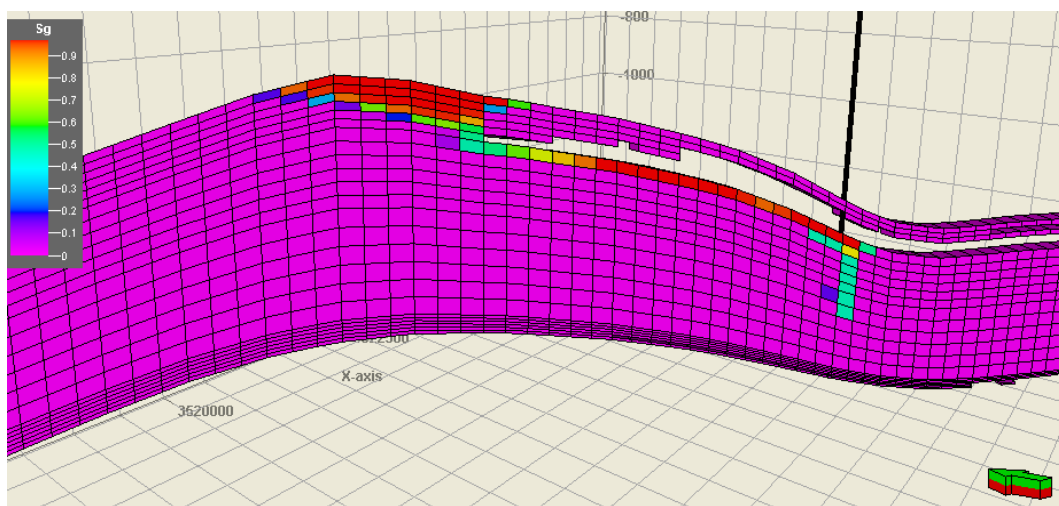


Fig. 1.1.16_251 Rozkład nasycenia swobodnego CO₂ w strukturze po 25 latach zatłaczania

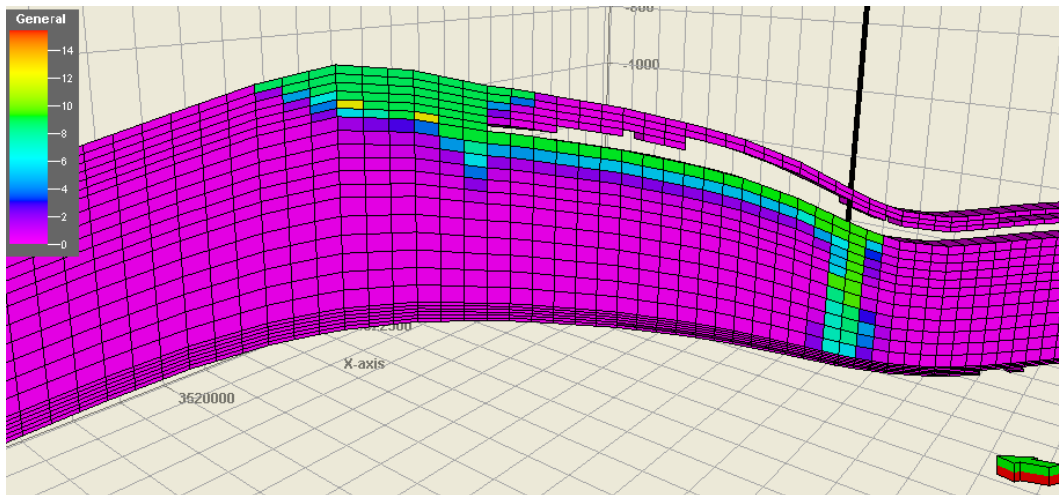


Fig. 1.1.16_252 Rozkład nasycenia CO₂ rozpuszczonego w solance po 25 latach zatłaczania

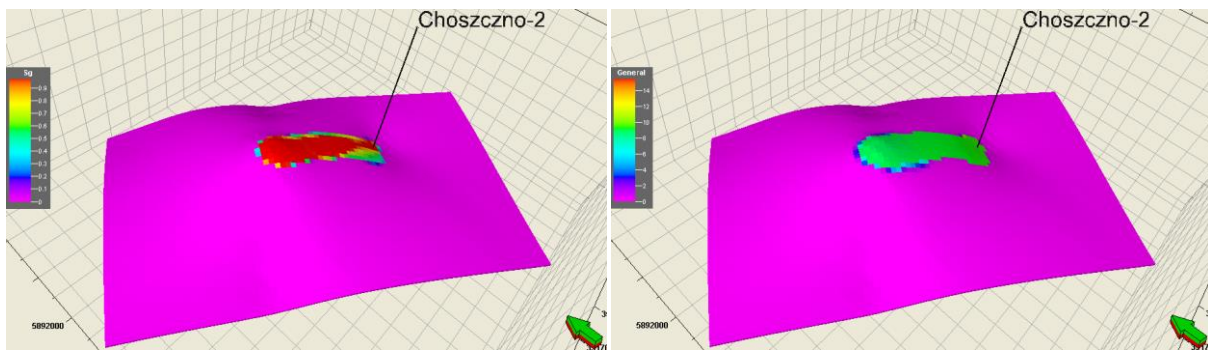


Fig. 1.1.16_253 Rozkład nasycenia swobodnego CO₂ (po lewej) oraz rozpuszczonego CO₂ (po prawej) w warstwie stropowej kolektora ptiensbachu po 25 latach zatłaczania



Fig. 1.1.16_254 Rozkład nasycenia swobodnego CO₂ (po lewej) oraz rozpuszczonego CO₂ (po prawej) w warstwie stropowej uszczelnienia toarku po 25 latach zatłaczania

Podsumowanie

W ramach niniejszego zadania skonstruowano dynamiczne modele symulacyjne dla struktury Choszczno-Suliszewo. Wykorzystano w tym celu statyczny model regionalny wykonany wcześniej w ramach prac AGH. Dane geologiczne zawarte w modelu statycznym, dotyczące parametrów zbiornikowych w tym rejonie, wzbogacono o parametry płynów złożowych konieczne do przeprowadzenia symulacji procesu zatłaczania CO₂ do poziomów solankowych. Wykonano wielokrotne symulacje omawianego procesu według założonych scenariuszy zatłaczania zróżnicowanych pod względem wydajności. Po uzyskaniu wyników obliczeń numerycznych przeanalizowano zmiany ciśnień charakterystycznych dla procesu sekwestracji oraz przedstawiono w postaci graficznej przestrzenny rozkład nasycenia swobodnego CO₂ w strukturze oraz dwutlenku węgla rozpuszczonego w solance.

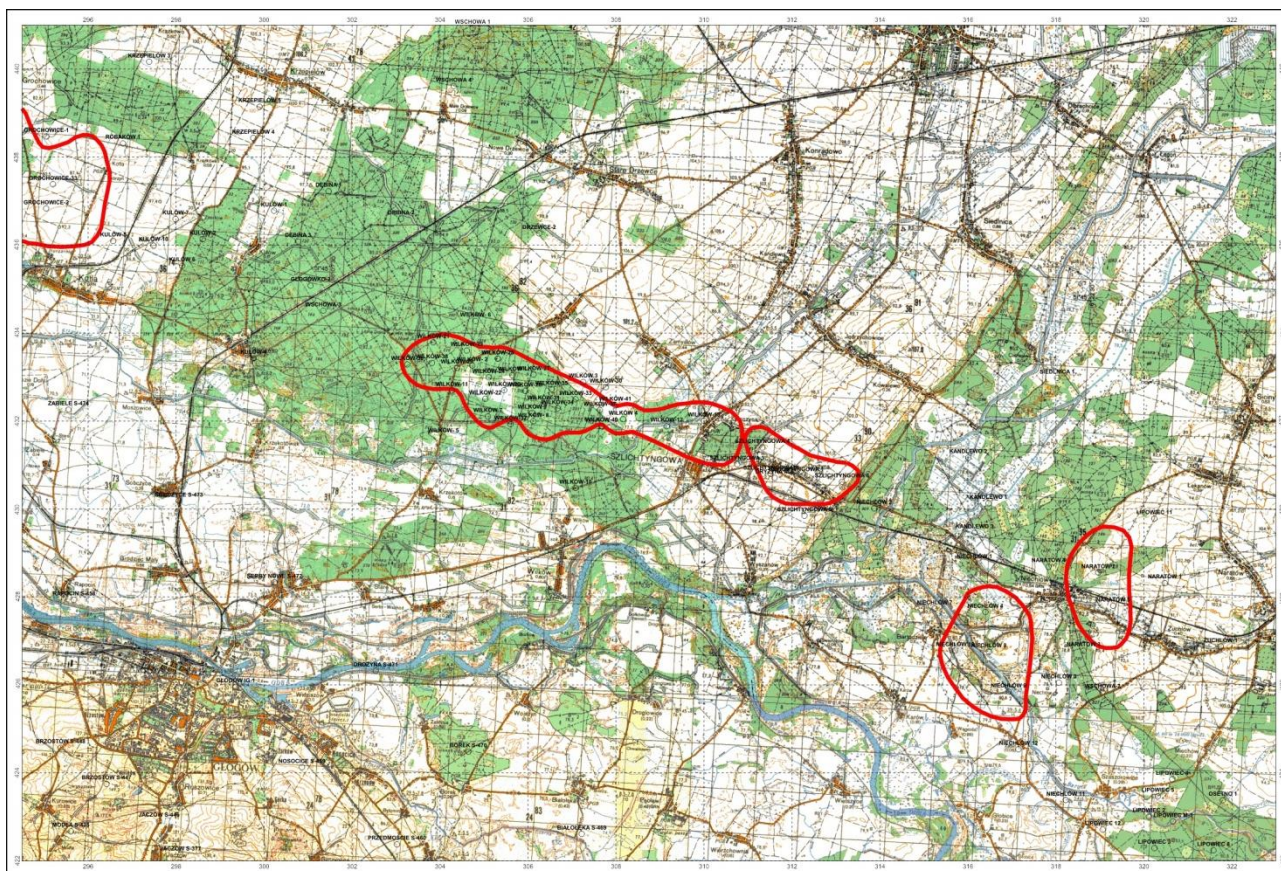
Podczas modelowania procesu sekwestracji CO₂ w warstwach wodonośnych dolnej jury w modelu Suliszewo dla obu scenariuszy zatłaczania osiągnięto założone wydajności iniekcji CO₂. Zaobserwowany wzrost ciśnień wydaje się nie stanowić zagrożenia dla szczelności struktury Suliszewo. Stwierdzono dużą efektywność procesu sekwestracji dzięki zjawisku rozpuszczania się CO₂ w solance i wywołanym przez to ruchem konwekcyjnym solanki wzbogaconej o dwutlenek węgla. Efektem tego jest wzrost pojemności sekwestracyjnej struktury oraz trwałe długoterminowe uwięzienie zatłoczonego dwutlenku węgla.

Po przeprowadzeniu symulacji w modelu Choszczno zaobserwowano proces przemieszczania się zatłoczonego CO₂ z warstw kolektora do warstw stanowiących uszczelnienie zbiornika. Zjawisko to ma miejsce w szczytowych partiach struktury Choszczno, a główną przyczyną są lokalnie występujące w tym rejonie gorsze parametry warstw uszczelnienia.

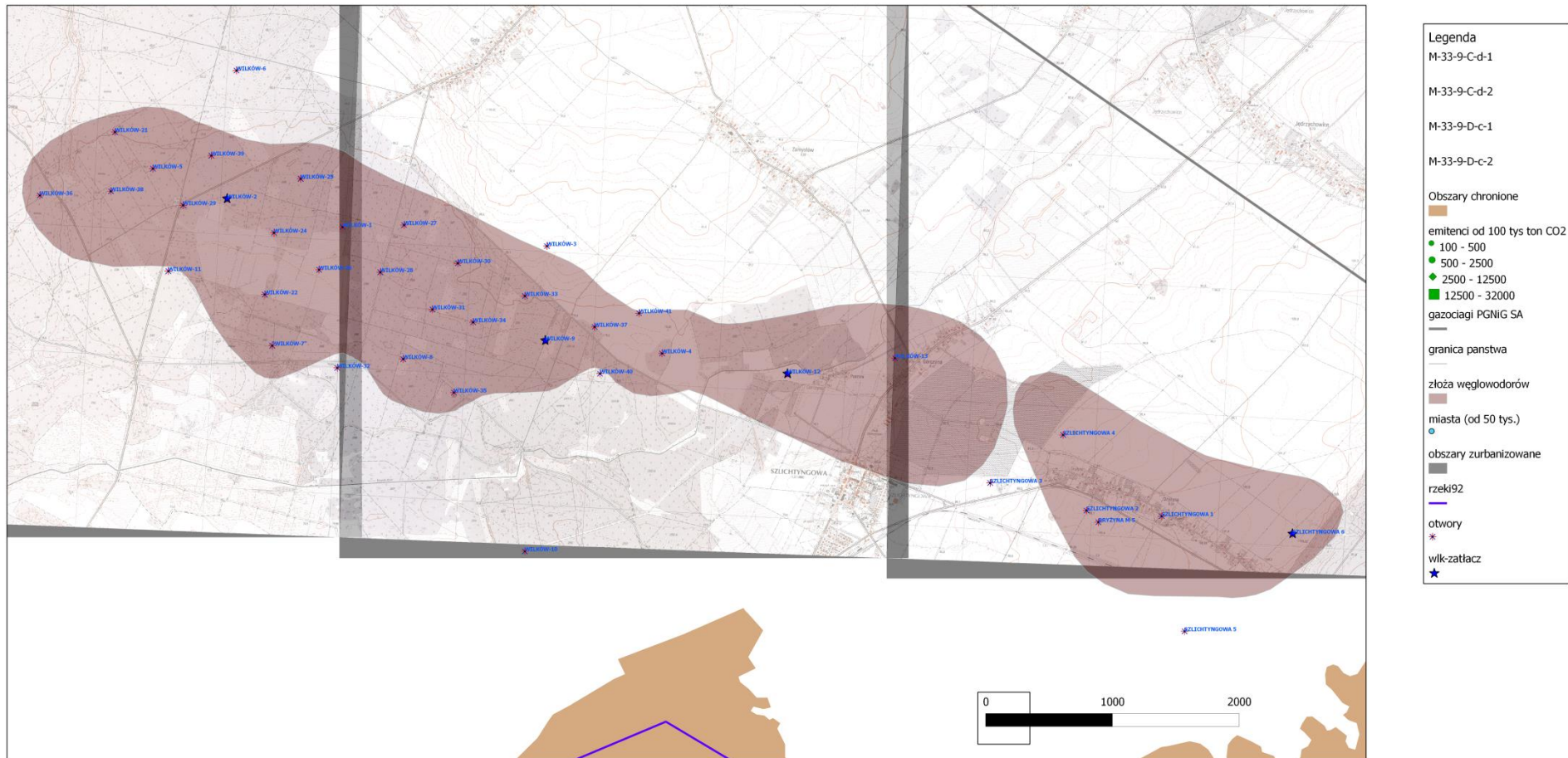
Struktury naftowe

W przypadku kolektorów w wyeksploatowanych złożach gazu ziemnego i/lub ropy naftowej - prace wykonano dla dwóch (trzech) obiektów:

- złożo 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), dla którego symulacje zatłaczania CO₂ wykonał AGH we współpracy z **PIG-PIB** (patrz niżej)
- złożo ropy Nosówka koło Rzeszowa (możliwe wspomaganie wydobycia ropy przez zatłaczanie CO₂ od niedużego emitenta z Rzeszowa lub Tarnowa), dla którego symulacje zatłaczania CO₂ wykonał **INiG** (patrz niżej)
- złożo gazu i kondensatu Łątkta 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 między 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.



Rys. 5 Lokalizacja złoża gazu Wilków (+Szlichtyngowa) na tle mapy topograficznej



Rys. 6 Lokalizacja złoża gazu Wilków (+Szlichtyngowa) i otworów zatłaczających na tle szczegółowej mapy topograficznej (Adam Wójcicki)

Prace PIG-PIB obejmowały przygotowanie założeń dla komputerowych modeli dynamicznych procesów zatłaczania dwutlenku węgla do składowiska z wykorzystaniem modelu statycznego z **1.1.15** dla obiektu struktury naftowej - złoża gazu Wilków (**Rys. 5**), charakteryzujących efektywność i bezpieczeństwo składowania. Określono przy tym wydajności zatłaczania oraz ilości otworów zatłaczających.

Przyjęto zatłaczanie CO₂ w ilości w sumie 1.8 mln ton rocznie z wykorzystaniem 5 odwiertów (**Rys. 6**): Wilków-5, Wilków-8, Wilków-9, Wilków-22, Wilków-27. Dla otworów tych dostępne były informacje na temat wydajności produkcji gazu (dokumentacje złożowe: Dąbrowska-Żurawik, Czekański, 1981; Dąbrowska-Żurawik, 1982; Tenerowicz, Piątkowska-Kudła, 1994), skąd można było oszacować proporcjonalnie wydajności tłoczenia CO₂.

Modelowanie dynamiczne procesów zatłaczania CO₂ do składowiska (złoża gazu Wilków) (AGH)

(Jakub Siemek, Stanisław Nagy, Łukasz Klimkowski)

Ogólna charakterystyka złoża gazu ziemnego Wilków

Złoże gazu ziemnego Wilków położone jest w północnej części województwa dolnośląskiego na terenie powiatu głogowskiego oraz gmin Kotła i Szlichtyngowa, podlega Okręgowemu Urzędowi Górniczemu we Wrocławiu.

Pole powierzchni złoża, w przybliżeniu o kształcie owalnym, wydłużonym w kierunku NE – SW zamyka się pomiędzy następującymi współrzędnymi:

- szerokość geograficzna północna od 51° 42' 47" do 51° 44' 17"
- długość geograficzna wschodnia od 16° 08' 50" do 16° 15' 42"

Złoże Wilków pod względem geologicznym położone jest w środkowej części Monokliny Przedsudeckiej jako masywowe złoża związane z przystropową partią piaszczystych utworów czerwonego spągowca. Górną granicę stanowi wapień podstawowy z łupkiem miedzionośnym oraz utwory anhydrytowo-solne cykl Werra, dolną zaś woda podścielająca, której głębokość ustalono na 1509 m. Granicę złoża w płaszczyźnie poziomej wyznacza izolinia przecięcia wody podścielającej z powierzchnią stropu czerwonego spągowca.

Powierzchnia złoża wynosi 9,29 km², utwory czerwonego spągowca na strukturze Wilków posiadają dość jednorodne wykształcenie litologiczne oraz własności zbiornikowe. Całą miąższość utworów czerwonego spągowca uznano za miąższość efektywną, maksymalna miąższość złoża została przewiercona w otworze Wilków-24 i wynosi 107,9 m. Średnia miąższość efektywna dla całego złoża Wilków wynosi 39,85 m. Średnia porowatość złoża wg badań laboratoryjnych wynosi 14,96%, a przepuszczalność złoża 66,75 mD.

Gaz ziemny ze złoża Wilków to bezgazolinowy gaz metanowy zaazotowany, nie zawierający siarkowodoru. Średni skład gazu (w % obj.): CH₄ – 37,68; C₂H₆ – 1,01; C₃H₈ – 0,1; C₄H₁₀ – 0,04; C₅H₁₂ – 0,02; C₆H₁₄ – 0,003; N₂ – 60,83; CO₂ – 0,04; H₂ – 0,03; He – 0,25.

Potwierdzone zasoby geologiczne złoża Wilków wynoszą 5,7 mld nm³, a potwierdzone całkowite zasoby wydobywane 4,4 mld nm³ gazu ziemnego.

Złoże udostępnione jest 24 odwiertami eksploatacyjnymi, z których wydobyty gaz, po wstępnym przygotowaniu go do transportu, przesyłany jest do Odazotowni w Odolanowie.

Model numeryczny

Budowa modelu

Model statyczny złoża Wilków-Szlichtyngowa zbudowano na bazie siatki typu *corner point* z bloków o wymiarach poziomych 100x100 m w oparciu o mapę strukturalną stropu i mapy podstawowych parametrów zbiornikowych. Liczba bloków w kierunkach I i J to 125x55; w modelu wydzielono 14 warstw o zróżnicowanych parametrach. Całkowita liczba bloków wynosi 99077, w tym 75009 bloków aktywnych, biorących udział w symulacji. Mapę stropu oraz rozkłady miąższości całkowitej i porowatości średniej w modelu przedstawiono na poniższych figurach.

Pomimo stwierdzonej różnicy w głębokościach konturu gaz-woda pomiędzy złożami Wilków (1509 m) i Szlichtyngowa (1472.5 m) w modelu przyjęto stały kontur na głębokości 1509 m. Jednak ze względu na brak jednoznacznego stwierdzenia kontaktu hydrodynamicznego pomiędzy złożami przyjęto wariant z barierą nieprzepuszczalną oddzielającą oba złoża.

Model PVT płynu złożowego przygotowano w oparciu o tzw. *lumping*. Składniki gazu zostały pogrupowane a ich parametry uśrednione, dzięki czemu liczba pseudo-komponentów biorących udział w symulacji została zredukowana do 5.

Model zainicjowano przy ciśnieniu 16.350 MPa na głębokości odniesienia 1500 m co dało 16,325 MPa początkowego średniego ciśnienia złożowego. Przyjęto stałą temperaturę złożową równą 53°C. W takich warunkach zasoby początkowe złoża wyniosły ok. 5,6 mld nm³ gazu ziemnego o dużej zawartości azotu.

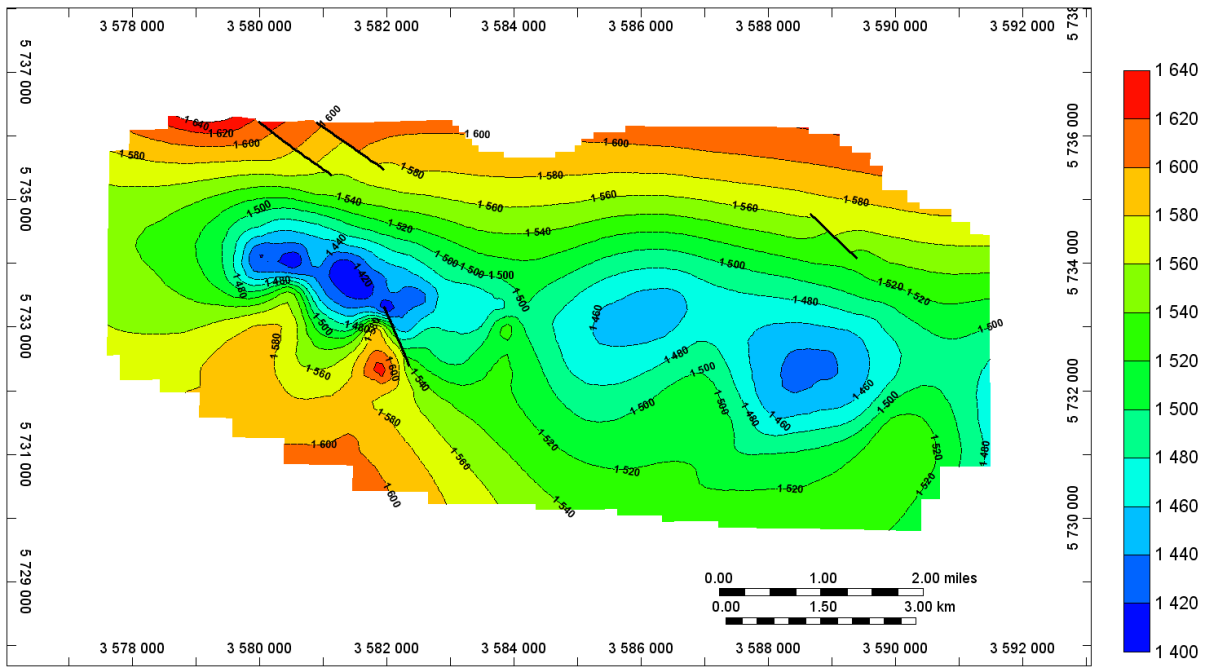


Fig. 1.1.16_255 Mapa stropu złóż Wilków-Szlichtyngowa

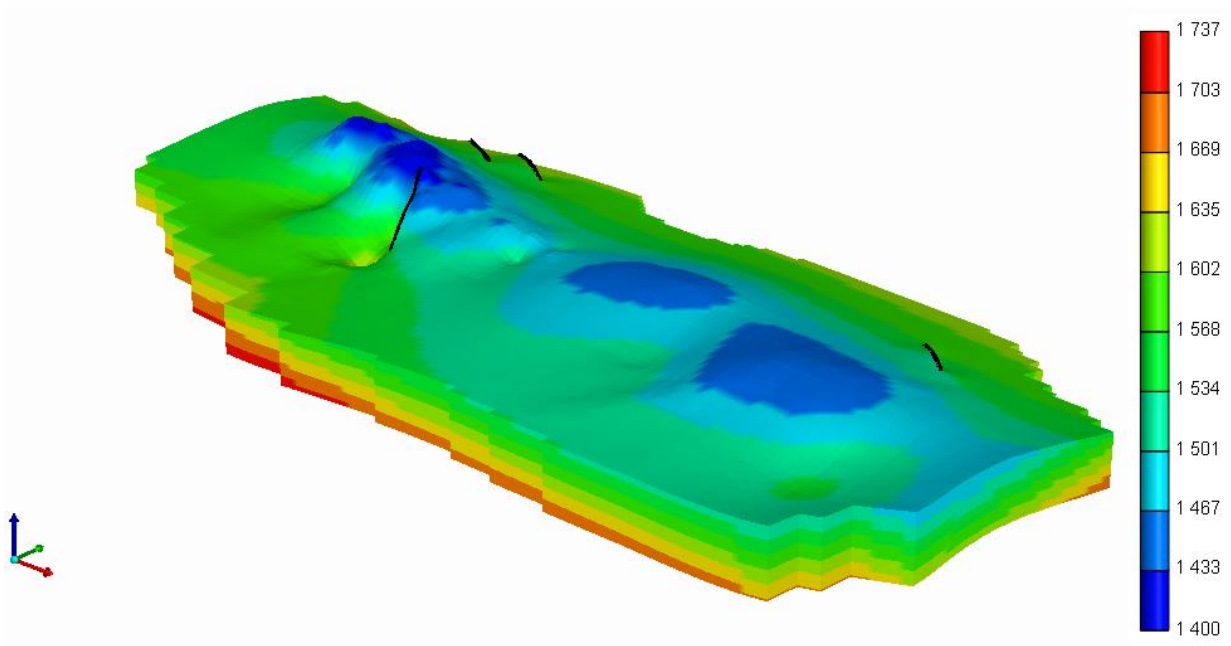


Fig. 1.1.16_256 Widok 3D modelu złoża Wilków-Szlichtyngowa (głębokość zalegania warstw)

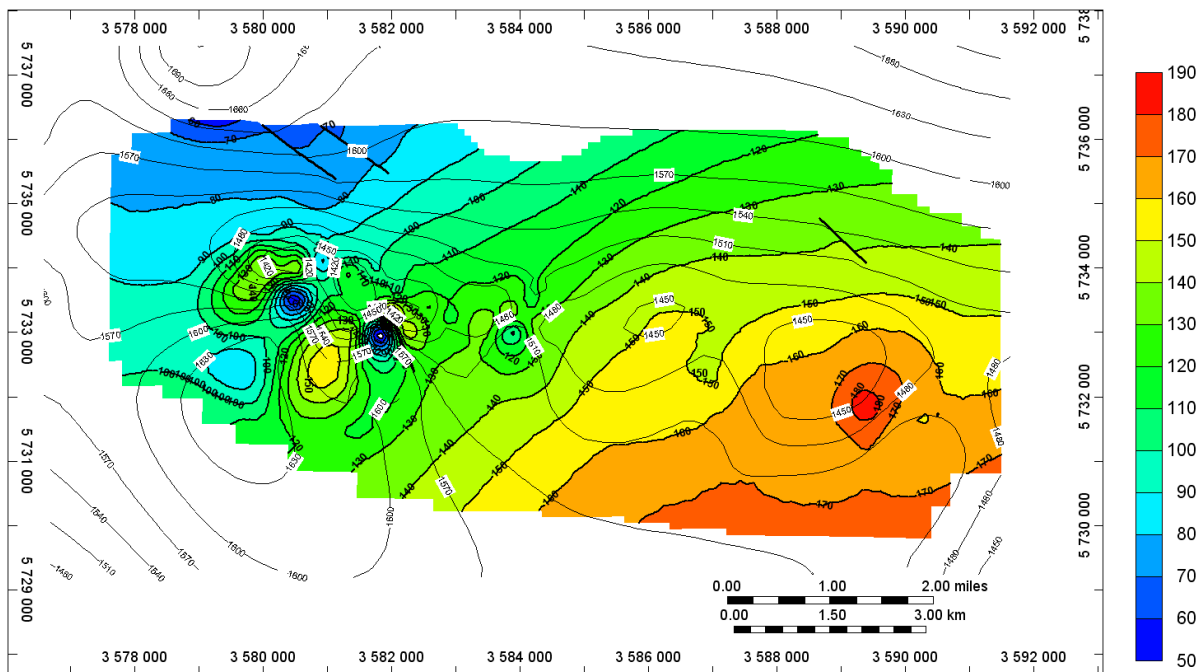


Fig. 1.1.16_257 Miąższość całkowita złóż Wilków-Szlichtyngowa na tle mapy strukturalnej stropu

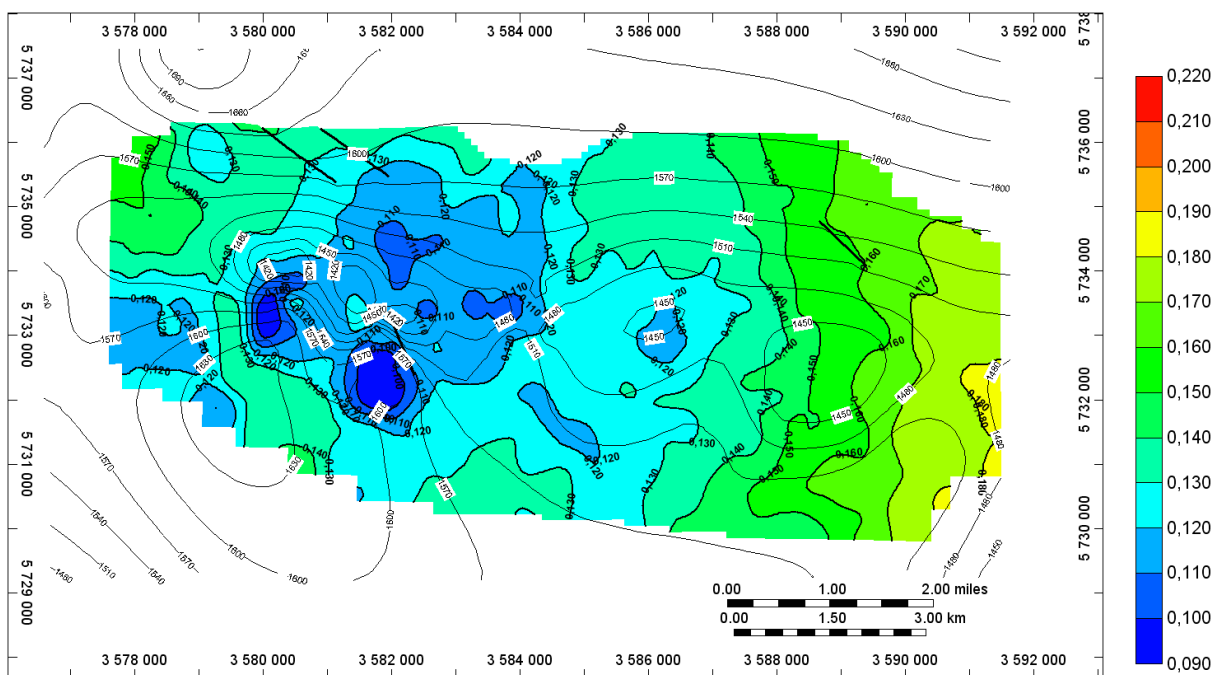


Fig. 1.1.16_258 Porowatość średnia złóż Wilków-Szlichtyngowa na tle mapy strukturalnej stropu

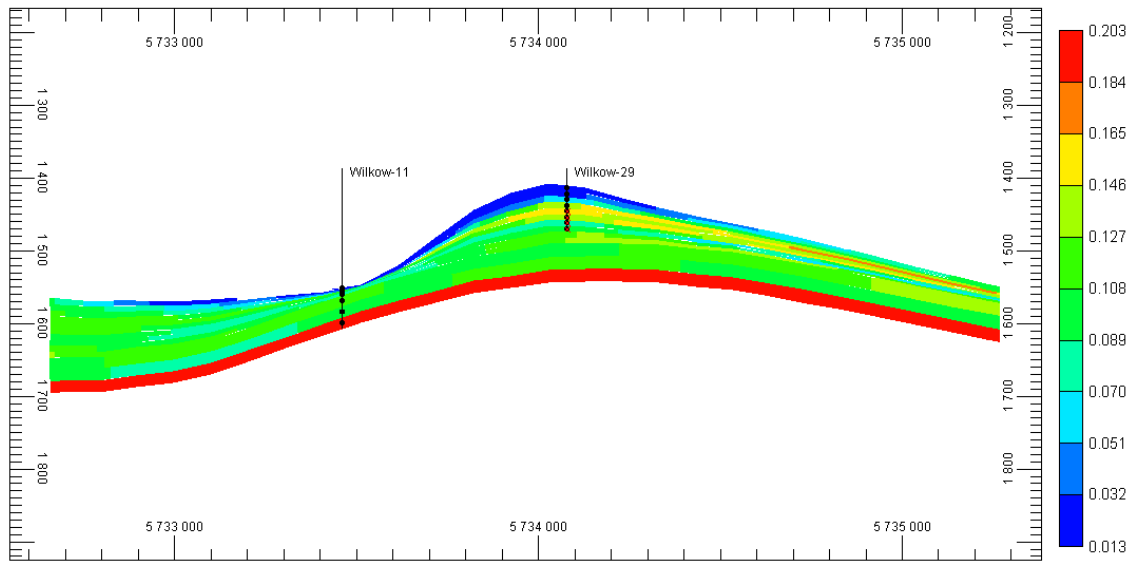


Fig. 1.1.16_259 Przekrój przez odwiertny Wilków-11 (poza konturem gaz-woda) i Wilków-29 (segment JK 31 modelu) – na przekroju przedstawiono porowatość

Historia eksploatacji, kalibracja modelu

Autorzy dysponowali bardzo ograniczoną ilością danych odnośnie historii eksploatacji złoża Wilków. Eksploatację z okresu 11.1988 – 12.1993 r. odtworzono w oparciu o roczne wydobywanie z poszczególnych odwiertów, natomiast dla okresu 1994-2010 dostępne było jedynie roczne zestawienie wydobywania gazu oraz średnie ciśnienie złożowe. Dla poszczególnych odwiertów wydajności zostały wyznaczone przez symulator jako udział wydajności sumarycznej proporcjonalnie do wydajności dopuszczalnej każdego odwiertu oraz aktualnego potencjału danego odwiertu. Sumaryczną wydajność eksploatacji oraz wydobywanie do września 2010 r. przedstawiono na **Fig. 1.1.16_260**. Wydajność eksploatacji oraz wydobywanie sumaryczne w latach 1988 – 2010 przedstawiono na **Fig. 1.1.16_261**. Biorąc pod uwagę jakość oraz ilość danych historycznych Autorzy uzyskali stosunkowo dobre dopasowanie modelu. Na **Fig. 1.1.16_261** przedstawiono porównanie średniego ciśnienia złożowego zmierzonego oraz uzyskanego w wyniku symulacji. Rozbieżności w okolicy roku 2000 wynikają ze stosunkowo nagłego obniżenia wydajności odbioru gazu w tym czasie oraz włączenia w roku 2001 do eksploatacji odwiertów Wilków-12 i Wilków-13 zlokalizowanych na wzniesieniu pomiędzy złożami Wilków i Szlichtyngowa.

W trakcie budowy modelu złoża pewną trudność stanowił również brak jasnych informacji na temat granicy pomiędzy złożami Wilków i Szlichtyngowa. Na potrzeby symulacji linia podziału została wyznaczona w taki sposób, aby uzyskać racjonalną wartość zasobów początkowych. Przyjęto również brak kontaktu hydrodynamicznego pomiędzy złożami. W trakcie kalibracji modelu Autorzy doszli również do wniosku, iż kontakt hydrodynamiczny pomiędzy główną częścią złoża a wzniesieniem na południowym wschodzie jest znacznie ograniczony.

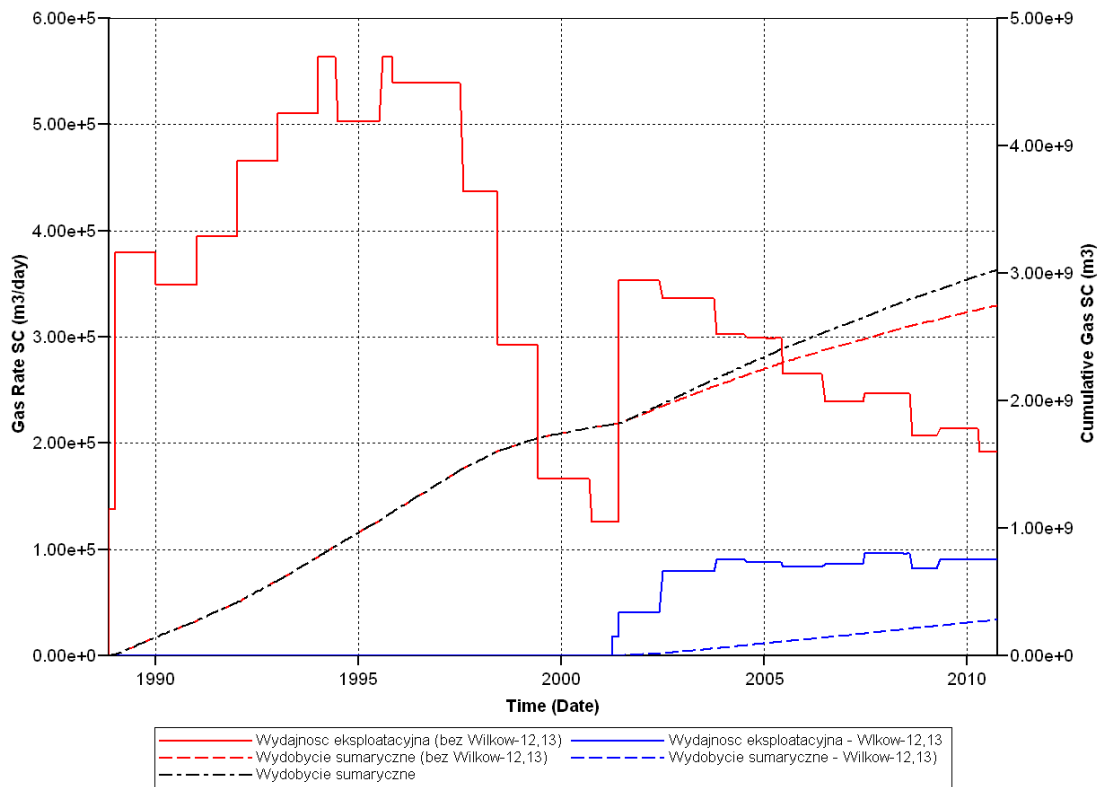


Fig. 1.1.16_260 Wydajność eksploatacji oraz wydobywanie sumaryczne w latach 1988 – 2010

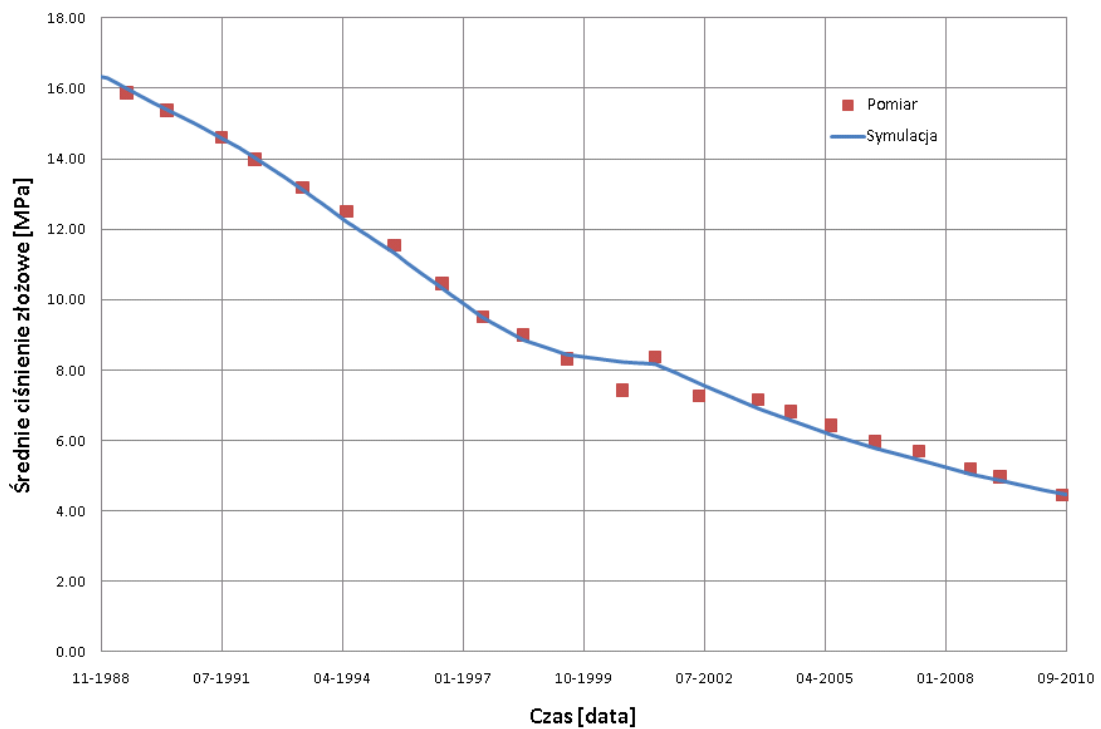


Fig. 1.1.16_261 Porównanie średniego ciśnienia złożowego rzeczywistego i wynikającego z symulacji

Symulacja zatłaczania CO₂

Do zatłaczania CO₂ wybrano 5 odwiertów: Wilków-5, Wilków-8, Wilków-9, Wilków-22, Wilków-27. Przyjęto docelową wydajność zatłaczania na poziomie 1.8 Mt CO₂/rok (~5 kt CO₂/d), przy czym wydajność poszczególnych odwiertów jest sterowana „automatycznie” na podstawie ich potencjału. Maksymalne ciśnienie denne dla odwiertów zatłaczających ograniczono do 19 MPa.

Uwzględniając możliwość przebicia zatłaczanego dwutlenku węgla do odwiertów produkcyjnych oraz jednoczesny spadek zawartości węglowodorów (metanu) w odbieranym gazie, w obu scenariuszach przyjęto maksymalny dopuszczalny udział CO₂ na poziomie 50% molowo oraz minimalną zawartość metanu 20% molowo. Po osiągnięciu jednego z przyjętych limitów odwierty zostają wyłączone z eksploatacji.

Określenie wariantów symulacji

Wykonano symulację zatłaczania dwutlenku węgla do złoża Wilków według dwóch scenariuszy. Pierwszy (wariant A) zakłada kontynuację eksploatacji z zachowaniem dotychczasowego tempa spadku wydajności z głównej części złoża (przyjęto spadek wydajności rzędu 10% rok do roku) z jednoczesnym zatłaczaniem CO₂ od początku roku 2013. Wydajność odwiertów Wilków-12 i Wilków-13 pozostawiono na dotychczasowym poziomie. Drugi scenariusz zakłada ciągłą eksploatację do końca roku 2019, a następnie zatłaczanie CO₂ od początku roku 2020. W obu wariantach symulacji analizowano możliwość wykorzystania dwutlenku węgla dla poprawy stopnia sczerpania złoża.

Przebieg symulacji eksploatacji złoża do roku 2020 (bez zatłaczania) przedstawiono na **Fig. 1.1.16_262**. W scenariuszu tym od roku 2013 utrzymywana jest stała wydajność rzędu 156 tys. nm³/d w celu szybkiego sczerpania złoża przed rozpoczęciem zatłaczania CO₂ w roku 2020. Przy takich założeniach osiągnięto współczynnik sczerpania równy 87% (59% uwzględniając wzniesienie Wilków-12,13) przy ciśnieniu końcowym 2,87 MPa.

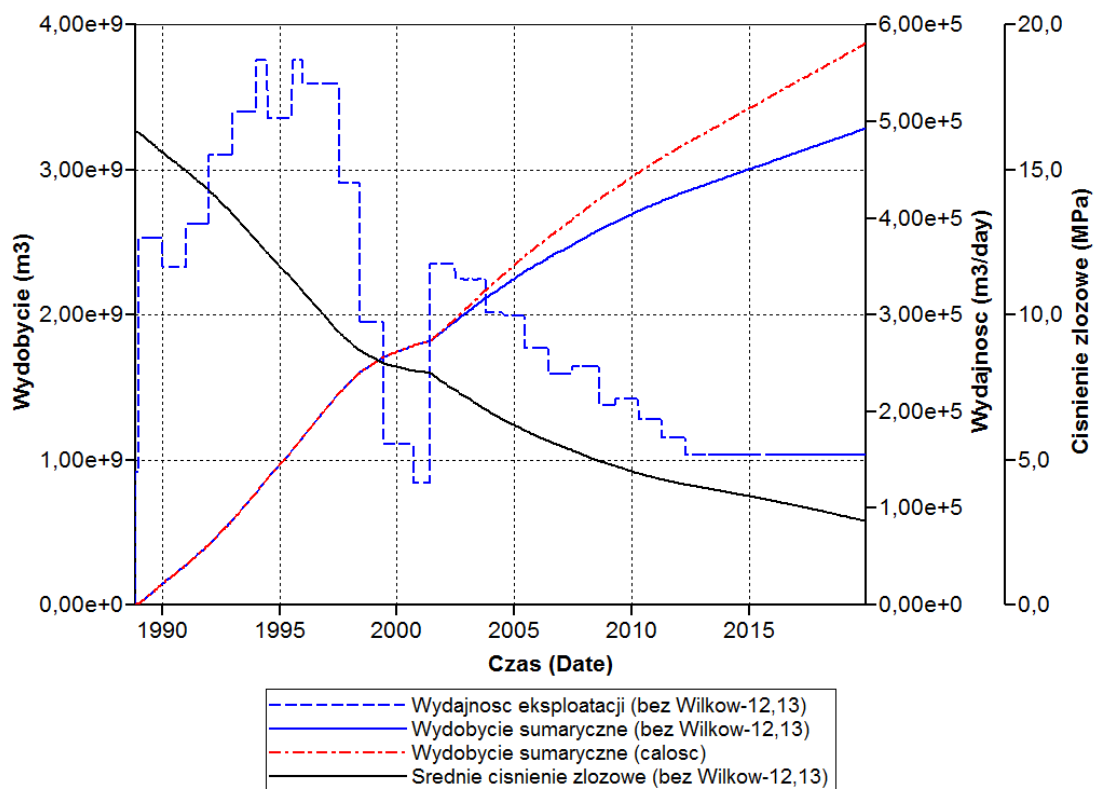


Fig. 1.1.16_262 Przebieg symulacji eksploatacji bez zatłaczania do roku 2020

Wyniki symulacji

Wyniki symulacji pokazują, iż przy zatłaczaniu z zadaną wydajnością CO₂ bardzo szybko wypełnia strukturę, a wzrost jego udziału w produkowanym gazie (a co za tym idzie, spadek zawartości węglowodorów) powoduje szybkie wyłączenie kolejnych odwiertów. Według wariantu A w północnej części złoża większość odwiertów zostaje wyłączona w ciągu pierwszych dwóch lat zatłaczania. Należy zwrócić uwagę, że udział CO₂ w gazie nie przekracza założonych 50%, ale z powodu stosunkowo niewielkiego początkowego udziału metanu w gazie (ok. 35%) jego udział szybko spada poniżej przyjętej granicy 20% (Fig. 1.1.16_265 i Fig. 1.1.16_266). W przypadku wariantu B zamknięcie odwiertów produkcyjnych jest jeszcze szybsze (Fig. 1.1.16_272 i Fig. 1.1.16_273).

Całkowita ilość zatłoczonego CO₂ (pojemność struktury) zależy od przyjętego dopuszczalnego maksymalnego ciśnienia złożowego na koniec zatłaczania. Jeżeli za ciśnienie dopuszczalne przyjmujemy ciśnienie początkowe, sumaryczna ilość zatłoczonego dwutlenku węgla wynosi ok. 10,0 Mt (stan osiągnięty w lipcu 2018 r., po 5 latach i 7 miesiącach zatłaczania). Jeżeli dopuścimy przewyższenie ciśnienia końcowego o ok. 10% względem początkowego, pojemność struktury wzrasta do 11,3 Mt przy ciśnieniu 17,96 MPa (04.2020). Na początku roku 2018 (6 rok zatłaczania) ciśnienie denne w odwiertach zatłaczających osiąga założoną wartość maksymalną 19 MPa. Od tego momentu wydajność zatłaczania spada i stabilizuje się na poziomie 410 t/d (Fig. 1.1.16_264).

Na **figurach 1.1.16_267 i 1.1.16_268** przedstawiono udział molowy CO₂ w gazie wypełniającym strukturę po zakończeniu zatłaczania w roku 2025. Na przekroju przez złożę widać, że mimo ograniczenia kontaktu między główną częścią złoża Wilków a wzniesieniem oddzielającym je od złoża Szlichtyngowa, zatłaczany dwutlenek węgla migruje również w tym kierunku (**Fig. 1.1.16_269**).

W związku z tym, że odwierty produkcyjne zostały w trakcie symulacji wyłączone z powodu spadku udziału CH₄, nie uzyskano zwiększenia wydobywania, nawet sumaryczne wydobywanie gazu jest minimalnie mniejsze niż w przypadku wariantu bez zatłaczania dla tego samego czasu.

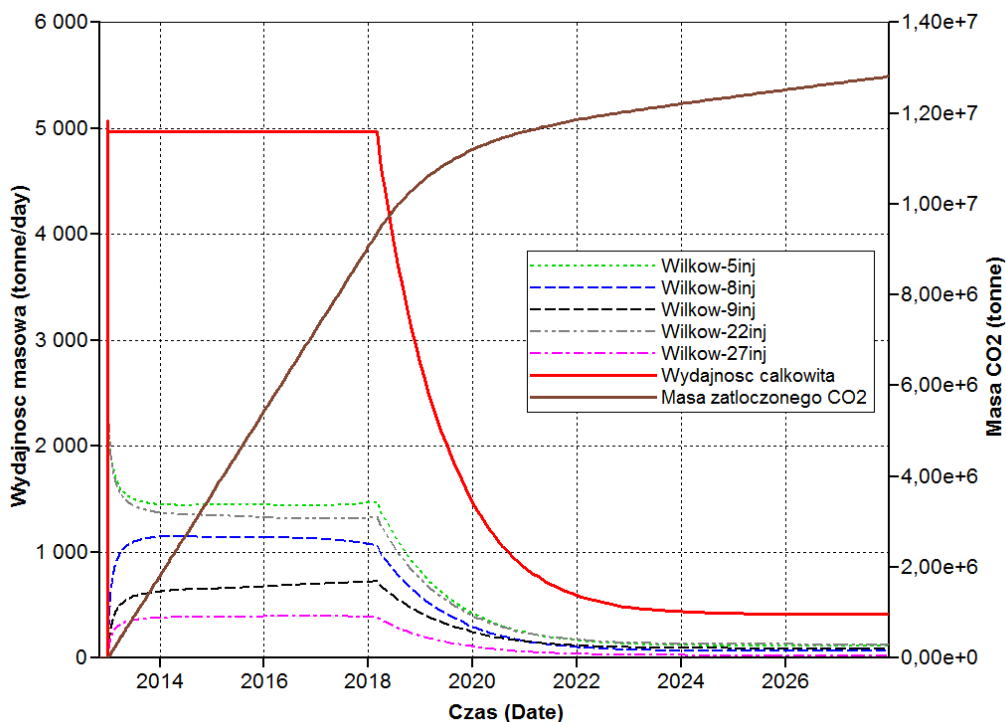


Fig. 1.1.16_263 Wydajności poszczególnych odwiertów zatłaczających, całkowita wydajność zatłaczania oraz całkowita masa zatłoczonego CO₂; Wariant A

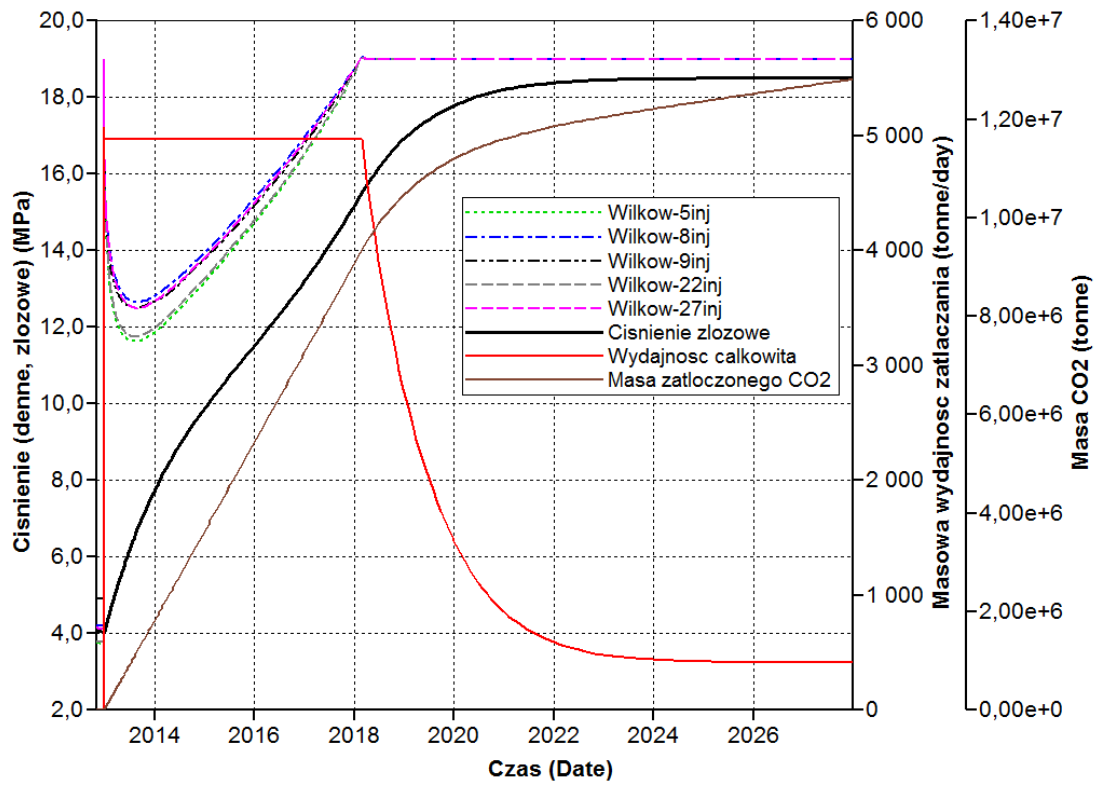


Fig. 1.1.16_264 Ciśnienie denne w odwiertach zatłaczających, ciśnienie złożowe oraz wydajność zatłaczania i masa zatłoczonego CO₂; Wariant A

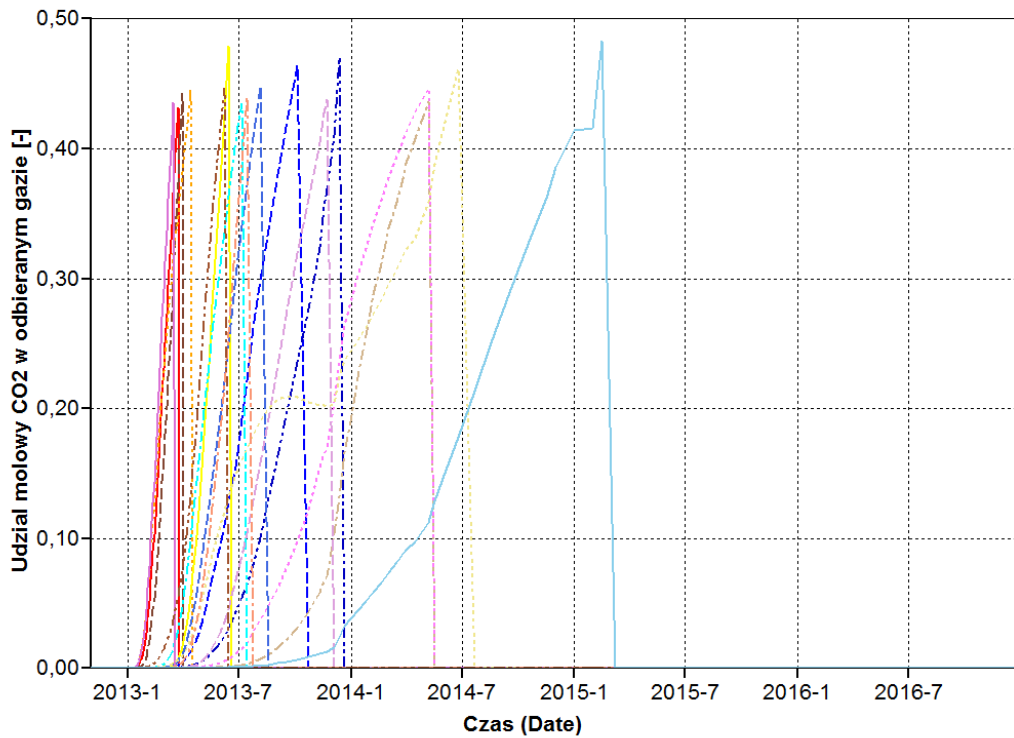


Fig. 1.1.16_265 Zmiana udziału CO₂ w odbieranym gazie w trakcie zatłaczania CO₂; Wariant A

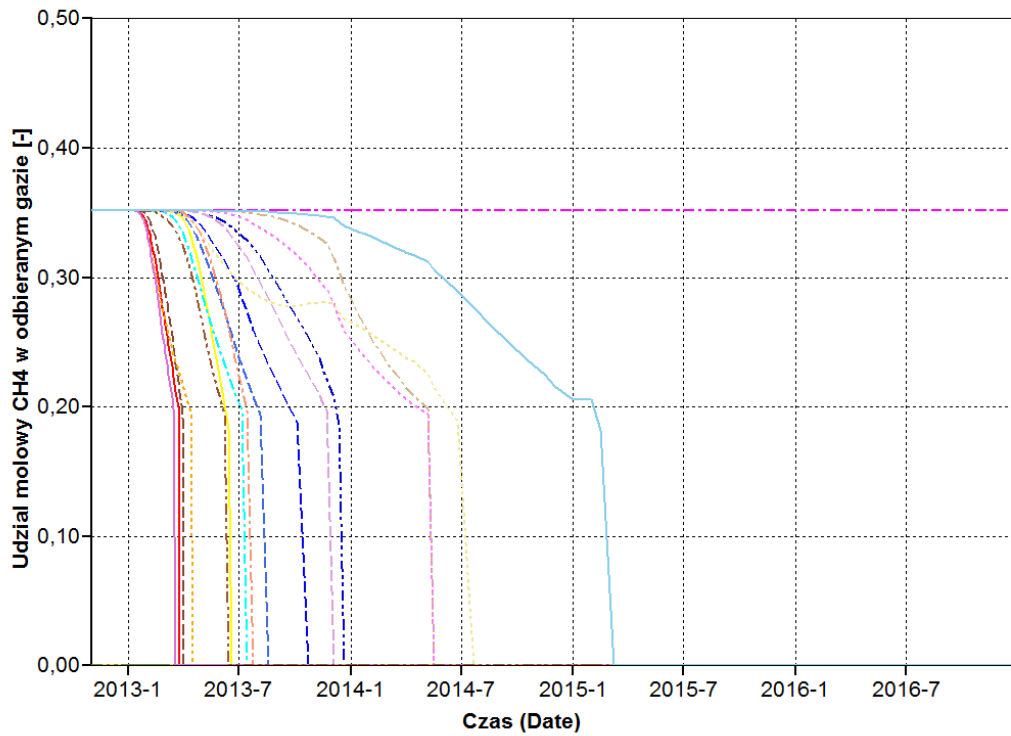


Fig. 1.1.16_266 Zmiana udziału CH₄ w odbieranym gazie w trakcie zatłaczania CO₂; Wariant A

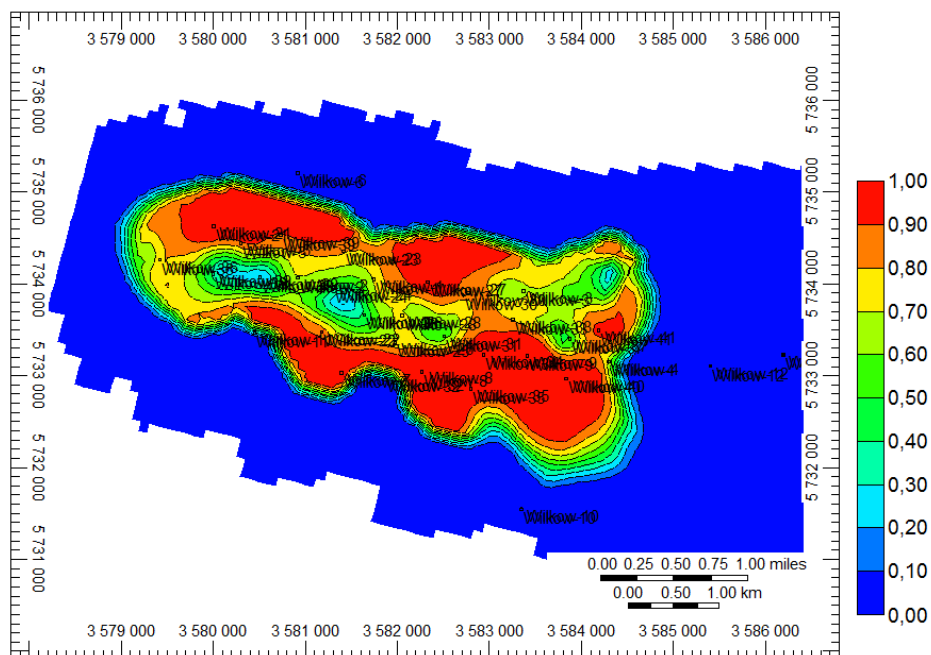


Fig. 1.1.16_267 Dystrybucja CO₂ (udział molowy CO₂ w gazie) w stropie po zakończeniu zatłaczania; Wariant A

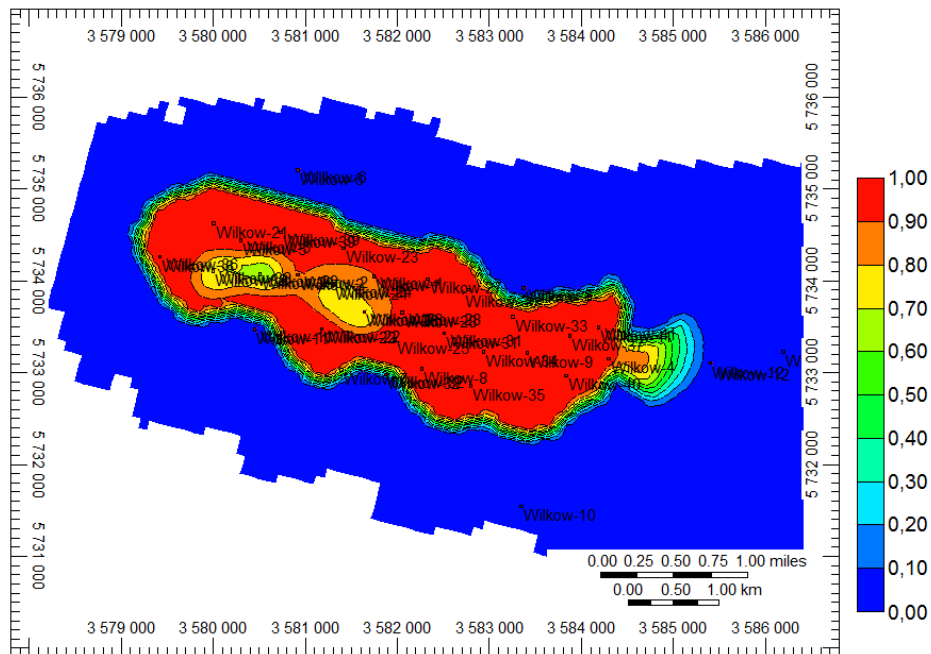


Fig. 1.1.16_268 Dystrybucja CO₂ (udział molowy CO₂ w gazie) w warstwie 4 po zakończeniu zatłaczania; Wariant A

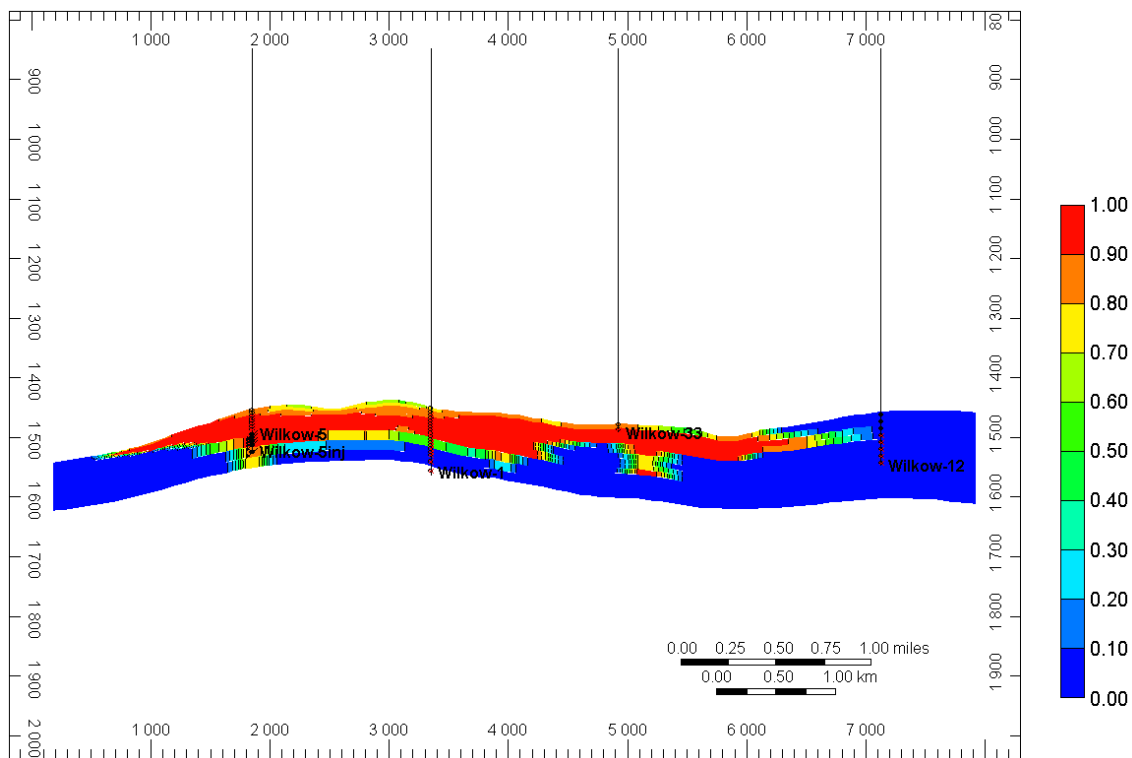


Fig. 1.1.16_269 Udział CO₂ w gazie i jego rozprzestrzenienie w przekroju złoża; Wariant A

Wyniki symulacji wariantu B są bardzo zbliżone do wyników dla wariantu A. W tym przypadku, jak można było zakładać, ograniczenia ze względu na skład odbieranego gazu zadziałały jeszcze szybciej i spowodowały zakończenie produkcji. Sumaryczna pojemność struktury jest niewiele większa (poniżej 0,7 Mt CO₂ przy założeniu maksymalnego ciśnienia złożowego równego początkowemu). Porównanie mas zatłoczonego dwutlenku węgla i osiągniętych ciśnień złożowych przedstawia **Fig. 1.1.16_274**.

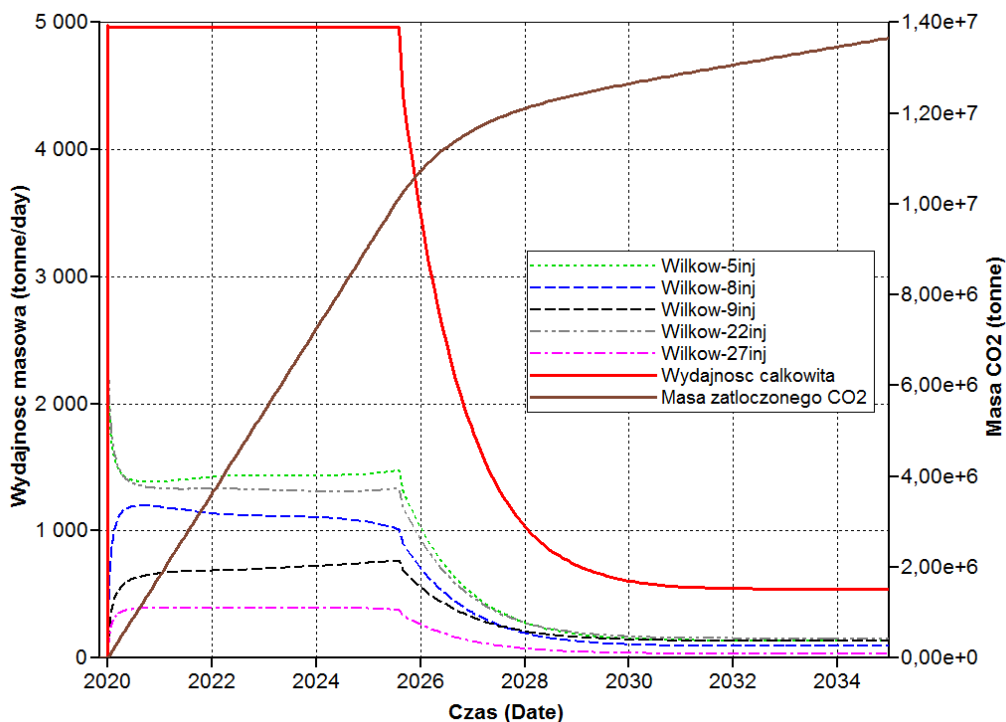


Fig. 1.1.16_270 Wydajności poszczególnych odwiertów zatłaczających, całkowita wydajność zatłaczania oraz całkowita masa zatłoczonego CO₂; Wariant B

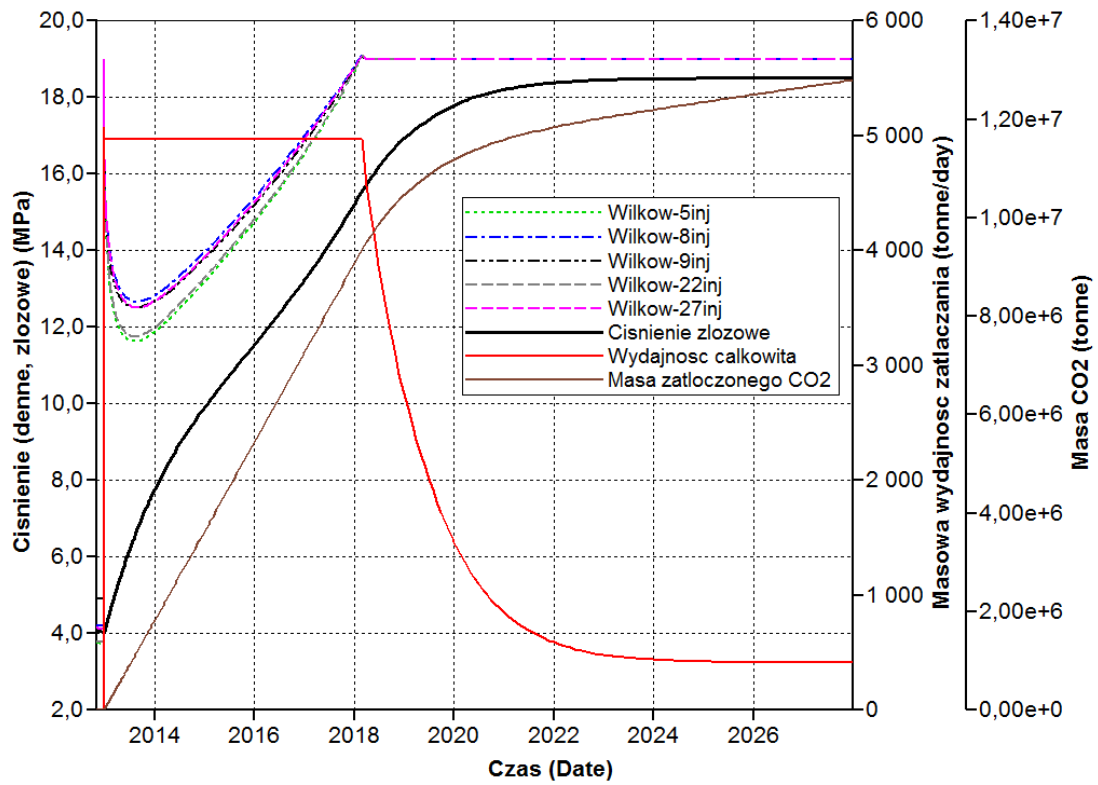


Fig. 1.1.16_271 Ciśnienie denne w odwiertach zatłaczających, ciśnienie złożowe oraz wydajność zatłaczania i masa zatłoczonego CO₂; Wariant B

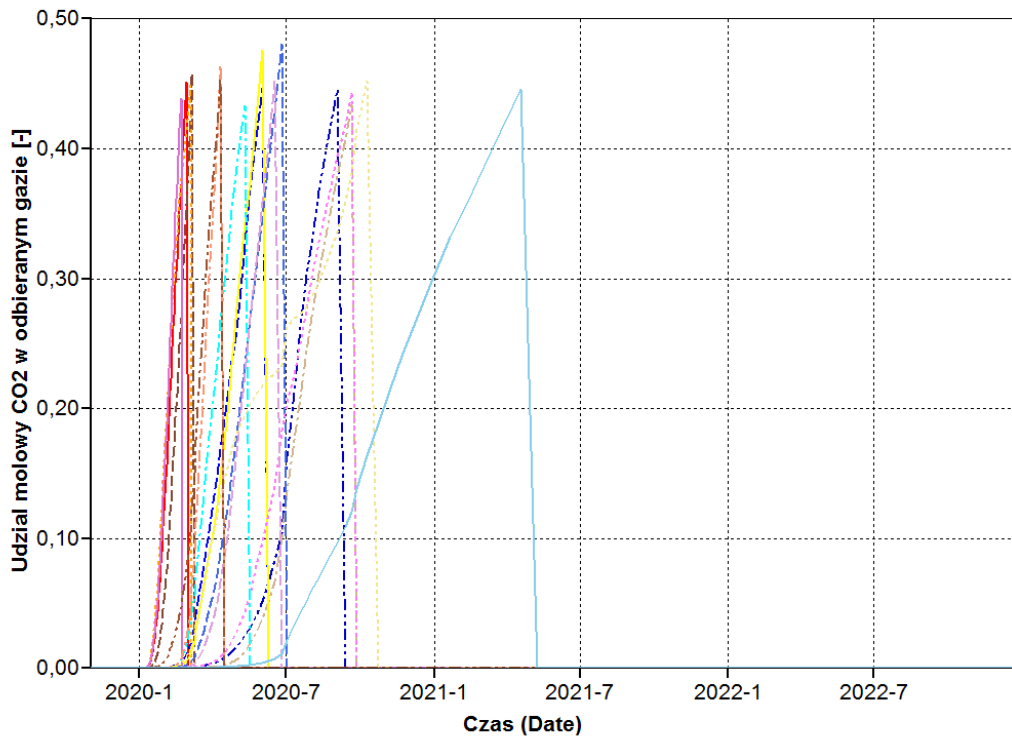


Fig. 1.1.16_272 Zmiana udziału CO₂ w odbieranym gazie w trakcie zatłaczania CO₂; Wariant B

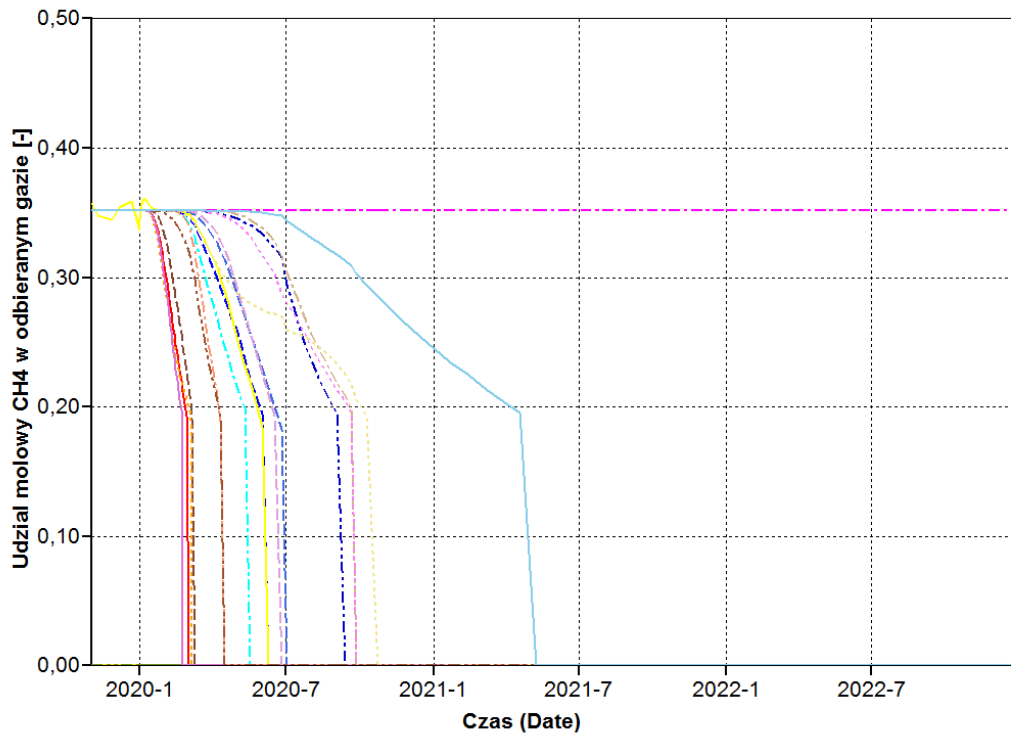


Fig. 1.1.16_273 Zmiana udziału CH₄ w odbieranym gazie w trakcie zatłaczania CO₂; Wariant B

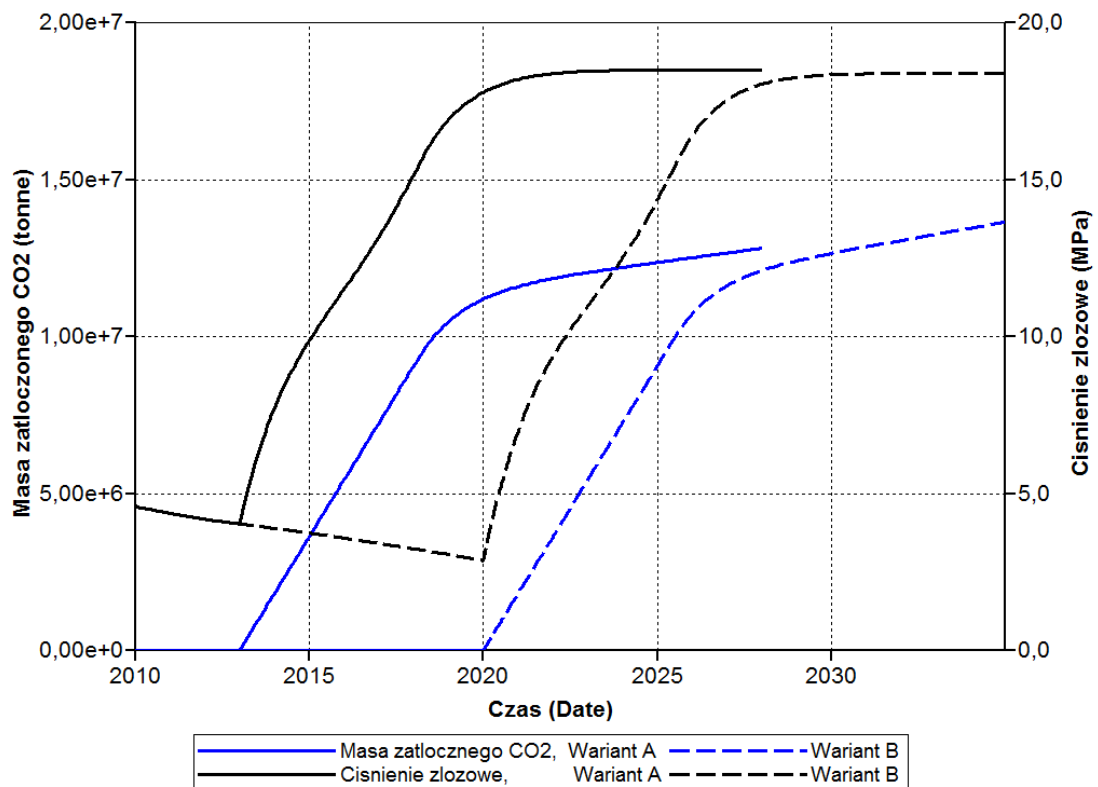


Fig. 1.1.16_274 Masa zatłoczonego CO₂ i ciśnienie złożowe dla wariantów A i B

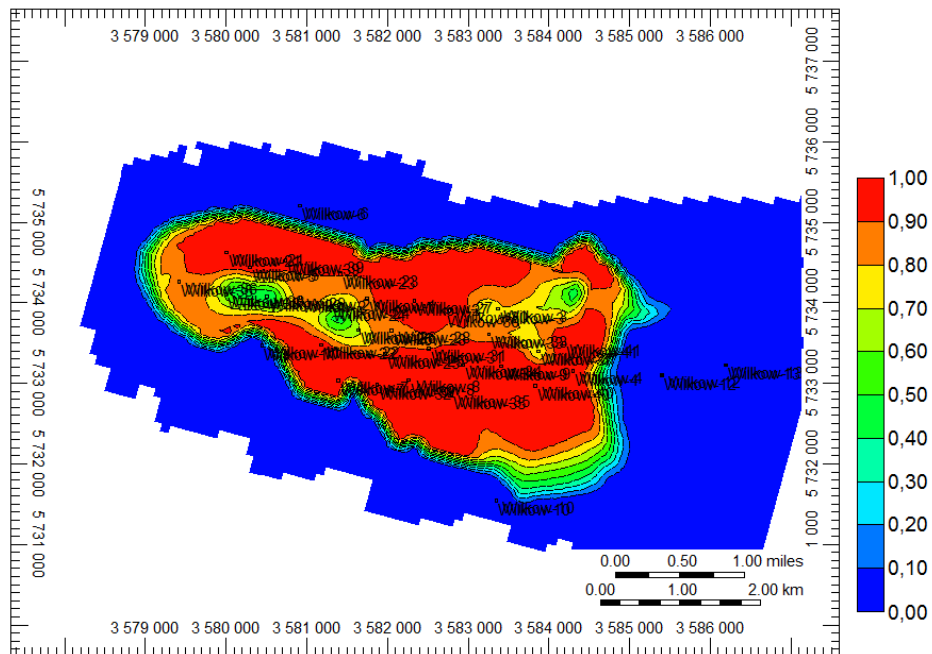


Fig. 1.1.16_275 Dystrybucja CO2 (udział molowy CO2 w gazie) w stropie po zakończeniu zatłaczania;
Wariant B

Modelowanie dynamiczne procesów zatłaczania CO₂ do składowiska - Złoże ropy naftowej Nosówka (INiG)

(Wiesław Szott, Piotr Łętkowski, Andrzej Gołąbek, Krzysztof Miłek, Andrzej Rychlicki)

W ramach niniejszej pracy dokonano implementacji statycznego (geologicznego) modelu struktury i konstrukcji pełnoskalowego, trójwymiarowego modelu złożowego złoża Nosówka (w kompleksie skał węglanowych karbonu dolnego). Model geologiczny struktury uzupełniono o elementy niezbędne do przeprowadzenia wielowariantowych i długoczasowych symulacji eksploatacji złoża z równoczesną sekwestracją dwutlenku węgla tj. własności transportowe w układzie skała-płynny złożowe, termodynamiczne własności płynów złożowych i ich wzajemne oddziaływanie.

Celem pracy było zweryfikowanie możliwości wykorzystania złoża dla celów sekwestracji dwutlenku węgla oraz zwiększenia jego stopnia sześperpania poprzez zastosowanie odpowiedniego schematu faz sekwestracji i eksploatacji.

W pracy przedstawiono prognozy eksploatacji złoża z równoczesną sekwestracją CO₂ według następujących scenariuszy:

3. wariant odniesienia (bazowy): eksploatacja złoża zgodnie z aktualnymi parametrami sterującymi pracą złoża,
4. wariant ze stopniową konwersją odwiertów produkcyjnych na zatłaczające w miarę osiągnięcia przez nie limitów ograniczających produkcję,
5. wariant z wydobyciem ropy dwoma odwiertami poprzedzonym wstępnym zatłaczaniem CO₂,
6. wariant z naprzemiennymi fazami zatłaczania CO₂ i wydobycia ropy.

W pracy przedstawiono analizę wpływu sposobu eksploatacji na możliwy do uzyskania stopień sześperpania złoża oraz zdolność sekwestracijną struktury dla dwóch wybranych wartości maksymalnego dopuszczalnego wykładnika gazowego. W pracy wykorzystano narzędzia programistyczne do modelowania i symulacji z pakietów Petrel i Eclipse 300 firmy GeoQuest Schlumberger [Petrel 2009.1. Eclipse 300, v 2010.1 firmy GeoQuest Schlumberger].

Implementacja statycznego modelu geologicznego i konstrukcja złożowego modelu symulacyjnego

Do konstrukcji dynamicznego modelu symulacyjnego struktury Nosówka wykorzystano statyczny model geologiczny struktury skonstruowany w ramach Zadania 1.1.15 [Szott W., i zespół INiG].

Geometria modelu

Model geometryczny dla modelu symulacyjnego złoża zbudowano na podstawie istniejącego modelu geologicznego regionu Sędziszów – Będziemyśl, którego widok 3D przedstawiono na **Fig. 1.1.16_276**. Widoczne na figurze dyslokacje tworzą naturalne granice złoża Nosówka, składającego się z dwóch bloków: centralnego i północno-zachodniego, przy czym pomiędzy blokami nie istnieje łączność hydrodynamiczna. Geometrię modelu sporządzono wykorzystując mapy stropu wizenu (**Fig. 1.1.16_277**), ordowiku (**Fig. 1.1.16_278**) oraz prekambriu (**Fig. 1.1.16_279**) stanowiącego spąg struktury.

W celu zbudowania modelu geometrycznego zastosowano metodę up-scalingu w stosunku do warstw oryginalnego modelu geologicznego, przyjmując dla wizenu i ordowiku odpowiednio 10 i 4 warstwy modelu symulacyjnego. W każdej z warstw wygenerowano bloki o wymiarach około 50 m × 50 m. Ostatecznie model dynamiczny skonstruowano na bazie regularnej siatki 128×36 × 14. Wzdłuż uskoku stanowiących granicę złoża zastosowano strefę buforową o szerokości 3 bloków modelu. Orientacja siatki odpowiada osiom głównym struktury w kierunku NW-SE i prostopadłym. Przestrzenny oraz płaski widok modelu uwzględniający lokalizację odwiertów przedstawiono na **Fig. 1.1.16_280** i **Fig. 1.1.16_281**.

Własności hydrodynamiczne modelu

Podstawowe parametry modelu opisujące własności zbiornikowe i hydrodynamiczne struktury zaimplementowano z modelu geologicznego [Szott W., i zespół INiG] dokonując up-scalingu własności petrofizycznych na zdefiniowaną powyżej strukturę warstwową modelu geometrycznego. W konsekwencji otrzymano rozkłady podstawowych parametrów złożowych. Przykładowe rozkłady przedstawiono na **Fig. 1.1.16_282** (porowatość), **Fig. 1.1.16_283** (przepuszczalność), **Fig. 1.1.16_284** (NTG).

Wartości średnie podstawowych parametrów złożowych przedstawiają się następująco:

średnia objętość porów w bloku, $PV_{sr} = 1040 \text{ m}^3$

średnia porowatość, $\varphi_{sr} = 3.5 \%$

średnia przepuszczalność, $k_{sr} = 33.6 \text{ mD}$

średnie NTG, $NTG_{sr} = 0.84$

Warunki brzegowe – akifery okalające

Na podstawie dotychczasowej eksploatacji złoża Nosówka nie stwierdzono aktywności akiferów.

Warunki początkowe

Jako warunki początkowe panujące w strukturze przyjęto:

ciśnienie: 35,9 MPa na głębokość odniesienia 3152 m ppm, temperaturę (stałą): 105°C.

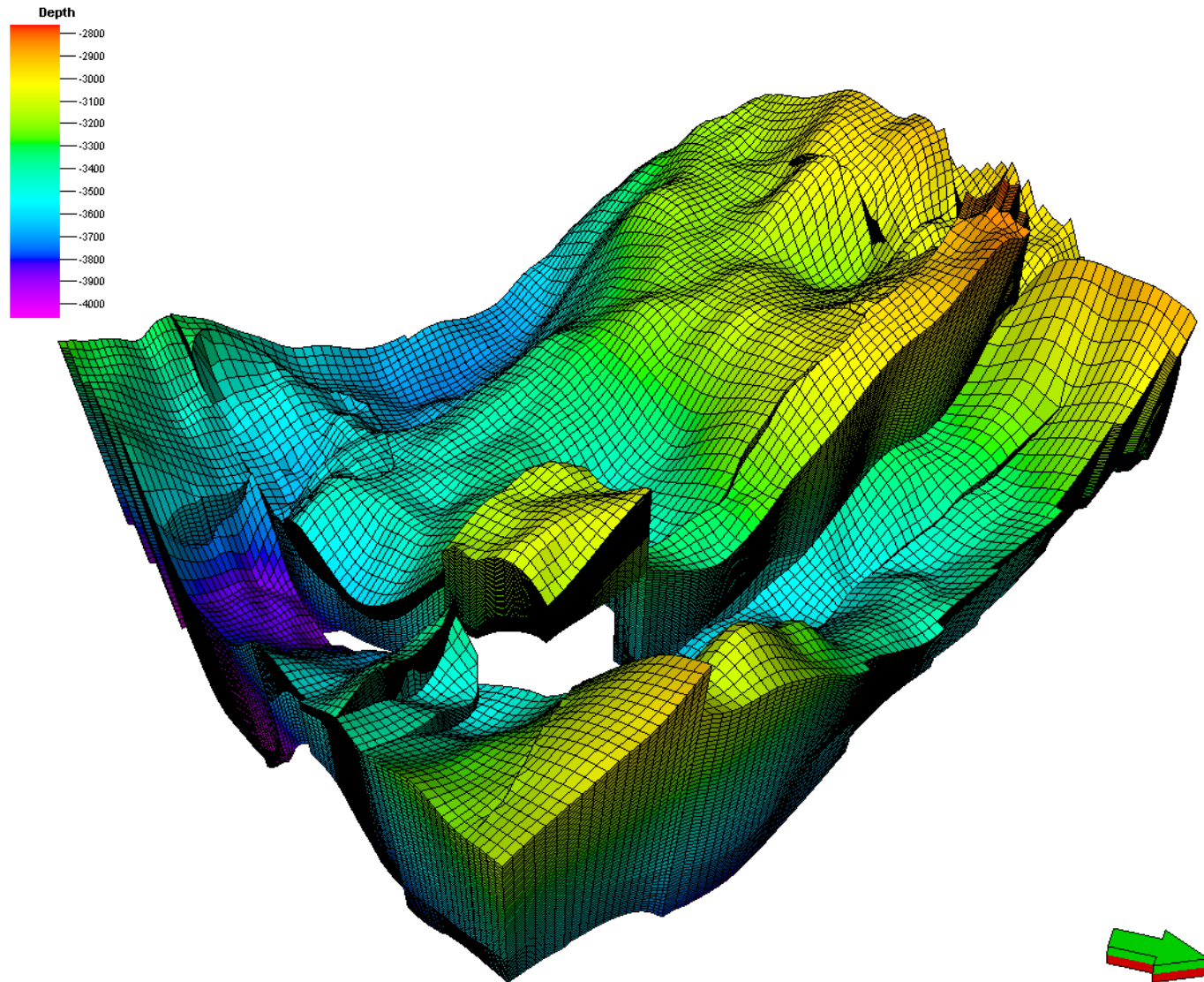


Fig. 1.1.16_276 Modelu geologicznego regionu Sędziszów – Będziemyśl
16-287

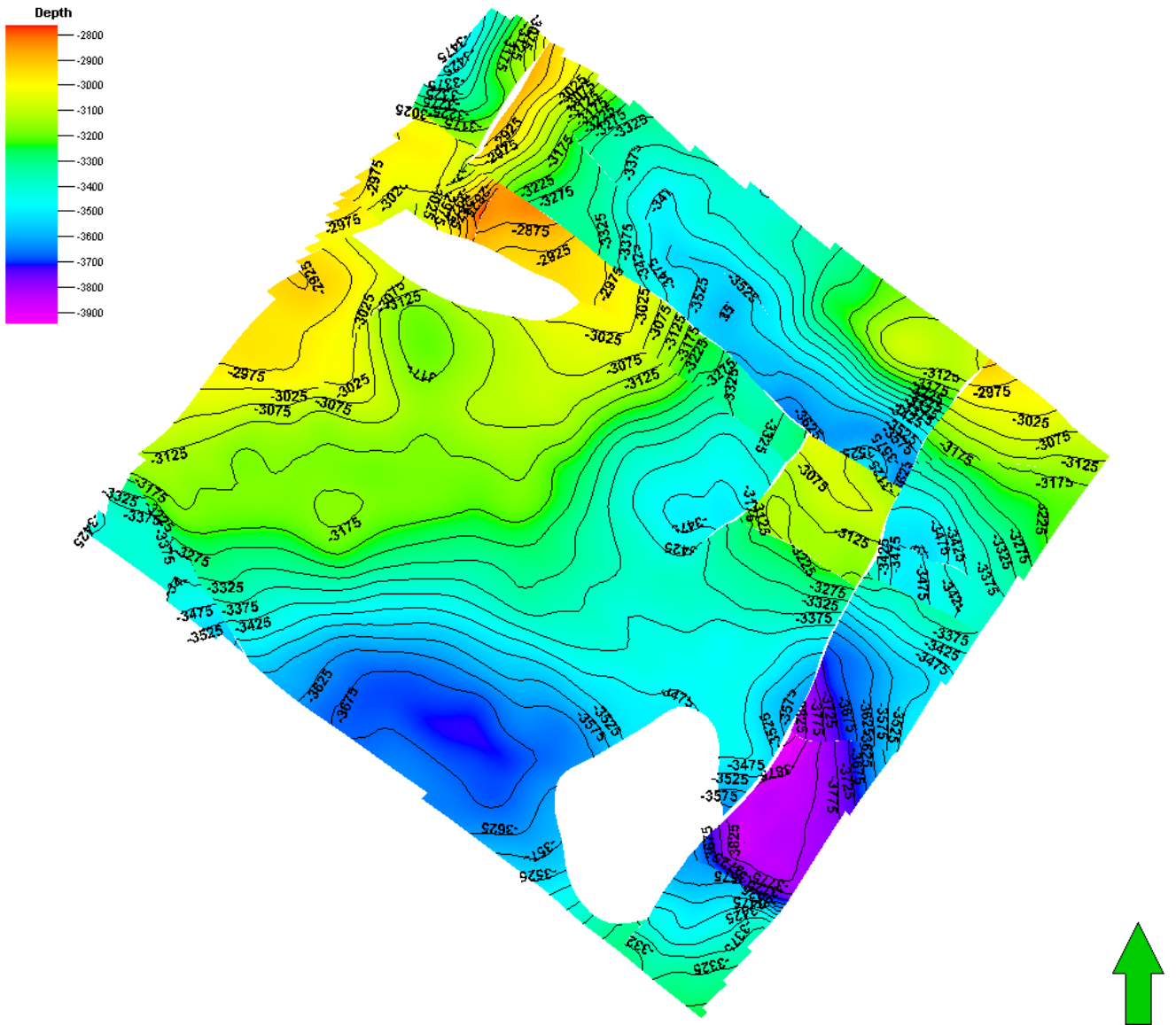


Fig. 1.1.16_277 Mapa strukturalna stropu wizenu

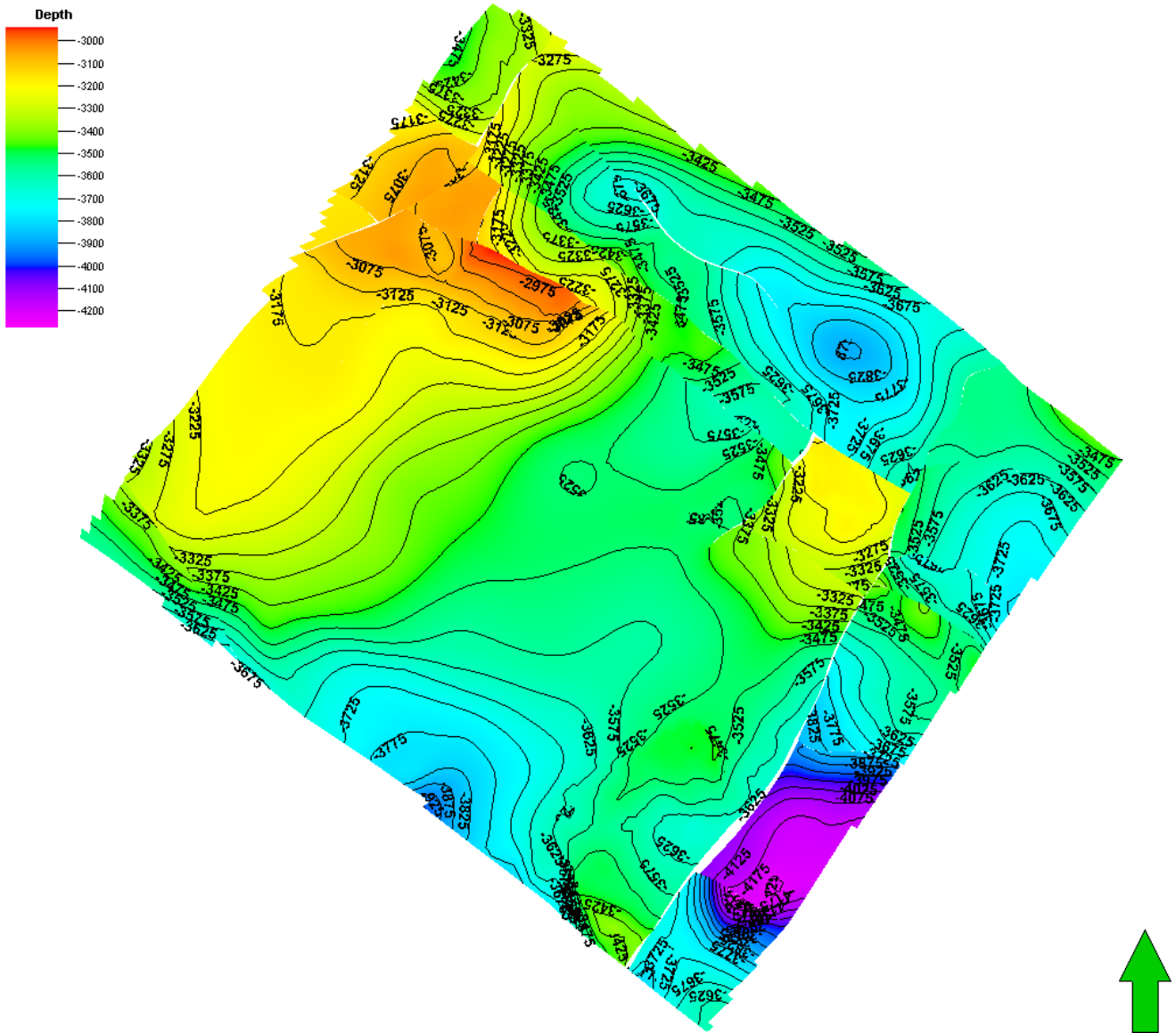


Fig. 1.1.16_278 Mapa strukturalna stropu ordowiku

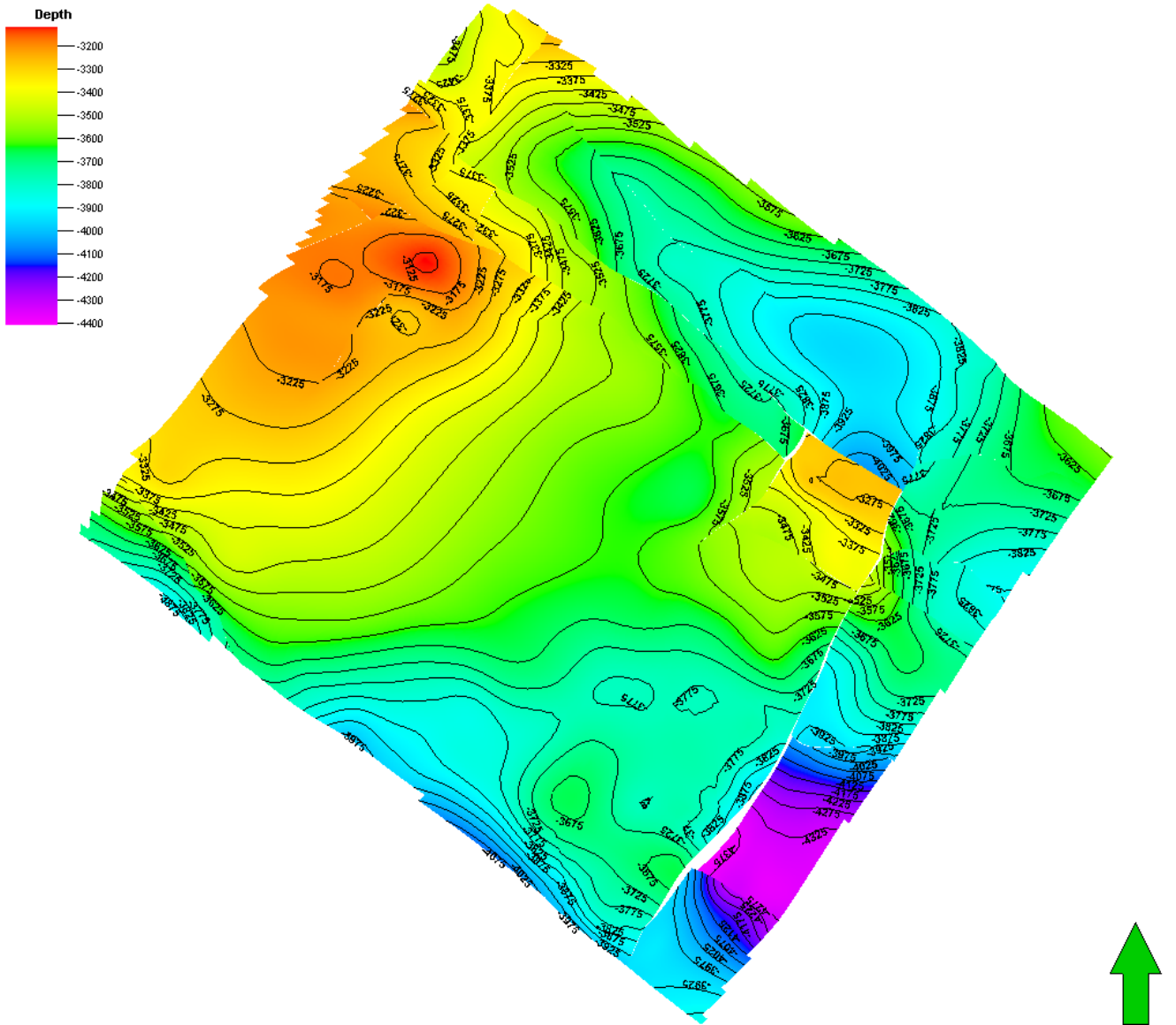


Fig. 1.1.16_279 Mapa strukturalna stropu prekambru

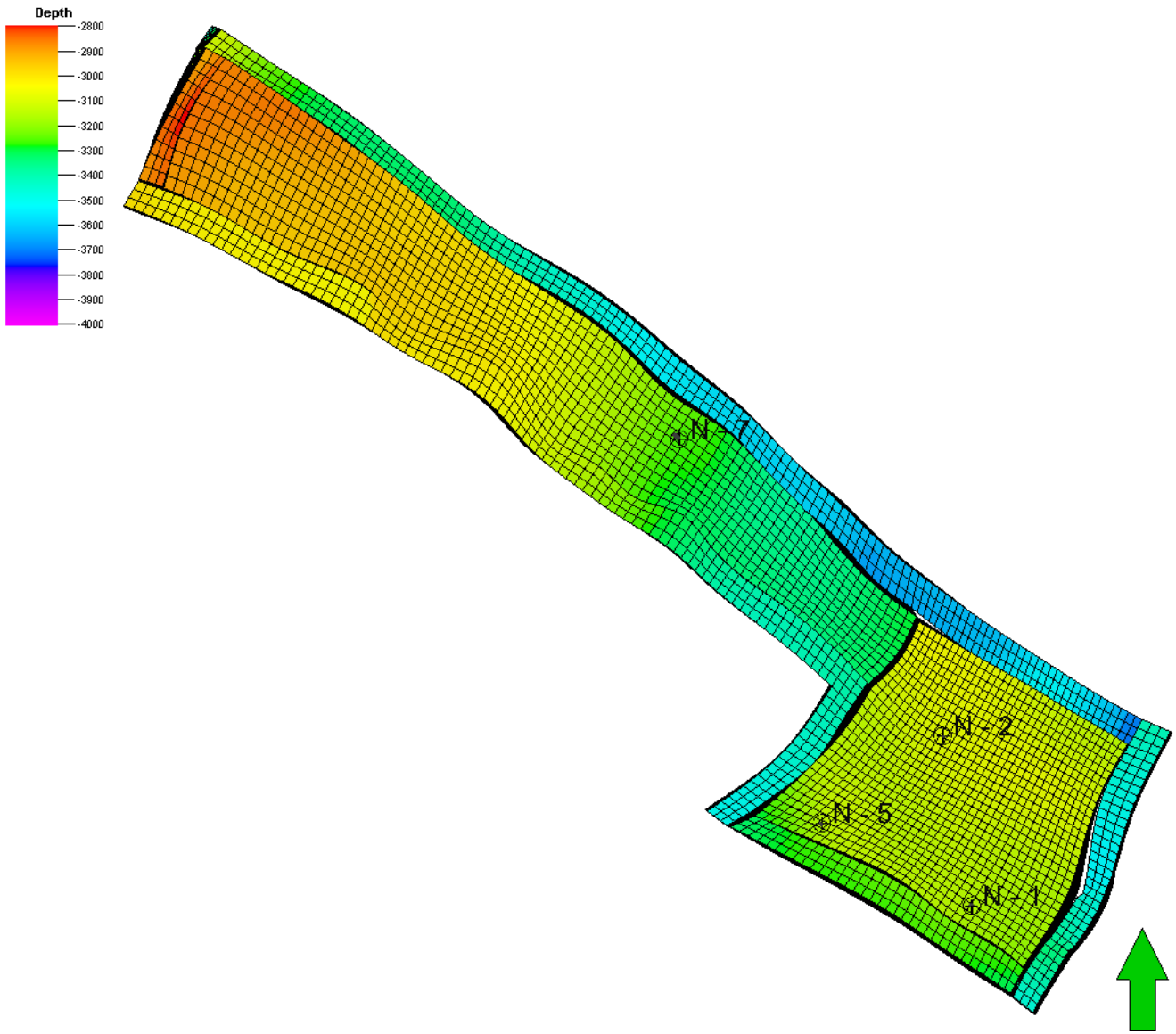


Fig. 1.1.16_280 Siatka bloków modelu symulacyjnego – widok z góry

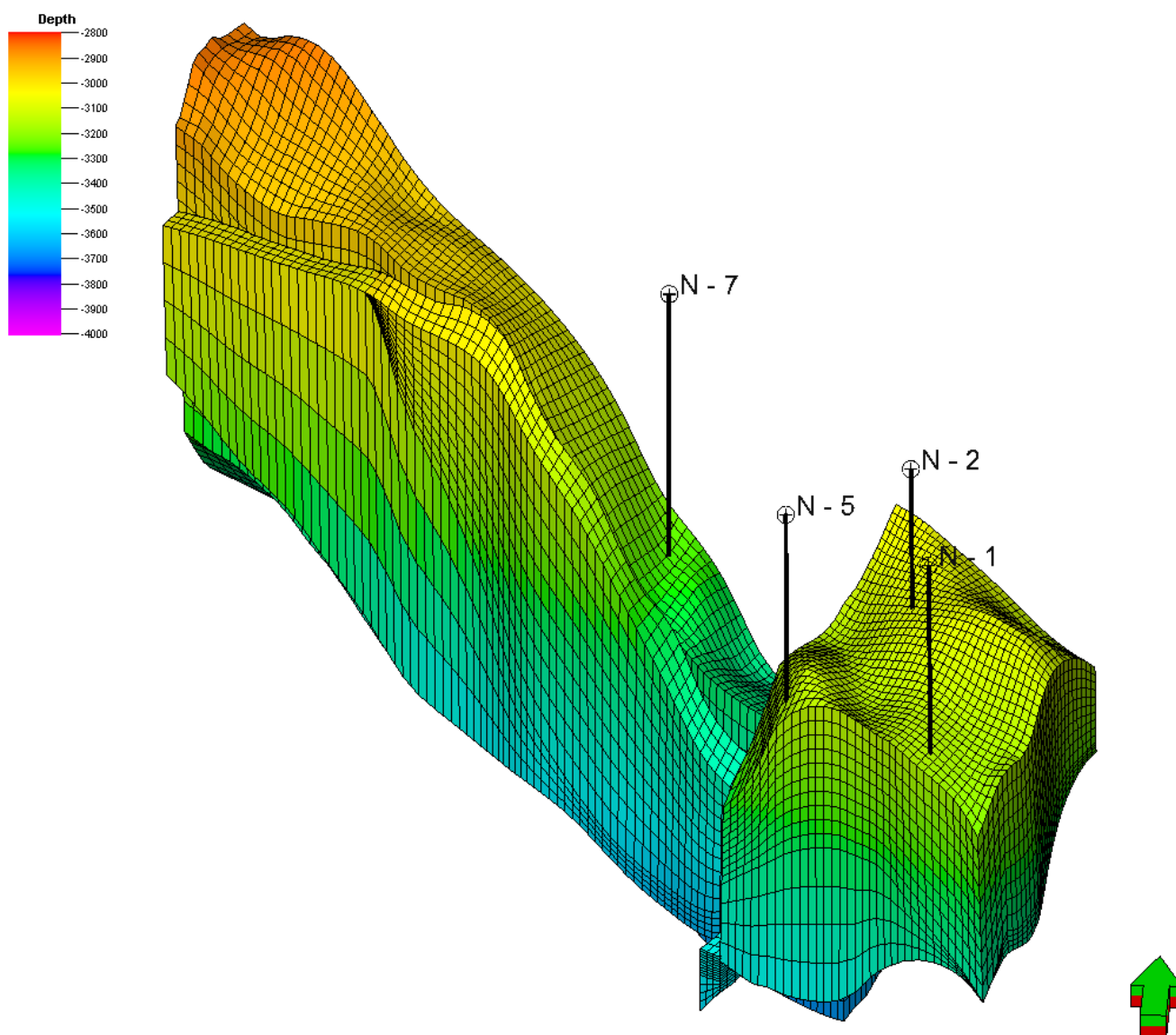


Fig. 1.1.16_281 Siatka bloków modelu symulacyjnego – widok 3D

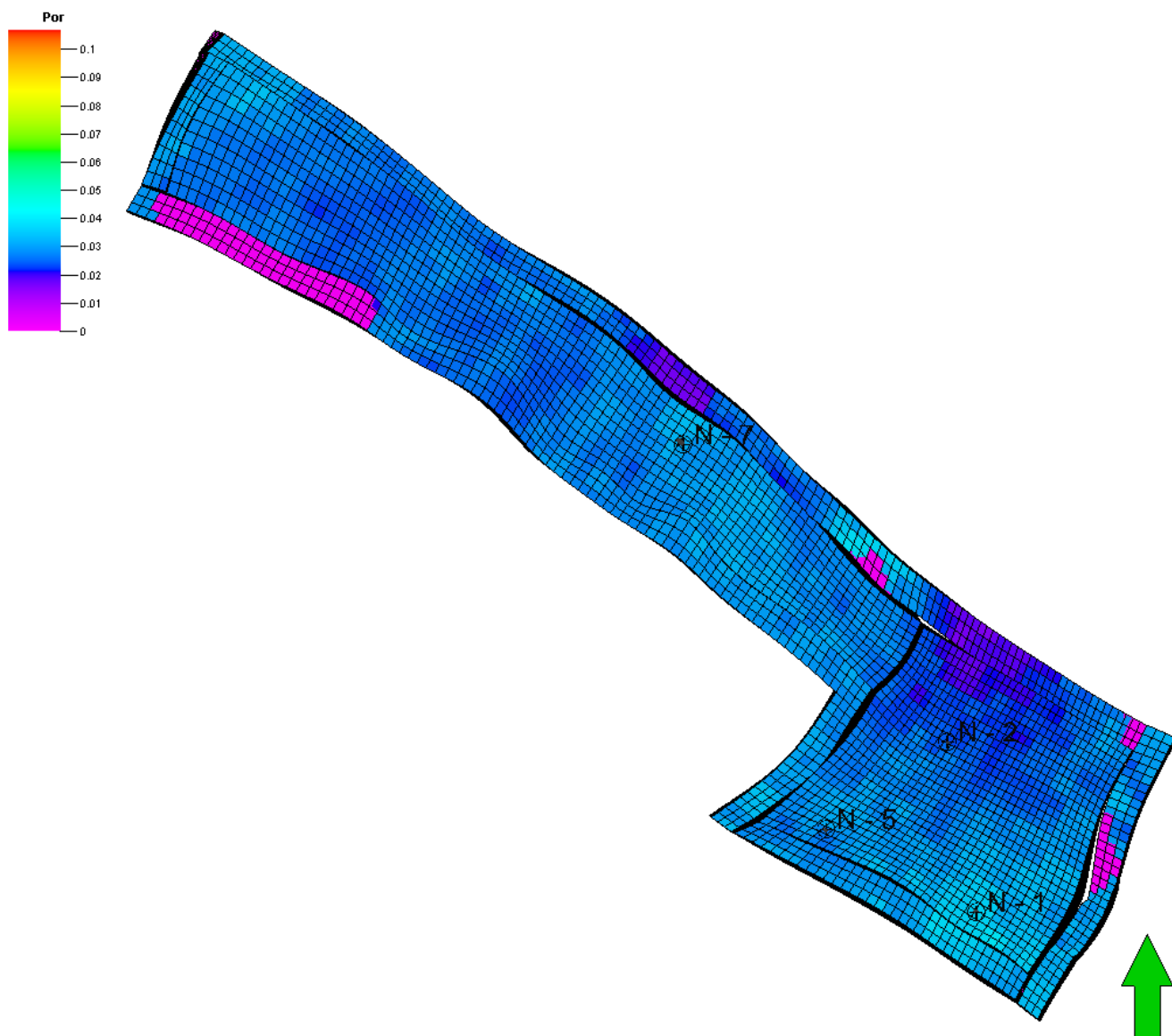


Fig. 1.1.16_282 Przykładowy rozkład porowatości, w warstwie zbiornikowej (wizen - węglany) – warstwa 1

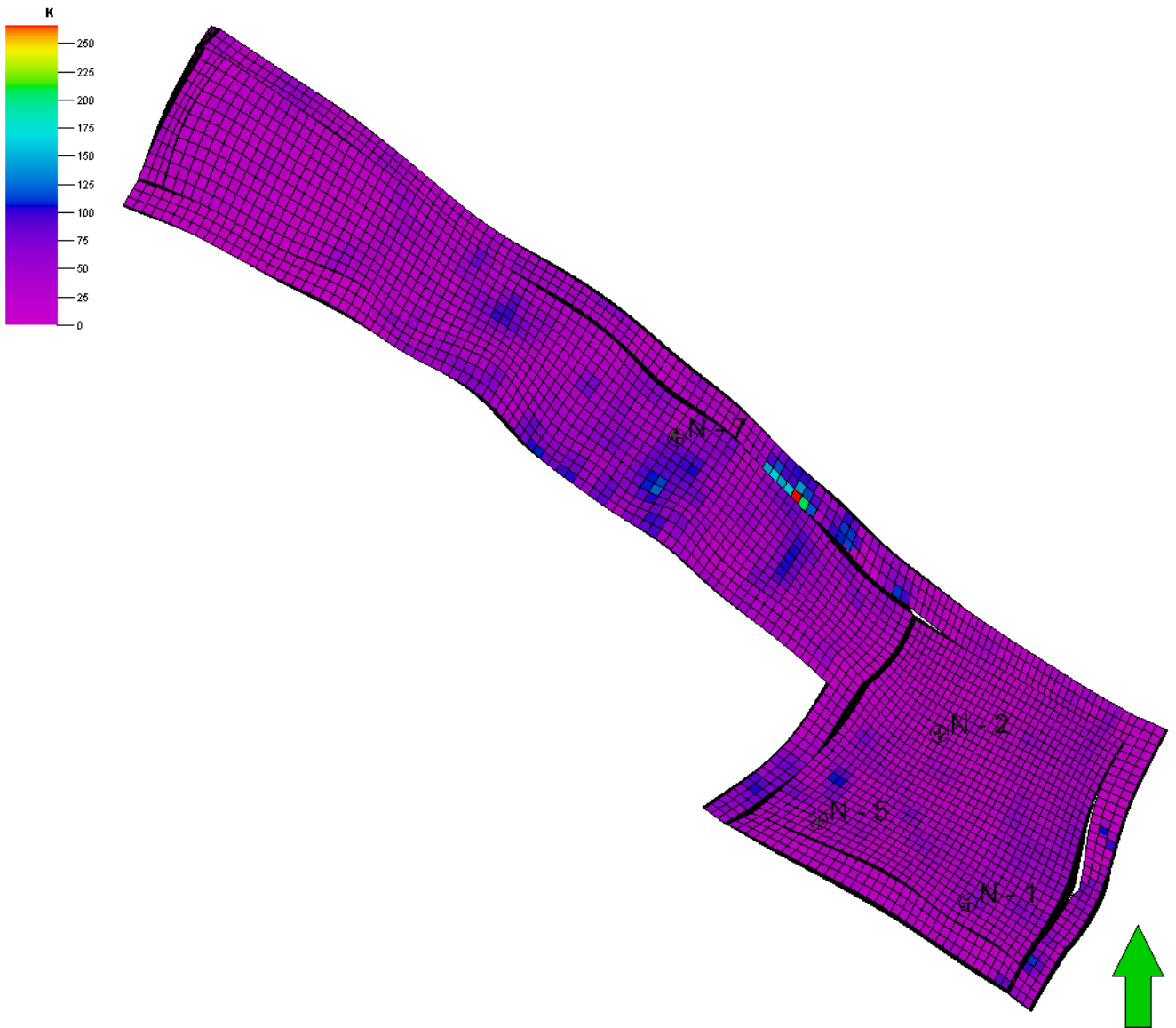


Fig. 1.1.16_283 Przykładowy rozkład przepuszczalności, k w warstwie zbiornikowej (wizen - węglany) – warstwa 1

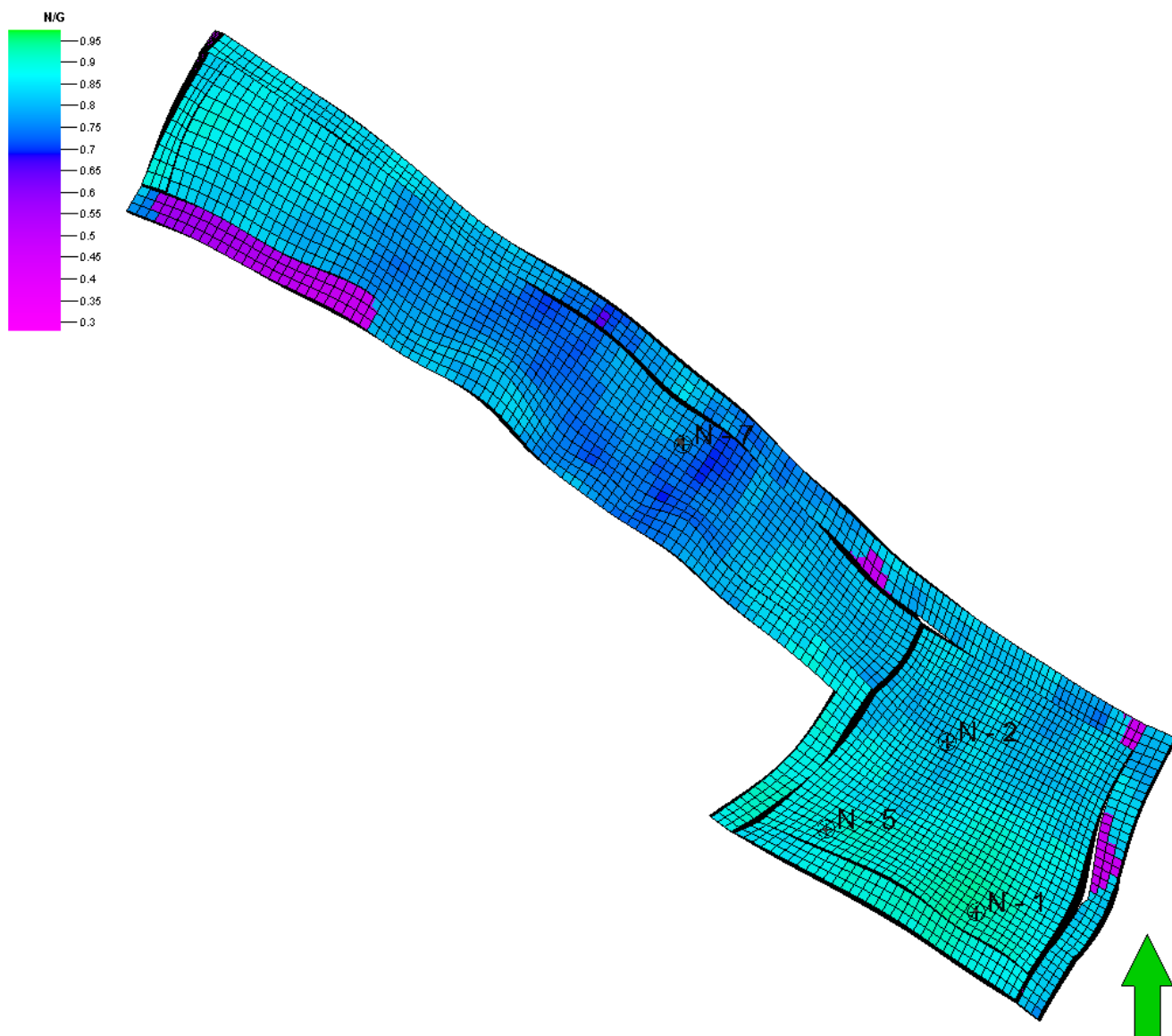


Fig. 1.1.16_284 Przykładowy rozkład NTG w warstwie zbiornikowej (wizen - węglany) – warstwa 1

Właściwości transportowe płynów złożowych w skałach struktury

Właściwości transportowe płynów złożowych dla modelu dynamicznego złoża Nosówka określono za pomocą pakietu Petrel firmy Schlumberger. Krzywe przepuszczalności względnej oraz ciśnienia kapilarne dla występujących w strukturze płynów złożowych przedstawiono na **Fig. 1.1.16_285** oraz **1.1.16_286**.

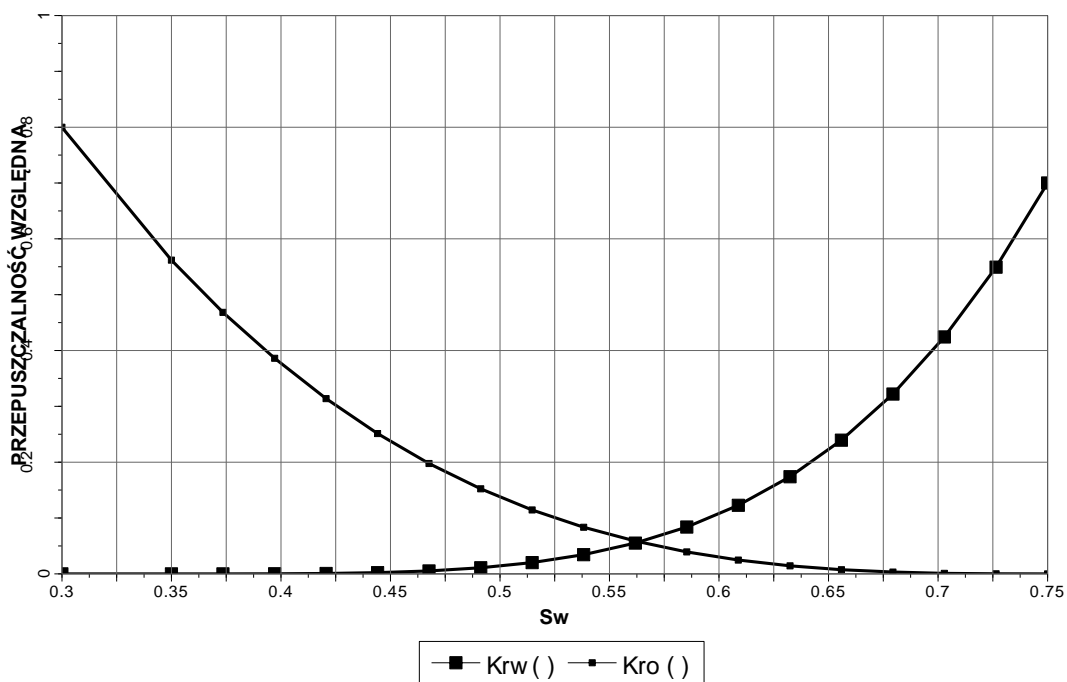
Model płynu złożowego

Do symulacji procesów zachodzących w złożu w trakcie realizacji założonych schematów jego eksploatacji wykorzystano symulator kompozycyjny Eclipse 300.

Skład pierwotnego płynu złożowego wyznaczono w wyniku rekombinacji próbek ropy naftowej i gazu otrzymanych w wyniku separacji przez operatora złoża. Wykorzystano równanie stanu Soave-Redlicha-Kwonga z parametrami przedstawionymi w **Tab. 1.1.16_24**. Do określenia lepkości użyto korelacji Lorentza-Braya-Clarka ze standardowymi parametrami.

Ponadto na podstawie analiz próbek wody złożowej udostępnionych przez operatora złoża przyjęto gęstość wody złożowej, $\rho_w = 1123.5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$.

PRZEPUSZCZALNOŚĆ WZGLĘDNA W UKŁADZIE ROPA - WODA



PRZEPUSZCZALNOŚĆ WZGLĘDNA W UKŁADZIE ROPA - GAZ

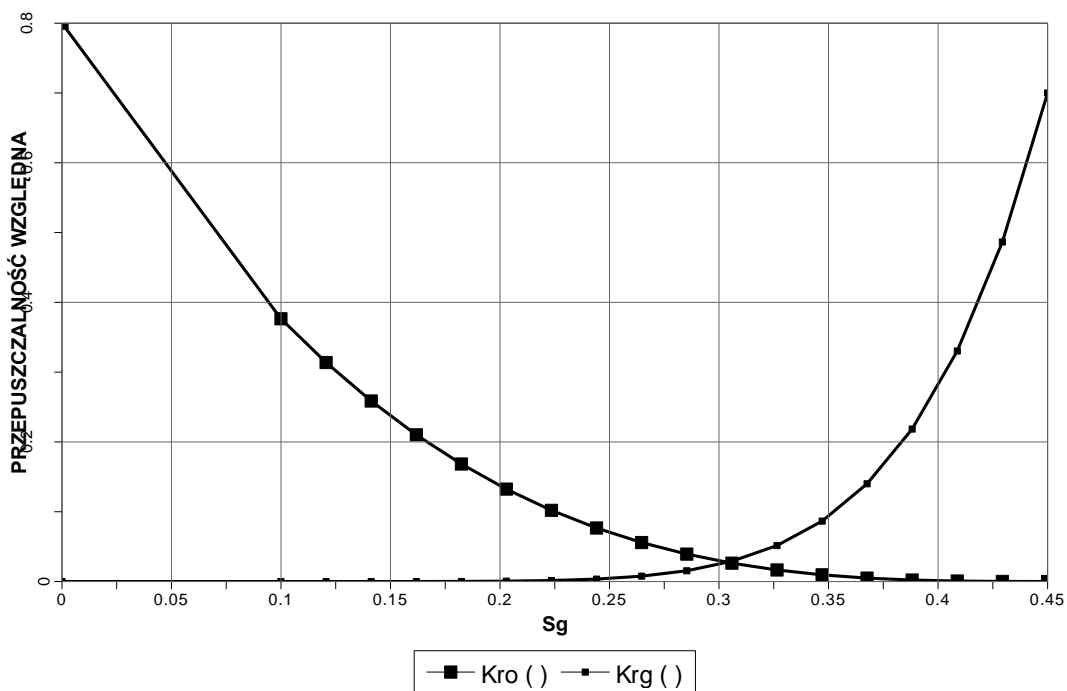
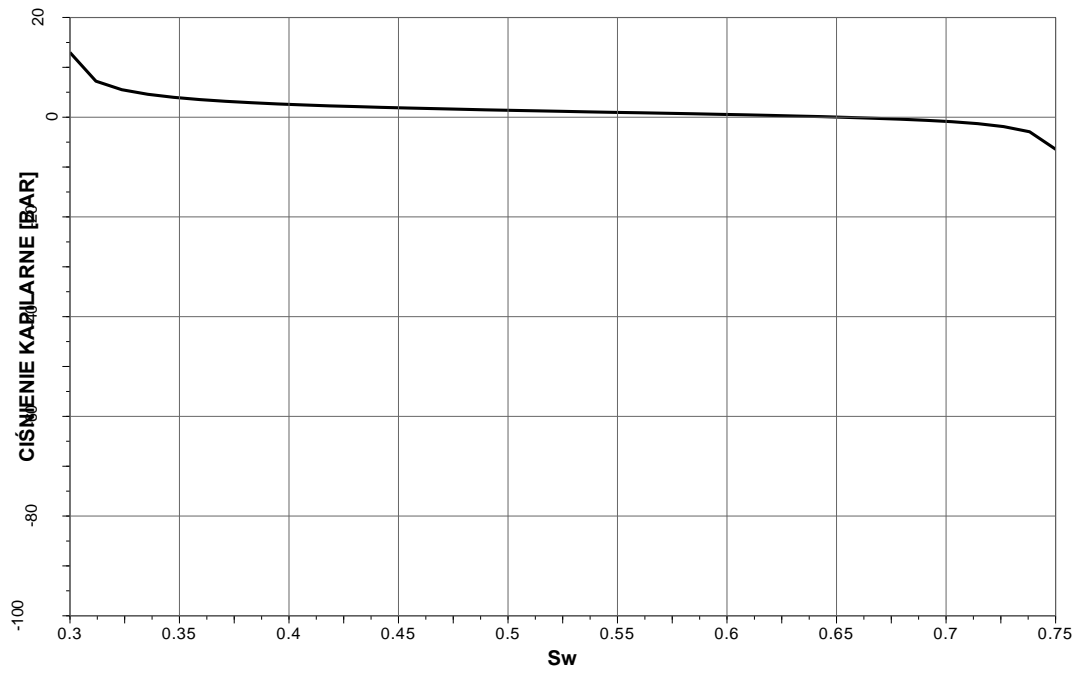


Fig. 1.1.16_285 Przepuszczalności względne

CIŚNIENIE KAPILARNE WODA - ROPA



CIŚNIENIE KAPILARNE GAZ - ROPA

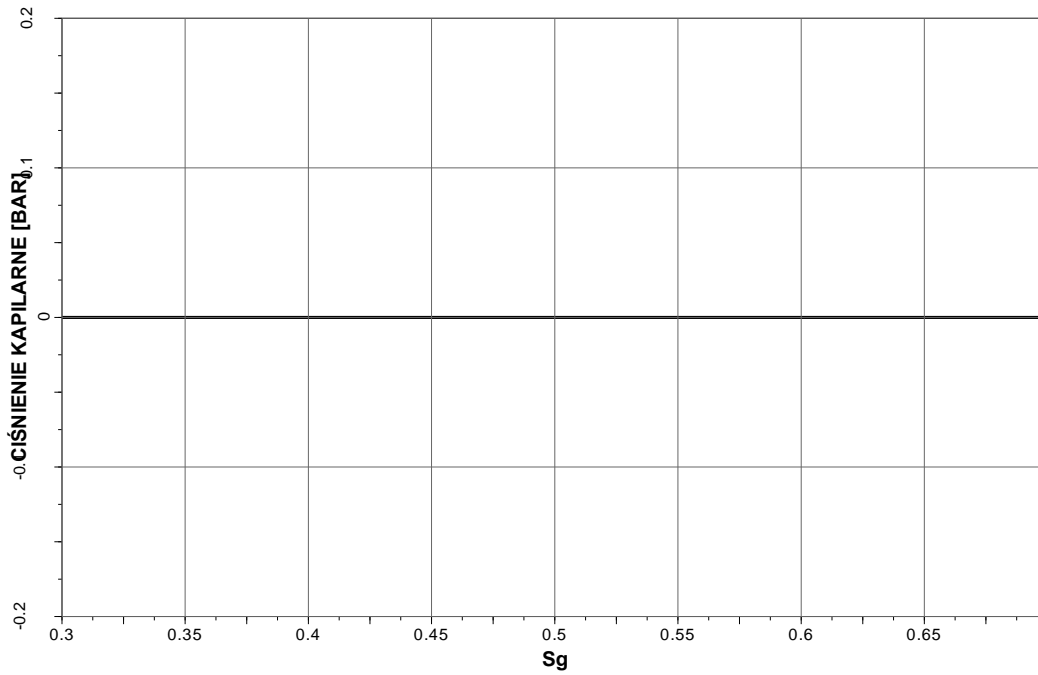


Fig. 1.1.16_286 Ciśnienia kapilarne

Tab. 1.1.16_24 Parametry równania stanu Soave – Redlicha - Kwonga

Parametr	N ₂	CO ₂	C ₁	C ₂₋₆	C ₇₊
Temperatura krytyczna, T _c [°C]	-146,96	31,04	-82,56	119,47	416,27
Ciśnienie krytyczne, P _c [MPa]	3.394	7.376	4.600	4.046	1.776
Współczynnik acentryczności, ω	0.04	0.23	0.01	0.18	0.81
Ω _A	0.43	0.43	0.43	0.43	0.43
Ω _B	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
Masa molowa, [g/mole]	28.01	44.01	16.04	45.70	211.65
Punkt wrzenia, T _{Boil} [°C]	-195,76	-78,51	-161,56	-22,99	281,27
Objętość krytyczna, V _c [m ³ /kg-mole]	0.09	0.09	0.1	0.23	0.95
Krytyczny współczynnik ściśliwości gazu, Z _c	0.29	0.27	0.29	0.29	0.29
Parachora	41.00	78.00	77.30	173.19	586.29

Kalibracja modelu symulacyjnego

W celu określenia zasobów pierwotnych przeprowadzono kalibrację statyczną modelu oraz kalibrację dynamiczną na podstawie danych eksploatacyjnych udostępnionych przez operatora złoża. Kalibracja obejmowała 3 odwierty bloku centralnego – Nosówka-1, Nosówka-2 oraz Nosówka-5 oraz 1 odwiert bloku północno – zachodniego, Nosówka-7. Wyniki kalibracji przedstawiono na **Fig. 1.1.16_287 - 1.1.16_290** (ciśnienie denne, WBHP) oraz **Fig. 1.1.16_291 - 1.1.16_293** (wykładnik gazowy, WGOR).

Kalibracja ciśnienia dennego dla odwiertu Nosówka-7 wymagała istotnego ograniczenia strefy drenażu odwiertu, co świadczy o słabej łączności hydrodynamicznej bezpośredniego otoczenia odwiertu z pozostałym obszarem bloku północno-zachodniego.

W wyniku kalibracji statycznej modelu symulacyjnego otrzymano geologiczne zasoby pierwotne ropy naftowej dla dwóch niezależnych bloków modelu geologicznego:

- Blok centralny: 764.2 tys. Nm³
- Blok północno – zachodni: 2.1 mln Nm³

Wartość dla bloku północno-zachodniego oznacza zasoby geologiczne wynikające z objętości bryły złożowej. Z opisanej powyżej kalibracji odwiertu Nosówka-7 wynika, że nie są one dostępne do wydobycia tym odwiertem.

Z względu na prawdopodobną małą łączność hydrodynamiczną w obszarze bloku północno – zachodniego prognozy eksploatacyjne złoża Nosówka prowadzono w oparciu o 3 odwierty bloku centralnego tzn. Nosówka-1, Nosówka-2 oraz Nosówka-5.

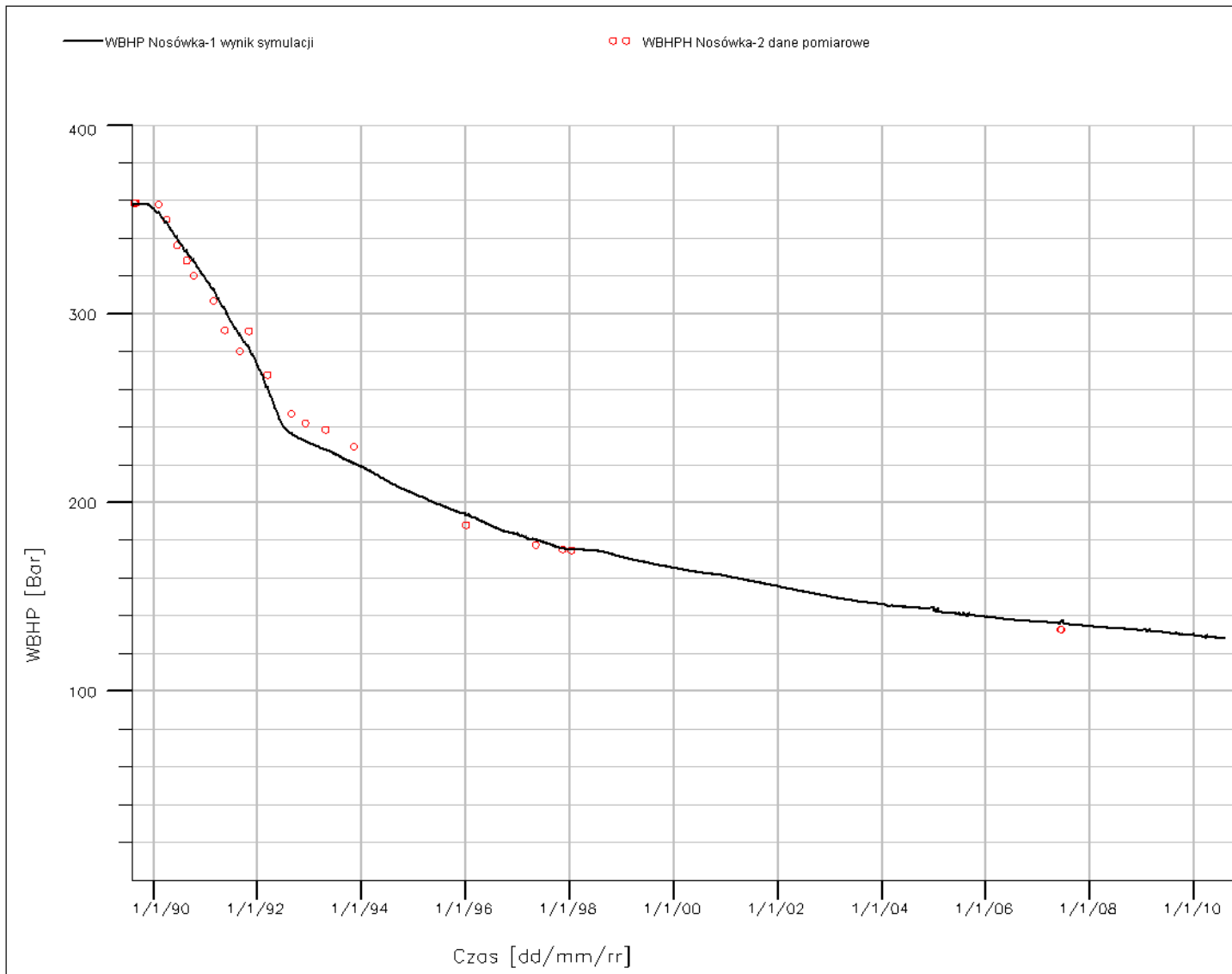


Fig. 1.1.16_287 Wynik dopasowania modelu. Złoże Nosówka. Odwiert Nosówka-1. Ciśnienie na spodzie odwiertu.

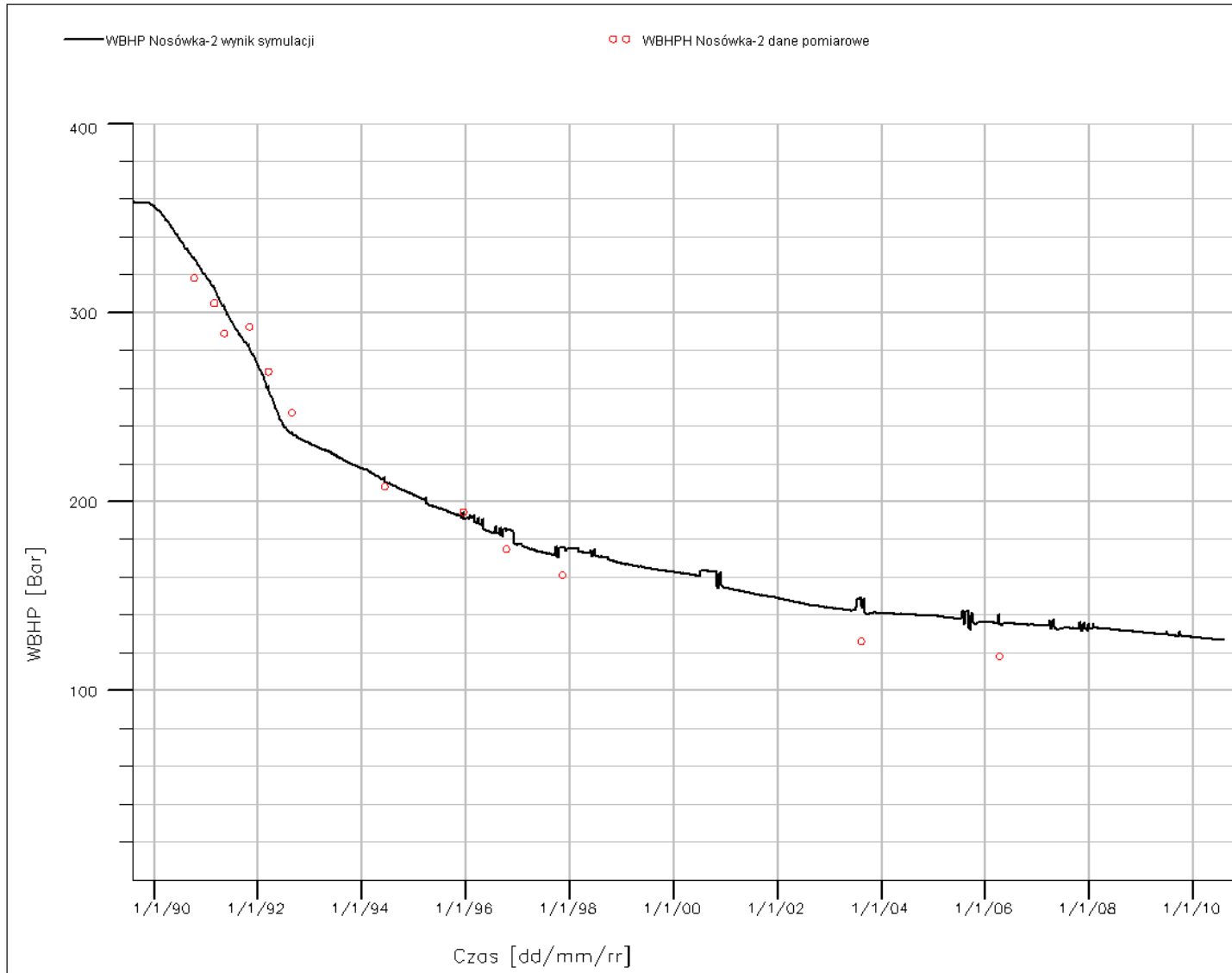


Fig. 1.1.16_288 Wynik dopasowania modelu. Złoże Nosówka. Odwiert Nosówka-2. Ciśnienie na spodzie odwiertu.

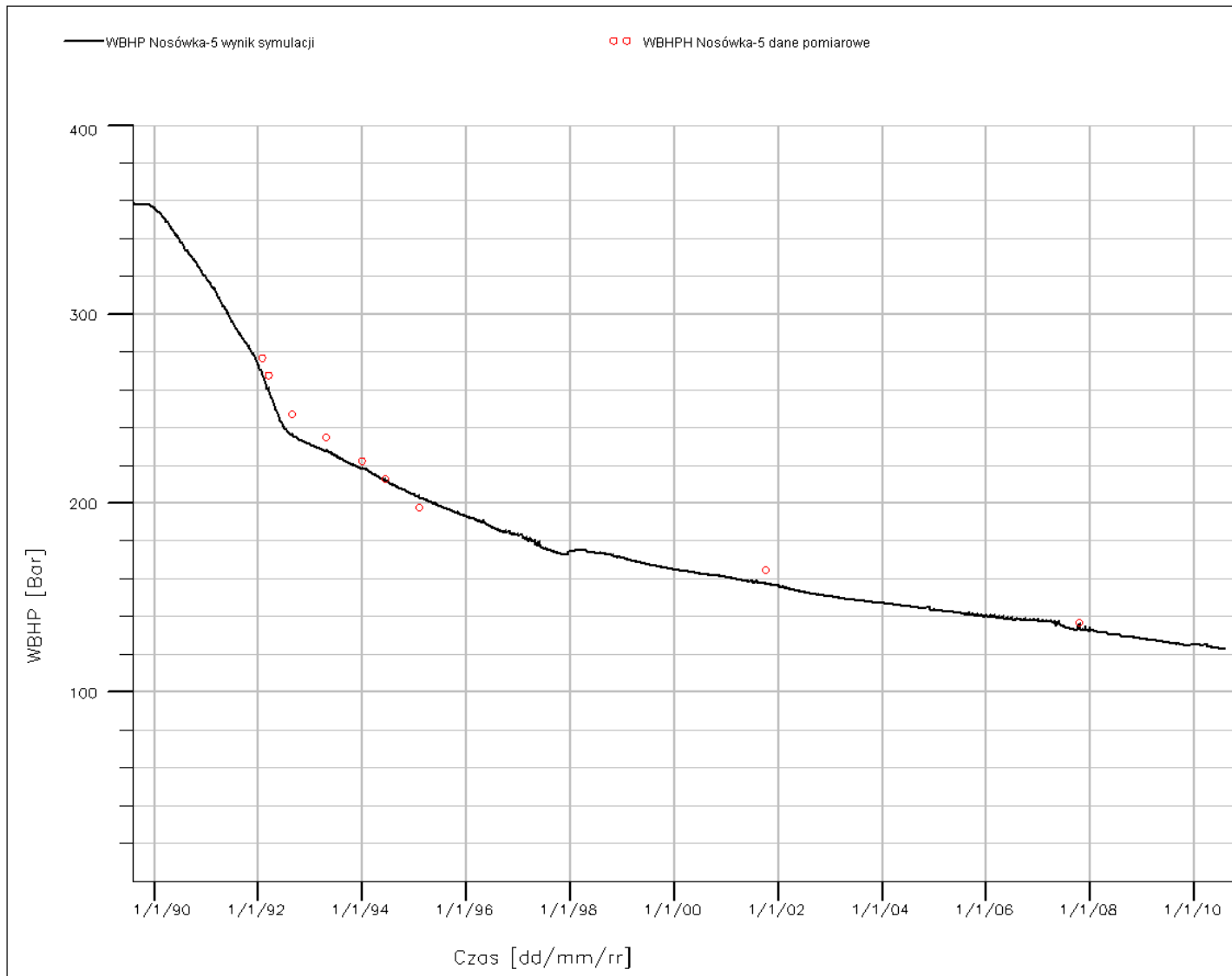


Fig. 1.1.16_289 Wynik dopasowania modelu. Złoże Nosówka. Odwiert Nosówka-5. Ciśnienie na spodzie odwiertu.

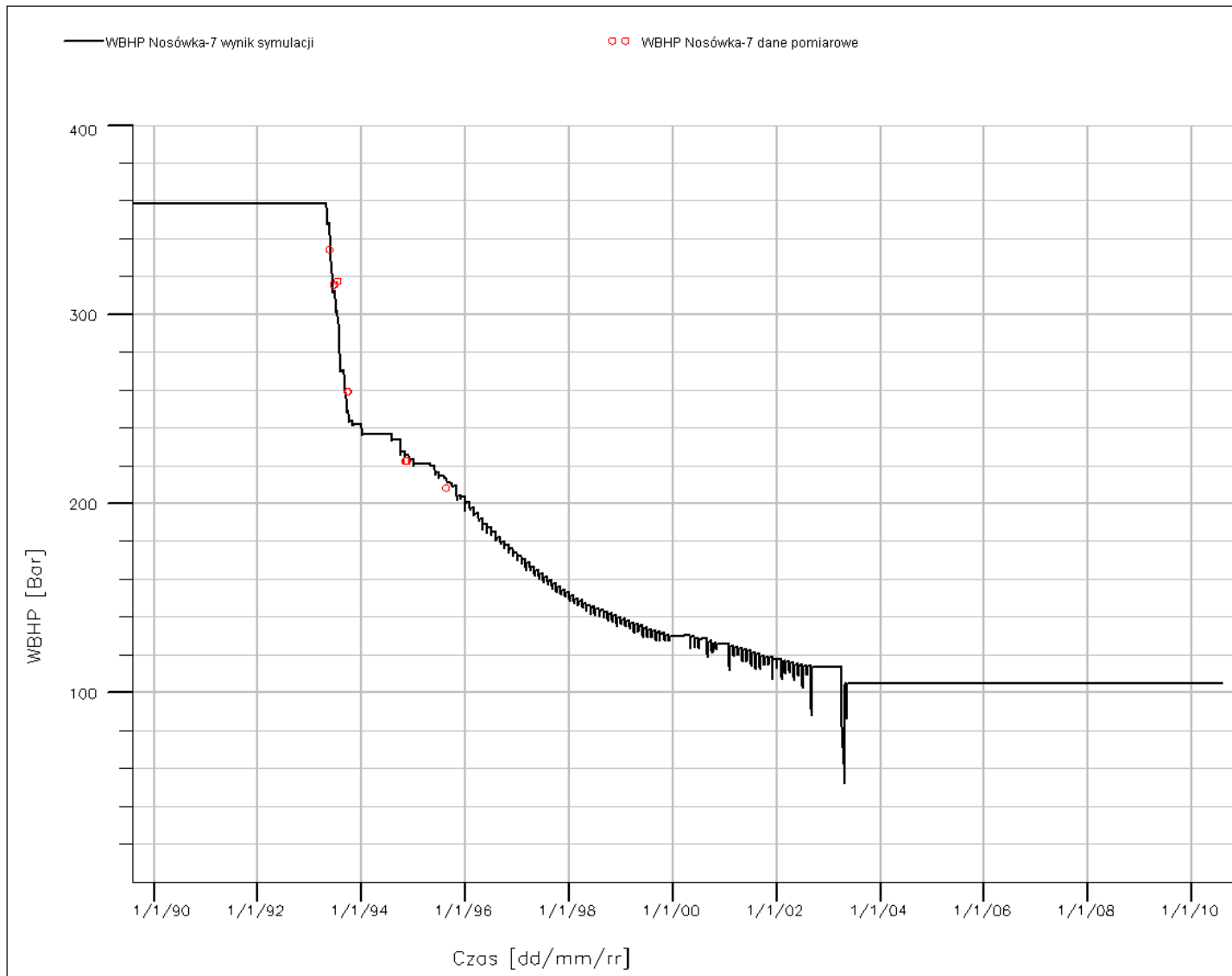


Fig. 1.1.16_290 Wynik dopasowania modelu. Złoże Nosówka. Odwiert Nosówka-7. Ciśnienie na spodzie odwiertu.

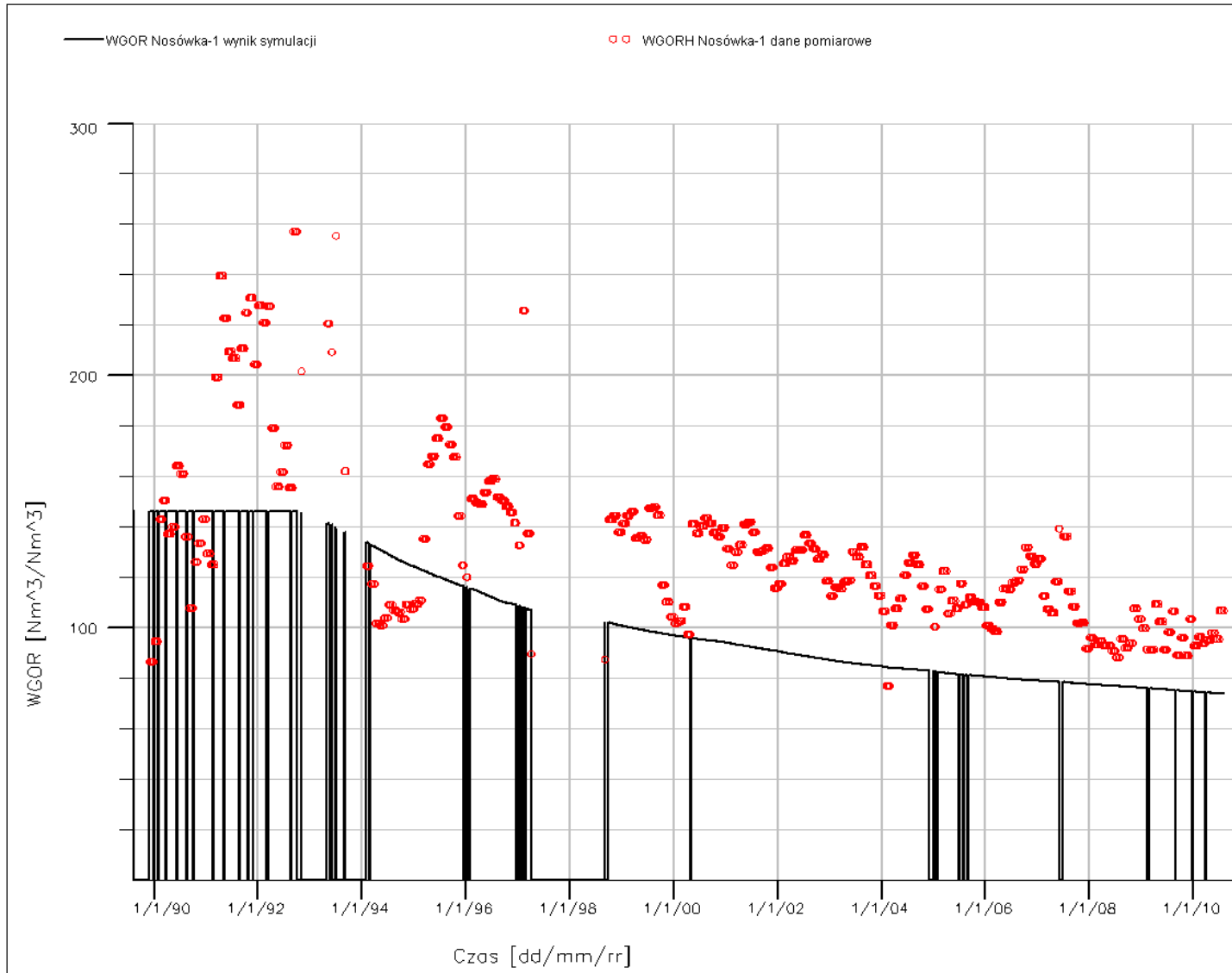


Fig. 1.1.16_291 Wynik dopasowania modelu. Złoże Nosówka. Odwiert Nosówka-1. Wykładnik gazowy.

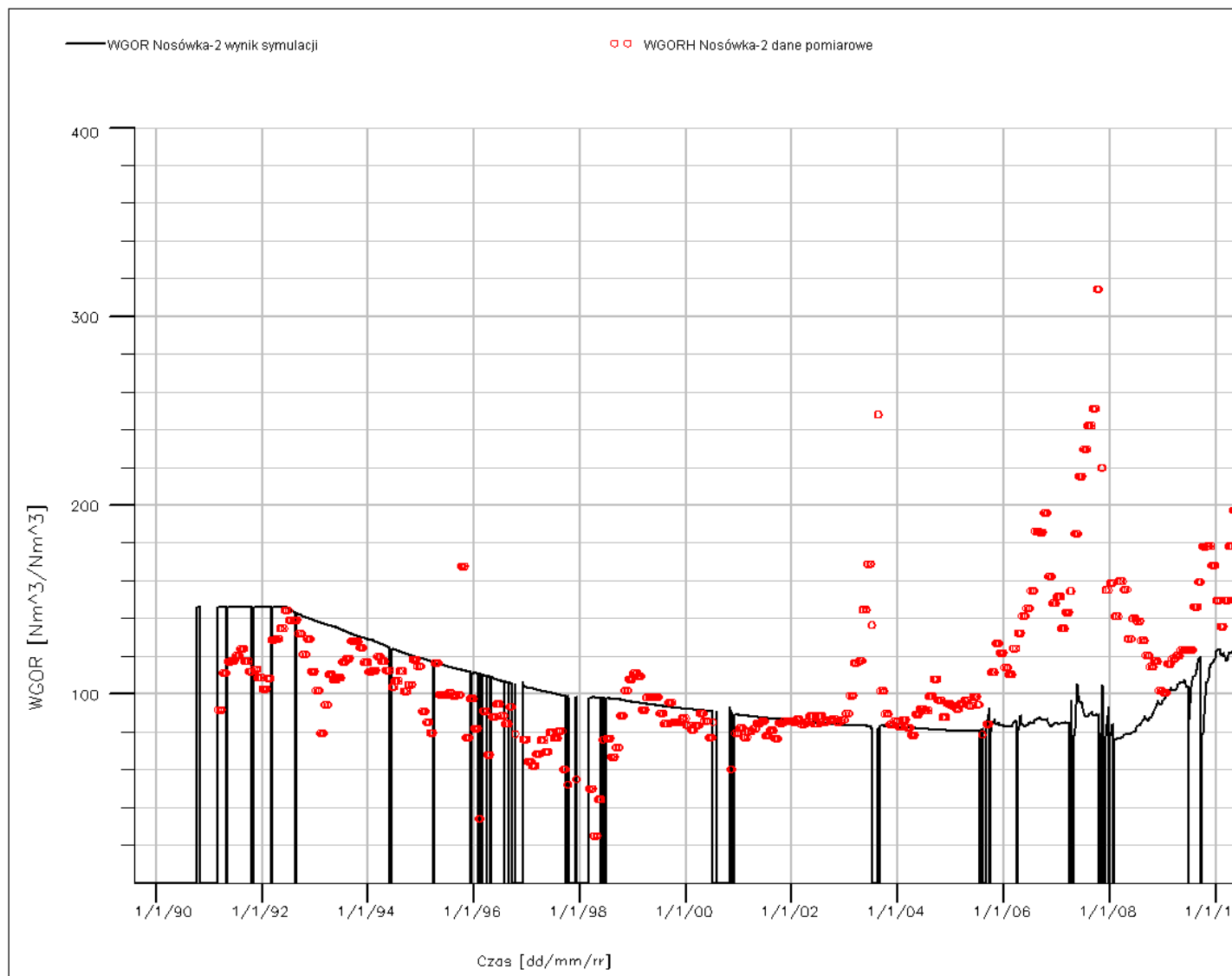


Fig. 1.1.16_292 Wynik dopasowania modelu. Złoże Nosówka. Odwiert Nosówka-2. Wykładnik gazowy.

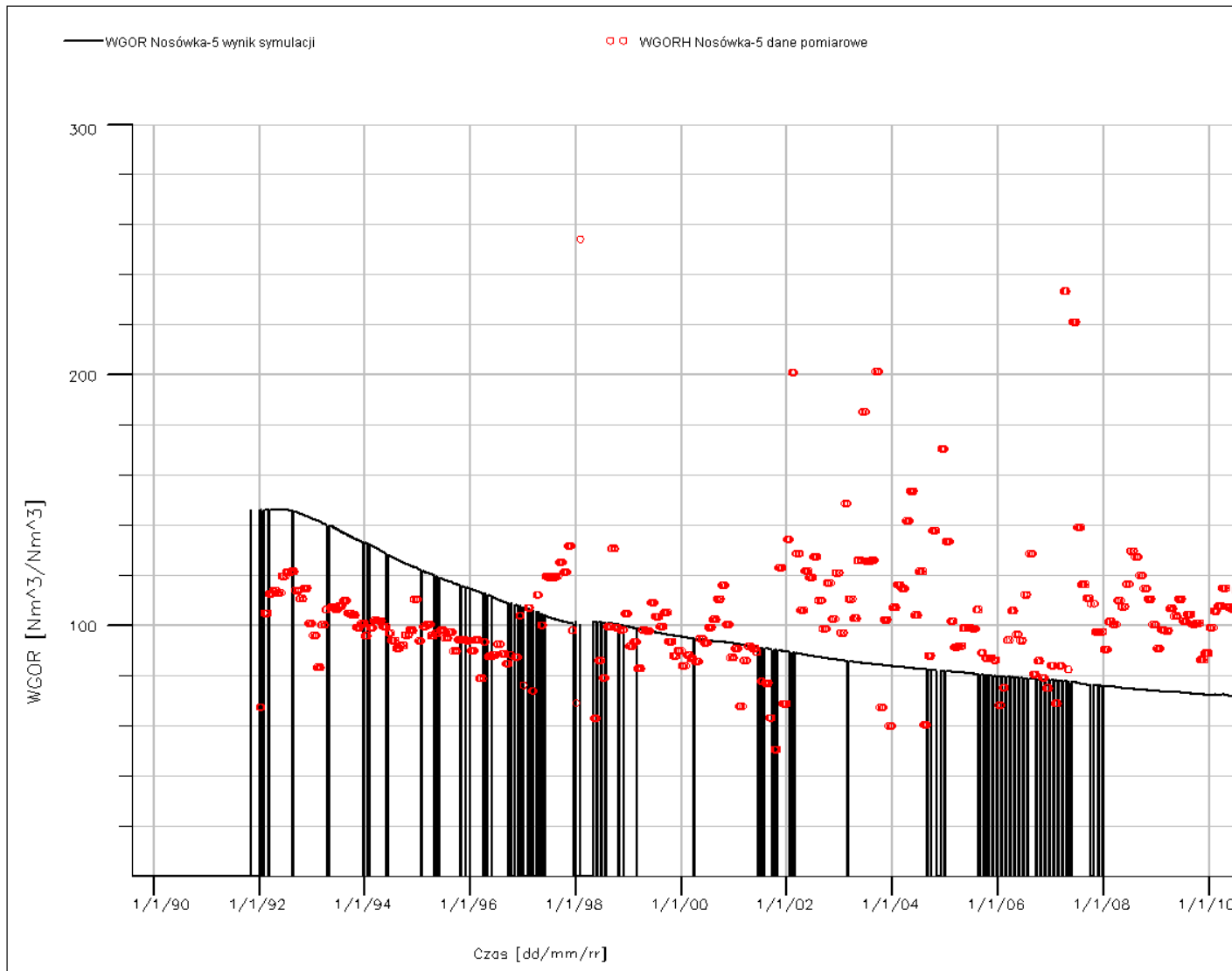


Fig. 1.1.16_293 Wynik dopasowania modelu. Złoże Nosówka. Odwiert Nosówka-5. Wykładnik gazowy.

Założenia dla procesów sekwestracji i eksploatacji

Symulacje złożowe przeprowadzono według czterech, przedstawionych poniżej wariantów realizujących różne schematy eksploatacji złoża z równoczesną sekwestracją dwutlenku węgla. W każdym z wariantów wykonano dwie symulacje, uwzględniając dwie wartości maksymalnego dopuszczalnego wykładnika gazowego, (500 oraz 2000 Nm³/Nm³). Oznaczenia liczbowe wariantów odpowiadają przyjętej w symulacji maksymalnej wartości wykładnika gazowego, WGOR.

Wariant bazowy (A500,A2000)

Założenia dla wariantu bazowego ustalono na podstawie aktualnych parametrów pracy złoża, po konsultacji z jego operatorem. Przyjęto następujące wartości liczbowe parametrów pracy złoża:

- Stała grupowa wydajność wydobycia ropy, $q_o = 35 \text{ Nm}^3/\text{d}$, przy czym założono eksploatację złoża trzema odwiertami bloku centralnego (Nosówka-1, Nosówka-2, Nosówka-5),
- Minimalna uzasadniona ekonomicznie wydajność wydobycia ropy naftowej z odwiertu, $q_{\text{econ}} = 5 \text{ Nm}^3/\text{d}$,
- Minimalne ciśnienie na spodzie odwiertu, BHP dla odwiertów produkcyjnych:

Nosówka-1, $\text{WBHP}_{N1} = 3 \text{ MPa}$,

Nosówka-2, $\text{WBHP}_{N2} = 1,8 \text{ MPa}$,

Nosówka-5, $\text{WBHP}_{N5} = 3,3 \text{ MPa}$,

W przypadku osiągnięcia przez odwiert założonego limitu wykładnika gazowego, WGOR (A500 – 500 Nm³/Nm³, A2000 – 2000 Nm³/Nm³) następuje stopniowa redukcja wydajności wydobycia, aż do osiągnięcia limitu ekonomicznego, po czym odwiert zostaje zamknięty.

Stopniowa konwersja odwiertów produkcyjnych (B500,B2000)

W wariantach B500, B2000 przyjęto schemat stopniowej konwersji odwiertów produkcyjnych Nosówka-1, Nosówka-2 oraz Nosówka-5 na odwierty zatłaczające w sytuacji osiągnięcia przez nie limitów kończących ich wydobycie. Parametry sterujące pracą odwiertów (w tym limity kończące wydobycie) przyjęto analogicznie jak w wariantach bazowych. Ze względu na sekwestrację CO₂ w tym wariantcie, przyjęto maksymalną wartość ułamka molowego CO₂ w gazie wydobywanym, $\text{CMF}_{\text{CO}_2} = 0.75$. Po osiągnięciu limitu ułamka molowego CO₂ odwiert zostaje wyłączony z eksploatacji.

Dla odwiertów zatłaczających przyjęto następujące założenia eksploatacyjne:

- maksymalne dopuszczalne ciśnienie denne, $\text{WBHP}_{\text{max}} = 39 \text{ MPa}$,
- grupowa wydajność zatłaczania dla odwiertów zatłaczających (po konwersji) jest równa wydajności wydobycia płynów złożowych (suma wydajności wydobycia ropy naftowej i gazu ziemnego) – liczonych w warunkach złożowych, co oznacza zastąpienie przez CO₂ objętości wydobytych płynów w tych warunkach.

Wstępne zatłaczanie CO₂ (C500,C2000)

W wariantcie tym przyjęto następujący schemat pracy złoża:

- Faza I (sekwestracyjna) - polega na zatłaczaniu dwutlenku węgla odwiertem Nosówka – 2 z wydajnością $q_{inj} = 150000 \text{ Nm}^3/\text{dobę}$, do momentu osiągnięcia poziomu pierwotnego ciśnienia złożowego tj. około $P_{zi}=35,9 \text{ MPa}$. W fazie tej złoże nie jest eksploatowane, a odwierty Nosówka – 1 i Nosówka – 5 są zamknięte,
- Faza II (wydobywcza) – polega na eksploatacji złoża odwiertami Nosówka – 1 i Nosówka – 5, przy czym odwiert zatłaczający (Nosówka-2) jest zamknięty. Po osiągnięciu przez odwierty produkcyjne limitów wydobywczych, następuje ich zamknięcie,
- Faza III (sekwestracyjna) – analogiczna jak faza I.

Parametry sterujące pracą odwiertów w fazie produkcyjnej przyjęto analogicznie jak w wariantach bazowych (A500, A2000), natomiast w fazach I i III dla odwiertu zatłaczającego Nosówka-2 przyjęto $WBHP_{max} = 39 \text{ MPa}$.

Praca cykliczna (D500,D2000)

W wariantcie zaproponowano sposób eksploatacji złoża według schematu zakładającego cykliczność. Cykl pracy złoża składa się z dwóch faz:

- Faza sekwestracyjna - CO₂ jest zatłaczany odwiertem Nosówka–2, do chwili osiągnięcia poziomu pierwotnego ciśnienia złożowego ($P_{zi}=35,9 \text{ MPa}$).
- Faza produkcyjna – złoże jest eksploatowane odwiertami Nosówka-1 i Nosówka-5. Warunkiem jej zakończenia jest obniżenie średniego ciśnienia złożowego do poziomu około 30 MPa.

Przedstawiony cykl pracy jest powtarzany do momentu osiągnięcia przez wszystkie odwierty limitów produkcyjnych, przyjętych analogicznie jak w poprzednich wariantach.

Symulacje procesów wydobycia i sekwestracji CO₂

Przedstawione poniżej wyniki symulacji złożowych uzyskano przy użyciu kompozycyjnego symulatora złożowego Eclipse 300 firmy Schlumberger.

Przy opisie wykresów przyjęto następujące oznaczenia:

FOPT [Nm³] – sumaryczne wydobycie ropy naftowej,

FOPR [Nm³/d] – łączna wydajność wydobycia ropy naftowej,

FGIT [Nm³] – sumaryczna ilość gazu zatłoczonego,

FGIR [Nm³/d]- łączna wydajność zatłaczania gazu,

WBHP [bar]- ciśnienie denne w odwiercie,

WOPR [Nm³/d]- wydajność wydobycia ropy naftowej z odwiertu,

WGIR [Nm³/d]- wydajność zatłaczania gazu do odwiertu,

FPPG [bar] - średnie ciśnienie złożowe,

C_CO₂ [ułamek molowy]- ułamek molowy CO₂ w gazie wydobywanym.

Warianty bazowe

Na figurach **1.1.16_294-1.1.16_297** przedstawiono wybrane charakterystyki pracy złoża według wariantu A500. Według tego wariantu złożo kończy eksploatację w IV 2018r. wydobyciem 358 tys. Nm³ ropy naftowej (**Fig. 1.1.16_294**), co po uwzględnieniu dotychczasowego wydobycia daje około 76 tys. Nm³ ropy naftowej wydobytej od początku prognozy (01.01.2010r.). Szczegółowe charakterystyki odwiertów eksploatacyjnych przedstawiono na **Fig. 1.1.16_295-1.1.16_297**. Odwierty kończą eksploatację w kolejności Nosówka-2, Nosówka-5 oraz Nosówka-1 odpowiednio w X 2015r, X 2016r. oraz IV 2018. We wszystkich przypadkach przyczyną zakończenia eksploatacji było osiągnięcie limitu ekonomicznego wydajności wydobycia na skutek redukcji wydajności spowodowanej wzrostem wykładnika gazowego.

Odpowiednie charakterystyki dla wariantu A2000 przedstawiono na **Fig. 1.1.16_298-1.1.16_301**. Sumaryczne wydobycie ropy naftowej od początku eksploatacji w tym wariantcie wyniosło 419 tys. Nm³, co daje około 137 tys. Nm³ ropy naftowej wydobytej od początku prognozy. Podobnie jak w wariantcie A500 najpierw kończy eksploatację odwiert Nosówka – 2 (06.2021r,) a następnie odwiert Nosówka – 5 (01.2022r.) oraz Nosówka – 1 (10.2022). Kolejność zagazowywania się odwiertów wynika z głębokości ich udostępnienia. Jako pierwszy kończy eksploatację odwiert najpłycej udostępniony, a następnie stopniowo odwierty udostępnione niżej.

Stopniowa konwersja odwiertów produkcyjnych

Wyniki symulacji uzyskane dla wariantu B500 przedstawiono na **Fig. 1.1.16_302-1.1.16_309**. W tym wariantcie złoża kończy eksploatację w XI 2022r. z wydobyciem liczoną od początku eksploatacji na poziomie 377 tys. Nm³ (około 95 tys. Nm³ od rozpoczęcia prognozy) (**Fig. 1.1.16_302**). W czasie trwania prognozy do złoża zatłoczono około 193 mln Nm³ CO₂ (**Fig. 1.1.16_303**). Charakterystyki pracy poszczególnych odwiertów przedstawiono na **Fig. 1.1.16_304-1.1.16_306** oraz **Fig. 1.1.16_307-1.1.16_309**. Zarówno kolejność jak i przyczyny końca eksploatacji są w tym przypadku identyczne jak w wariantach bazowych; osiągnięcie limitu wydajności wydobywania spowodowane wzrostem wykładnika gazowego. Eksploatację kończą kolejno odwierty Nosówka-2 (10.2015), Nosówka-5 (08.2017) oraz Nosówka-1 (11.2022). Po zakończeniu eksploatacji odwierty rozpoczynają pracę jako odwierty zatłaczające. W chwili, gdy kończy prace ostatni odwiert (Nosówka-1), następuje sekwestracja CO₂ wszystkimi odwiertami z wydajnością $q_{inj}=100$ tys. Nm³/d do momentu osiągnięcia przez średnie ciśnienie złożowe wartości pierwotnej, co następuje w VI 2027r.

Analogiczne charakterystyki dla wariantu B2000 przedstawiono na **Fig.1.1.16_310-1.1.16_317**. W wariantcie tym, od początku eksploatacji ze złoża wydobyto 430 tys. Nm³ ropy naftowej (od początku prognozy 148 tys. Nm³), a zatłoczono około 214 mln Nm³ dwutlenku węgla. Konwersja odwiertów z wydobywczych na zatłaczające następuje kolejno w miarę osiągania przez odwierty limitów produkcyjnych: Nosówka-2 (03.2021), Nosówka-5 (09.2021) oraz Nosówka-1 (06.2024). Średnie ciśnienie złożowe osiąga w tym wariantcie wartość pierwotną w VI 2029r.

Wstępne zatłaczanie CO₂

W wariantach C500 i C2000 przyjęto schemat wstępnej sekwestracji CO₂ najwyżej udostępnionym odwiertem (Nosówka-2) ze stałą wydajnością $q_{inj}=150$ tys. Nm³/d do czasu, kiedy średnie ciśnienie złożowe osiąga wartość pierwotną, tj. do IX 2013r. Następnie rozpoczyna się faza sekwestracyjna, która trwa do chwili zakończenia wydobywania przez ostatni odwiert, po czym powtórnie rozpoczyna się faza sekwestracji trwająca do momentu osiągnięcia pierwotnego ciśnienia złożowego. Na **Fig.1.1.16_318**, **Fig.1.1.16_319**(wariant C500) oraz **Fig.1.1.16_323**, **Fig.1.1.16_324** (wariant C2000) przedstawiono sumaryczne charakterystyki dla omawianych wariantów. W wariantach C500, C2000 od początku eksploatacji ze złoża wydobyto odpowiednio 488 tys. i 459 tys. Nm³ ropy naftowej, natomiast zatłoczono około 284 mln Nm³ i 265 mln Nm³. Faza eksploatacji trwa w wariantcie C500 od IX 2013 do III 2038r, natomiast w wariantcie C2000 od IX 2013 do VI 2027r. Szczegółowe charakterystyki pracy odwiertów przedstawiono na **Fig.1.1.16_320- 1.1.16_322** – wariant C500 oraz **Fig.1.1.16_325- 1.1.16_327** – wariant C2000. W wariantcie C500 odwiert Nosówka-5 kończy pracę w XI 2014 na skutek redukcji wydajności spowodowanej osiągnięciem limitu wykładnika gazowego. Odwiert Nosówka-1 kończy eksploatację z tego samego powodu, lecz pracuje aż do III 2038r. W wariantcie C2000 odwierty kończą wydobywanie w III 2019 – Nosówka-5 oraz VI 2027 – Nosówka-1.

Praca cykliczna

W wariantach D500 i D2000 zastosowano schemat cyklicznej pracy złoża z naprzemiennymi cyklami wydobywania i sekwestracji. W wariantcie D500 złoża wykonuje 1 pełny cykl składający się z fazy sekwestracyjnej i wydobywczej. W czasie fazy wydobywczej kolejnego cyklu następuje zakończenie pracy

odwiertów spowodowane osiągnięciem limitu wykładnika gazowego. Ogólne charakterystyki eksploatacji w tym wariantcie przedstawiono na **Fig.1.1.16_328, Fig.1.1.16_329**. Sumaryczne wydobycie ropy naftowej ze złoża od początku eksploatacji wyniosło 313 tys. Nm³. W czasie trwania prognozy zatłoczono około 165 mln Nm³ CO₂. Szczegółowe charakterystyki pracy odwiertów przedstawiono na **Fig.1.1.16_330 - 1.1.16_332**. Odwiert Nosówka-5 kończy eksploatację w VII 2014r, natomiast odwiert Nosówka-1w VI 2016r. W obydwu przypadkach bezpośrednią przyczyną zakończenia eksploatacji jest osiągnięcie przez odwiert limitu wykładnika gazowego.

W wariantcie D2000 odwierty wykonują 4 pełne cykle, wydobywając sumarycznie (od początku eksploatacji) 381 tys. Nm³ ropy naftowej. W czasie prognozy odwiertem Nosówka-2 zatłoczono do złoża około 226 mln Nm³ dwutlenku węgla. Odnośne sumaryczne charakterystyki pracy złoża przedstawiono na **Fig.1.1.16_333, Fig.1.1.16_334**. Odwierty wydobywcze w tym wariantcie kończą eksploatację: Nosówka-5 – II 2019r, Nosówka-1 – XII 2022r. Odnośne szczegółowe charakterystyki pracy odwiertów przedstawiono na **Fig.1.1.16_333- 1.1.16_337**.

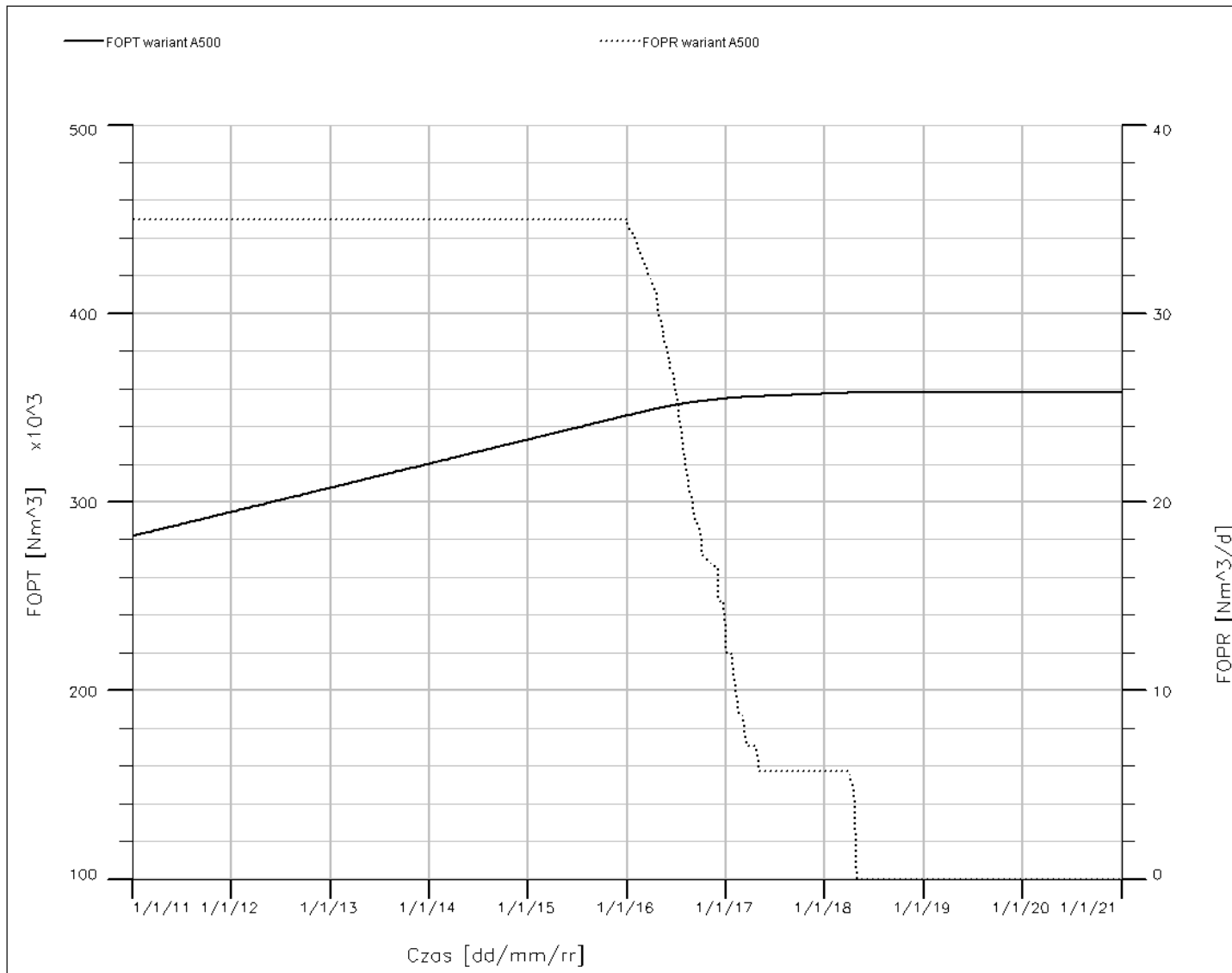


Fig.1.1.16_294 Złoże Nosówka. Prognoza wydobywania w wariantcie A500. Sumaryczne wydobywanie i wydajność wydobywania ropy.

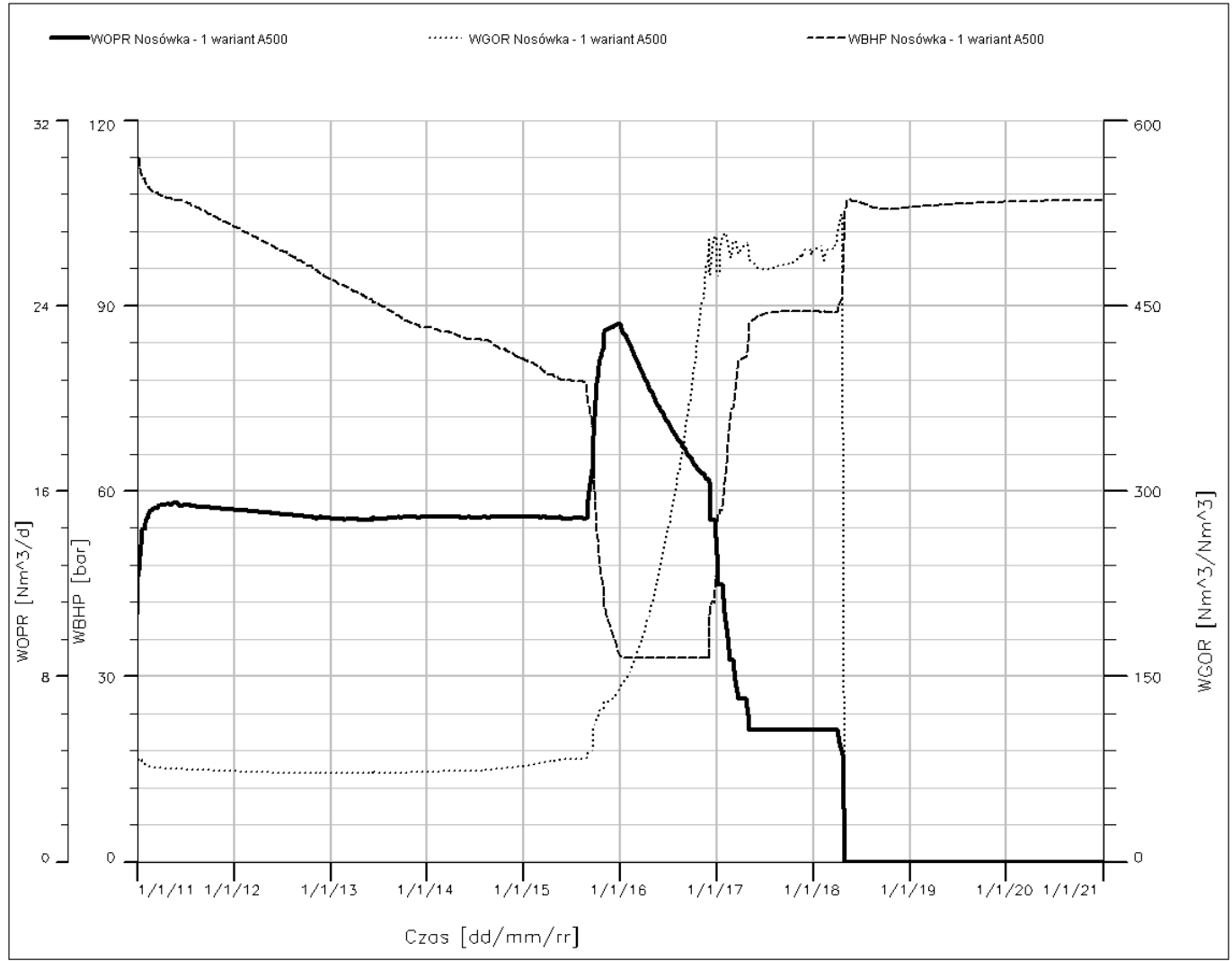


Fig.1.1.16_295 Złoże Nosówka. Prognoza wydobywania w wariantcie A500. Odwiert Nosówka-1. Wydajność wydobywania, wykładnik gazowy, ciśnienie na spodzie odwiertu.

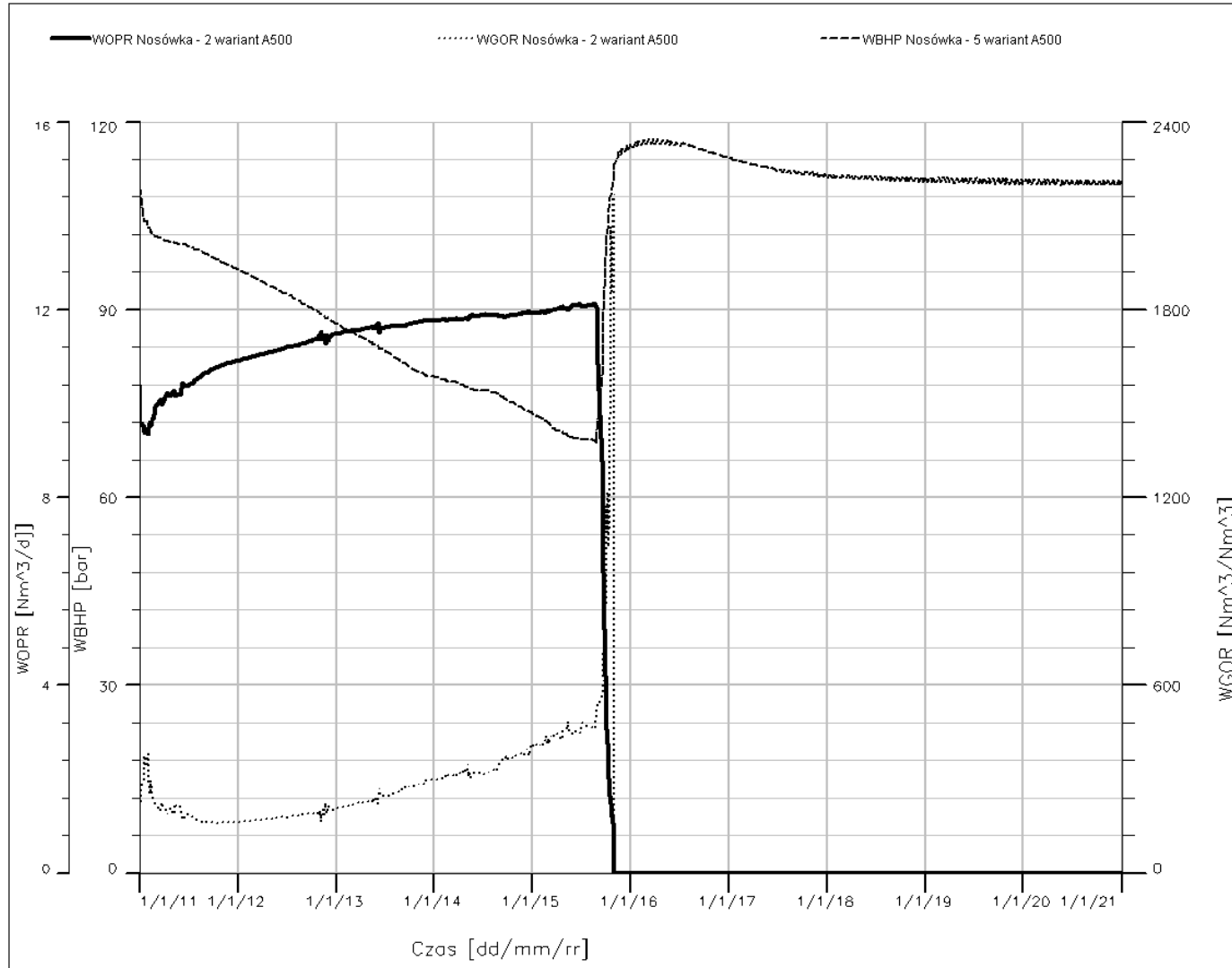


Fig.1.1.16_296 Złoże Nosówka. Prognoza wydobywania w wariantcie A500. Odwiert Nosówka-2. Wydajność wydobywania, wykładnik gazowy, ciśnienie na spodzie odwiertu.

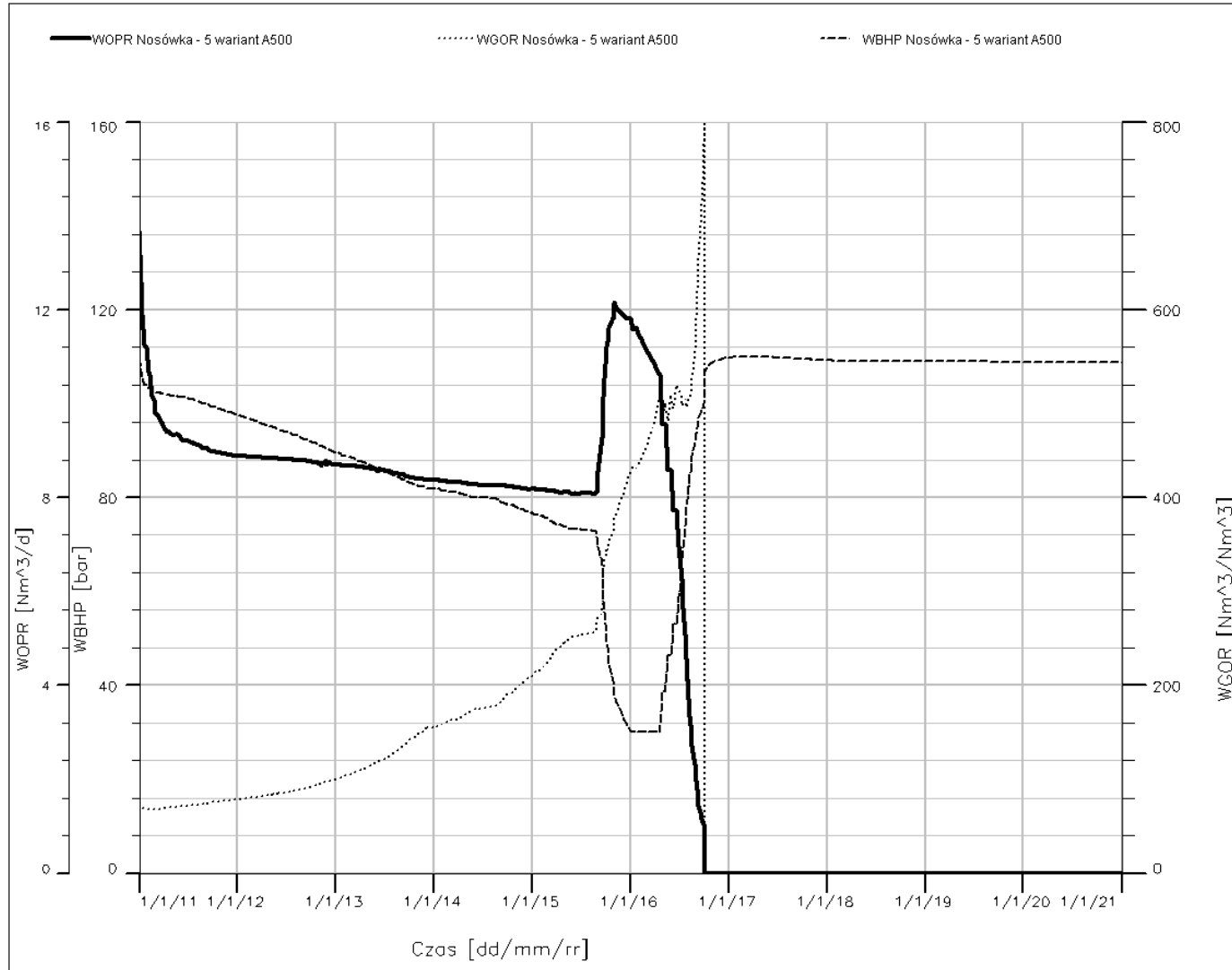


Fig.1.1.16_297 Złoże Nosówka. Prognoza wydobywania w wariantcie A500. Odwiert Nosówka-5. Wydajność wydobywania, wykładnik gazowy, ciśnienie na spodzie odwiertu.

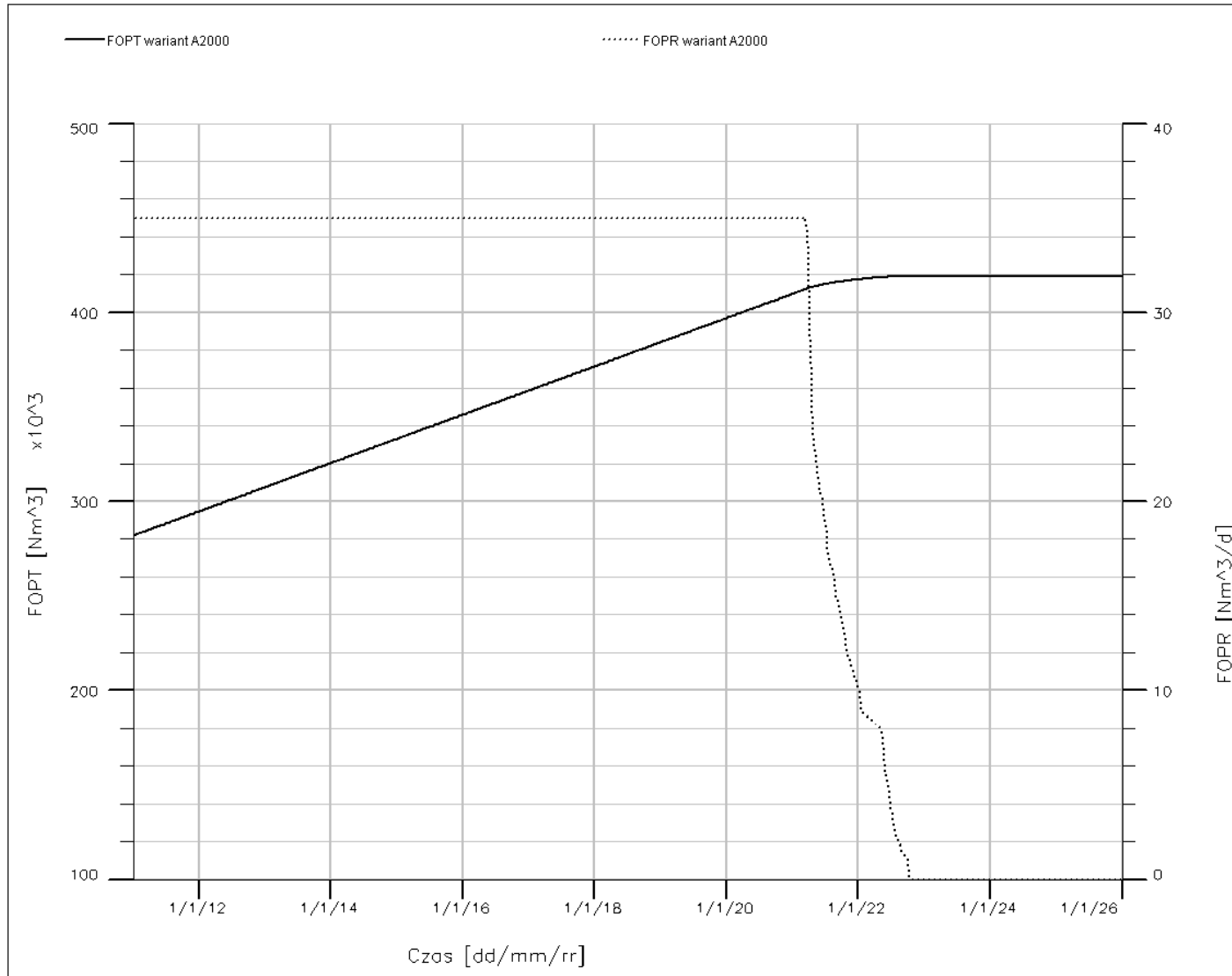


Fig.1.1.16_298 Złoże Nosówka. Prognoza wydobywania w wariantcie A2000. Sumaryczne wydobywanie i wydajność wydobywania ropy.

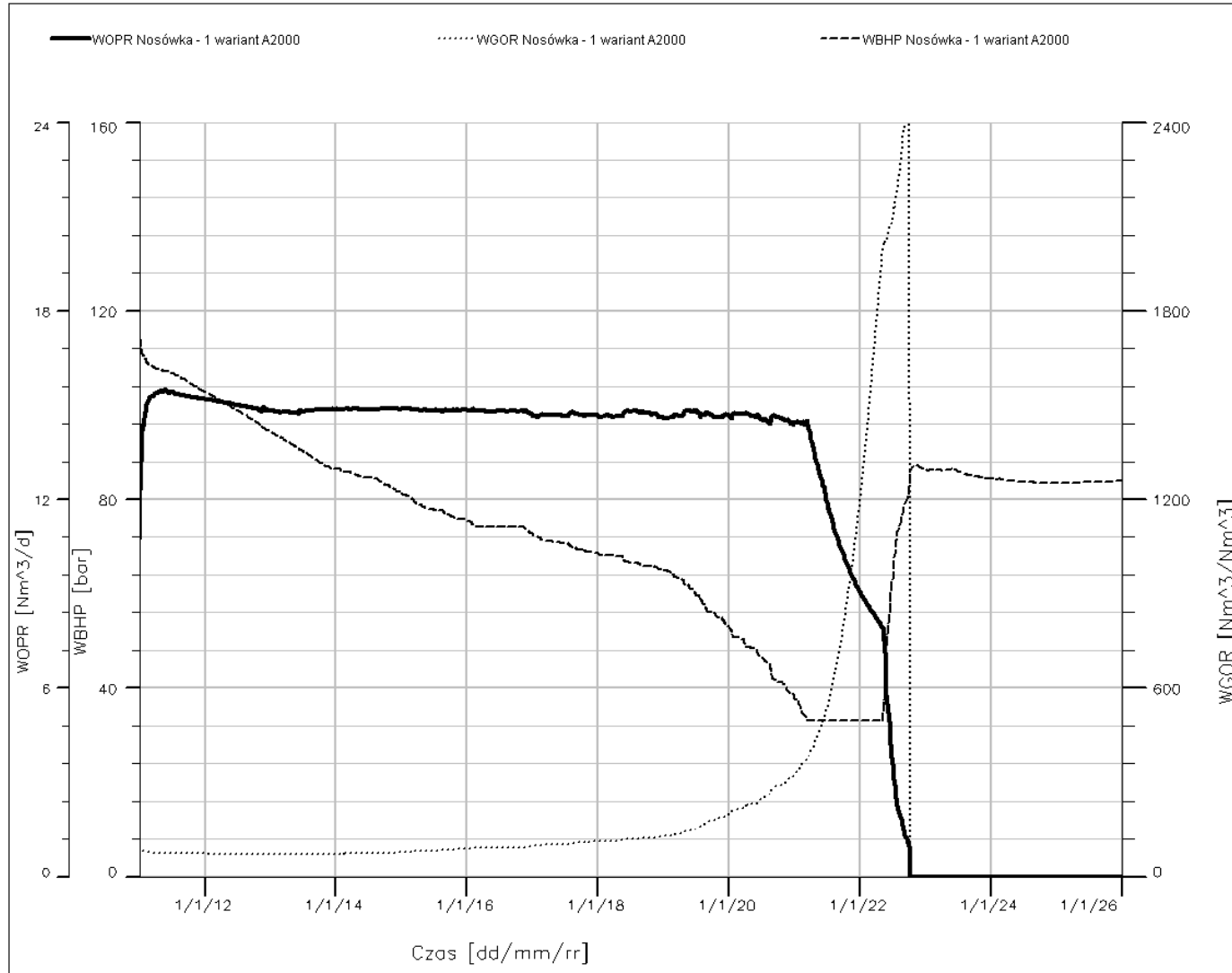


Fig.1.1.16_299 Złoże Nosówka. Prognoza wydobywania w wariantcie A2000. Odwiert Nosówka-1. Wydajność wydobywania, wykładnik gazowy, ciśnienie na spodzie odwiertu.

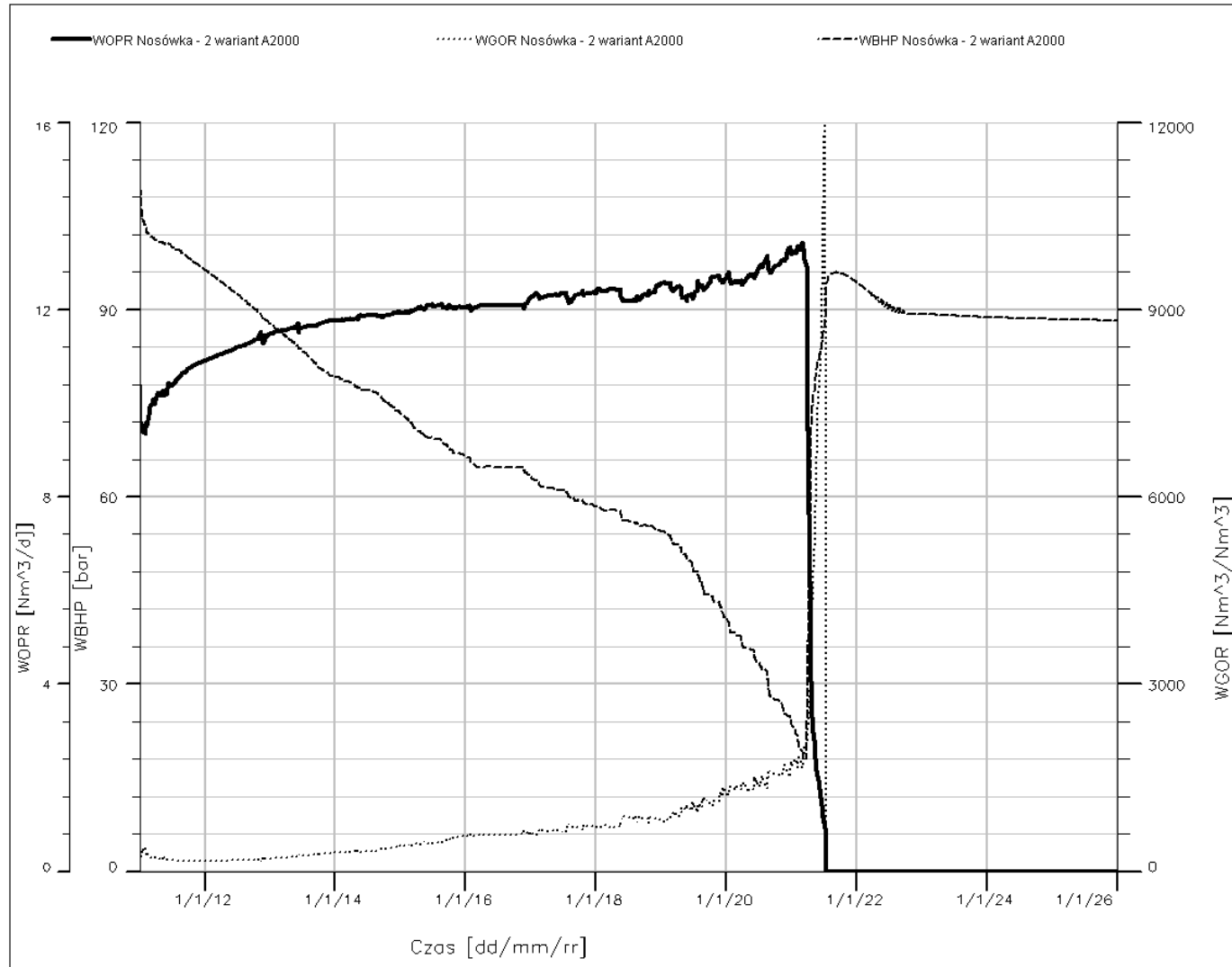


Fig.1.1.16_300 Złoże Nosówka. Prognoza wydobywania w wariantcie A2000. Odwiert Nosówka-2. Wydajność wydobywania, wykładnik gazowy, ciśnienie na spodzie odwiertu.

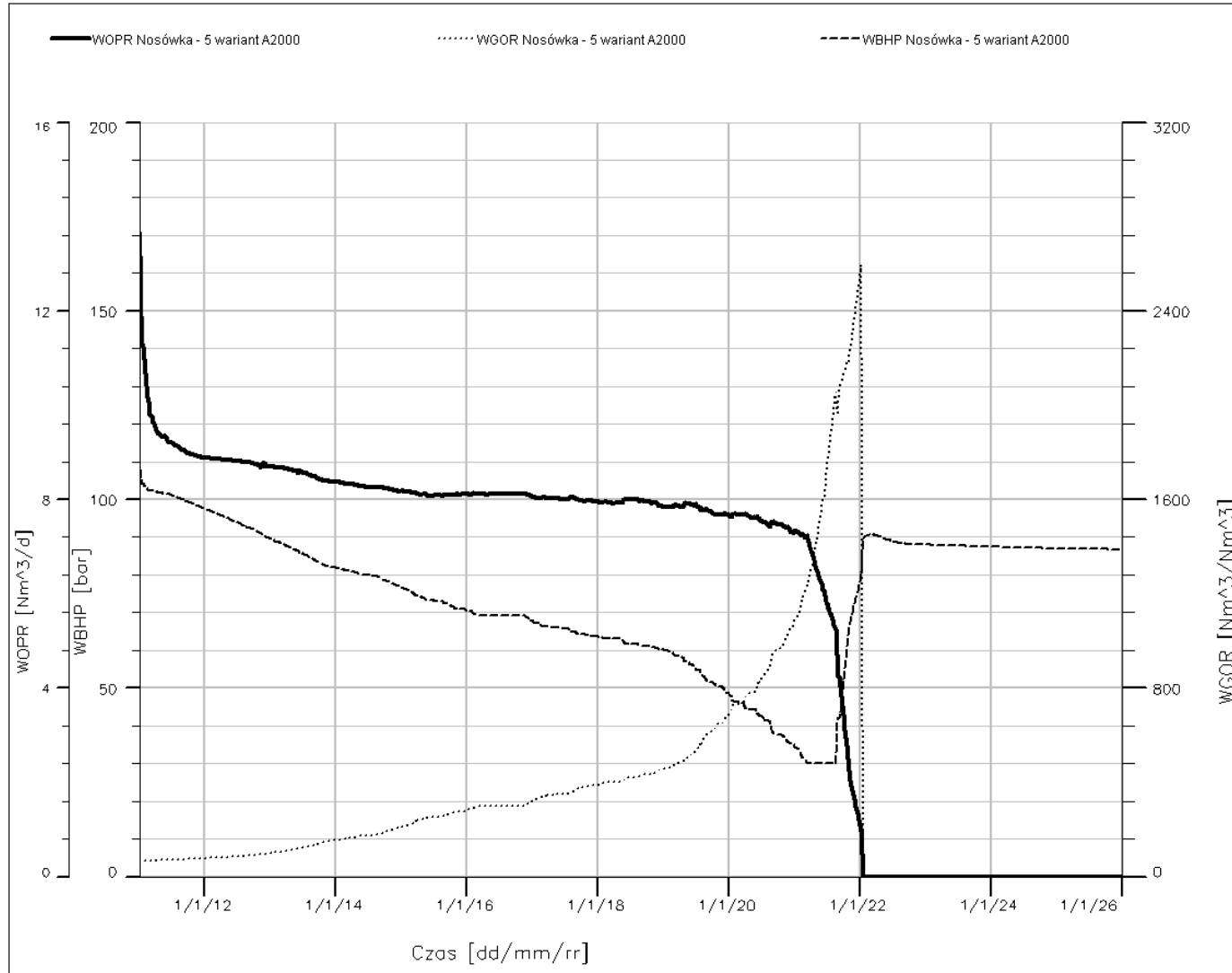


Fig.1.1.16_301 Złoże Nosówka. Prognoza wydobywania w wariantcie A2000. Odwiert Nosówka-5. Wydajność wydobywania, wykładnik gazowy, ciśnienie na spodzie odwiertu.

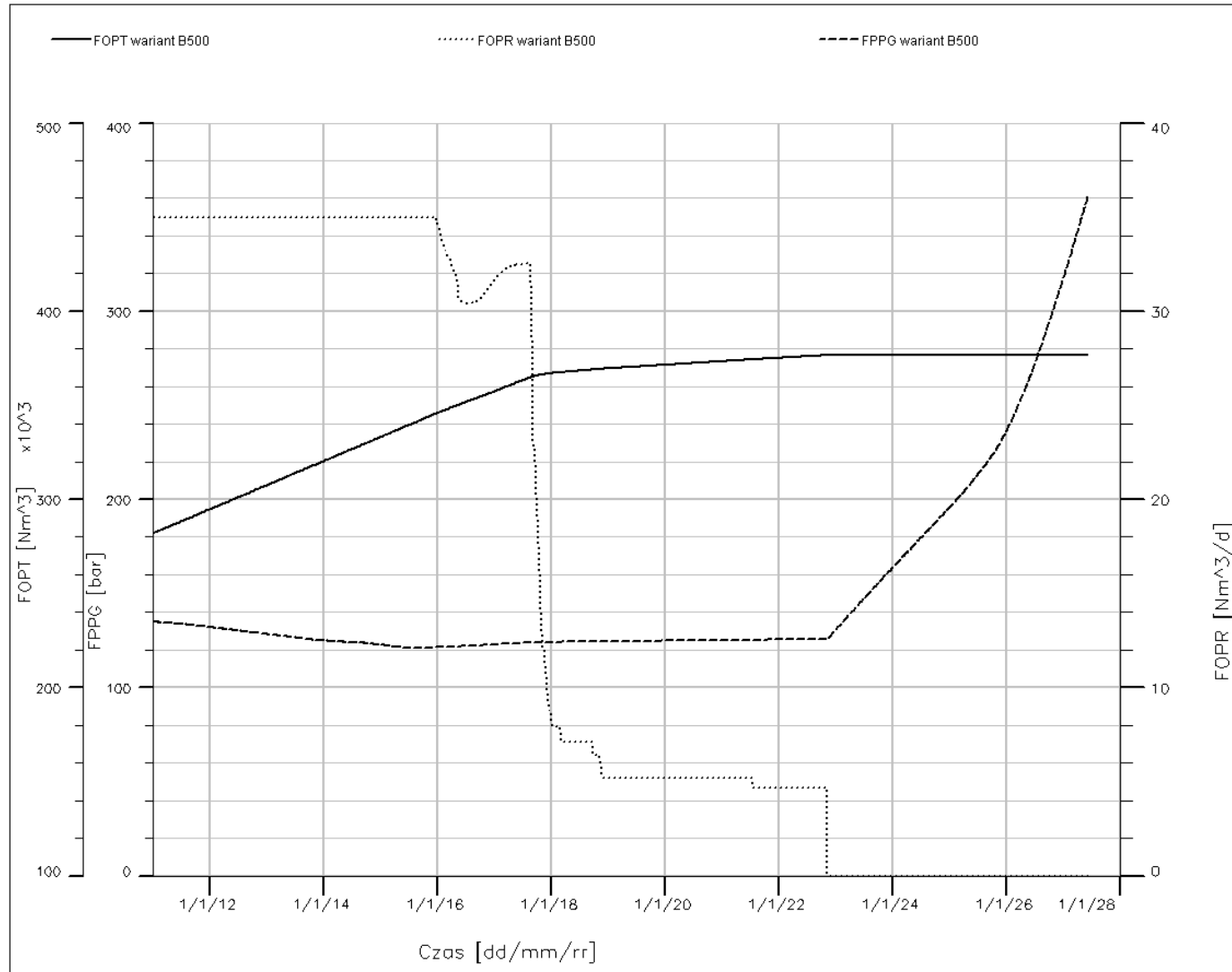


Fig.1.1.16_302 Złoże Nosówka. Prognoza wydobywania z zatlaczaniem w wariantcie B500. Sumaryczne wydobywanie, wydajność wydobywania, średnie ciśnienie złożowe.

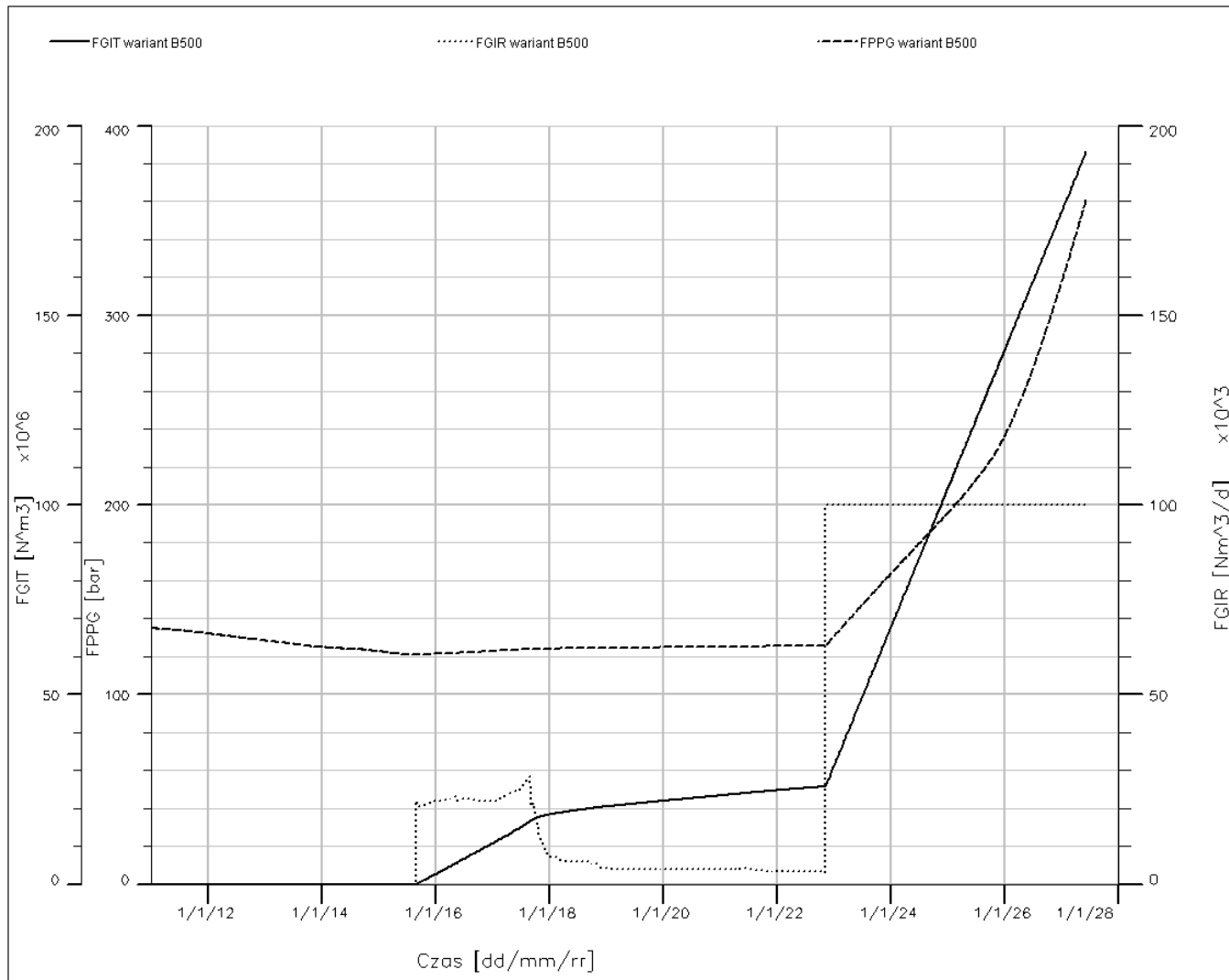


Fig.1.1.16_303 Złoże Nosówka. Prognoza wydobywania z zatlaczaniem w wariancie B500. Zatlaczanie sumaryczne, wydajność zatlaczania, średnie ciśnienie złożowe.

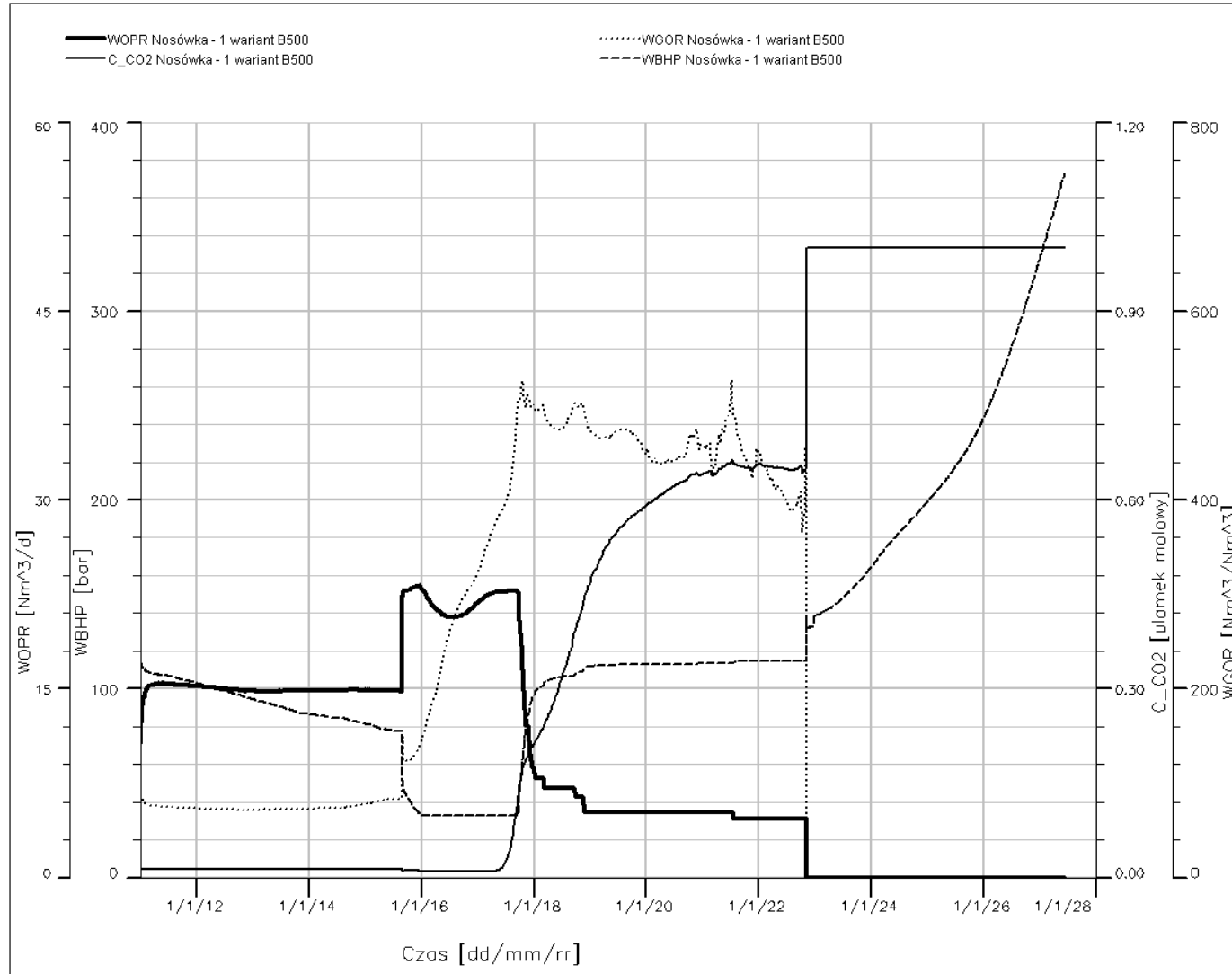


Fig.1.1.16_304 Złoże Nosówka. Prognoza wydobywania z zatlaczaniem w wariantcie B500. Odwiert Nosówka-1. Wydajność wydobywania, wykładnik gazowy, ciśnienie na spodzie odwiertu, ułamek molowy CO₂.

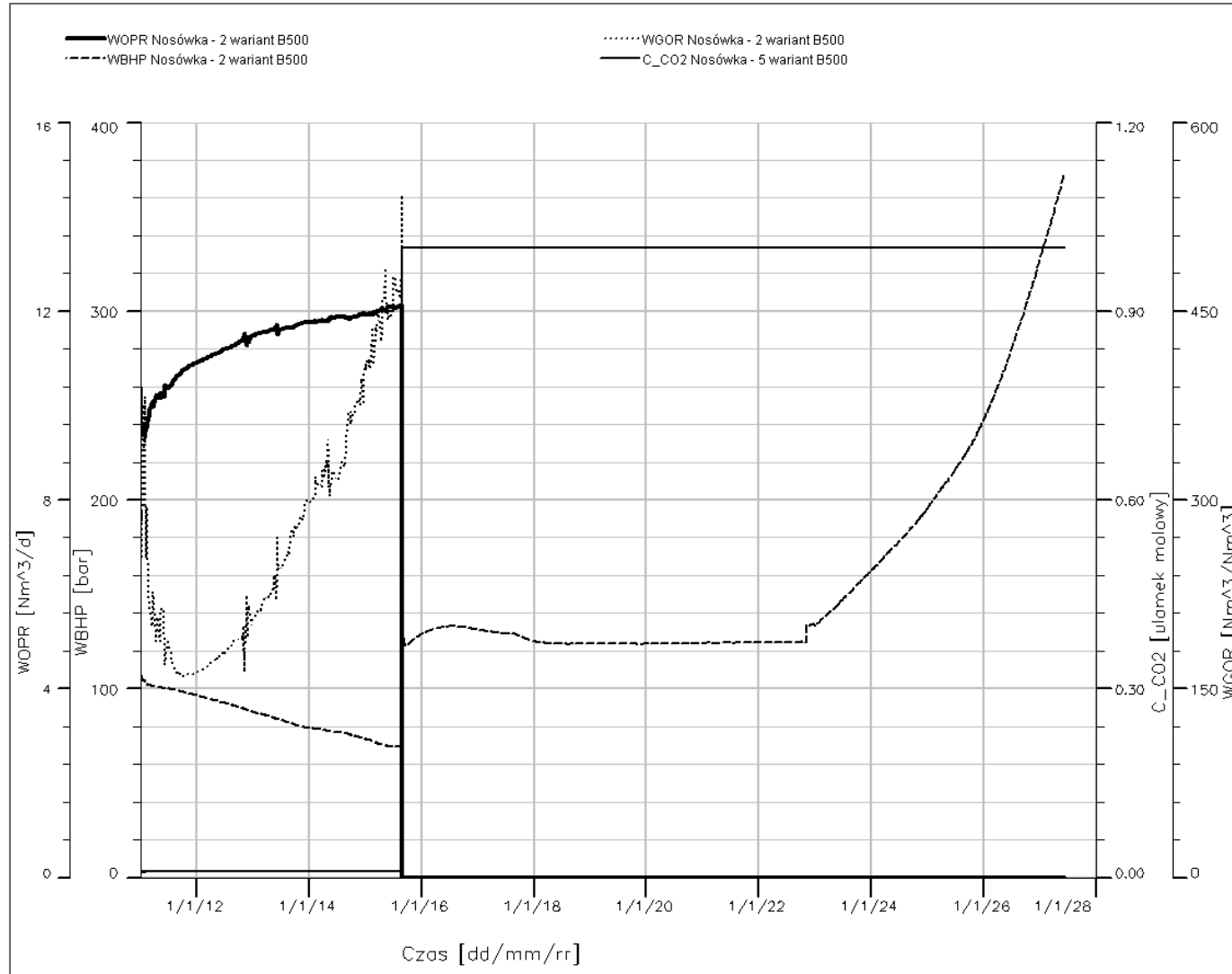


Fig.1.1.16_305 Złoże Nosówka. Prognoza wydobywania z zafłaczaniem w wariantcie B500. Odwiert Nosówka-2. Wydajność wydobywania, wykładnik gazowy, ciśnienie na spodzie odwiertu, ułamek molowy CO₂.

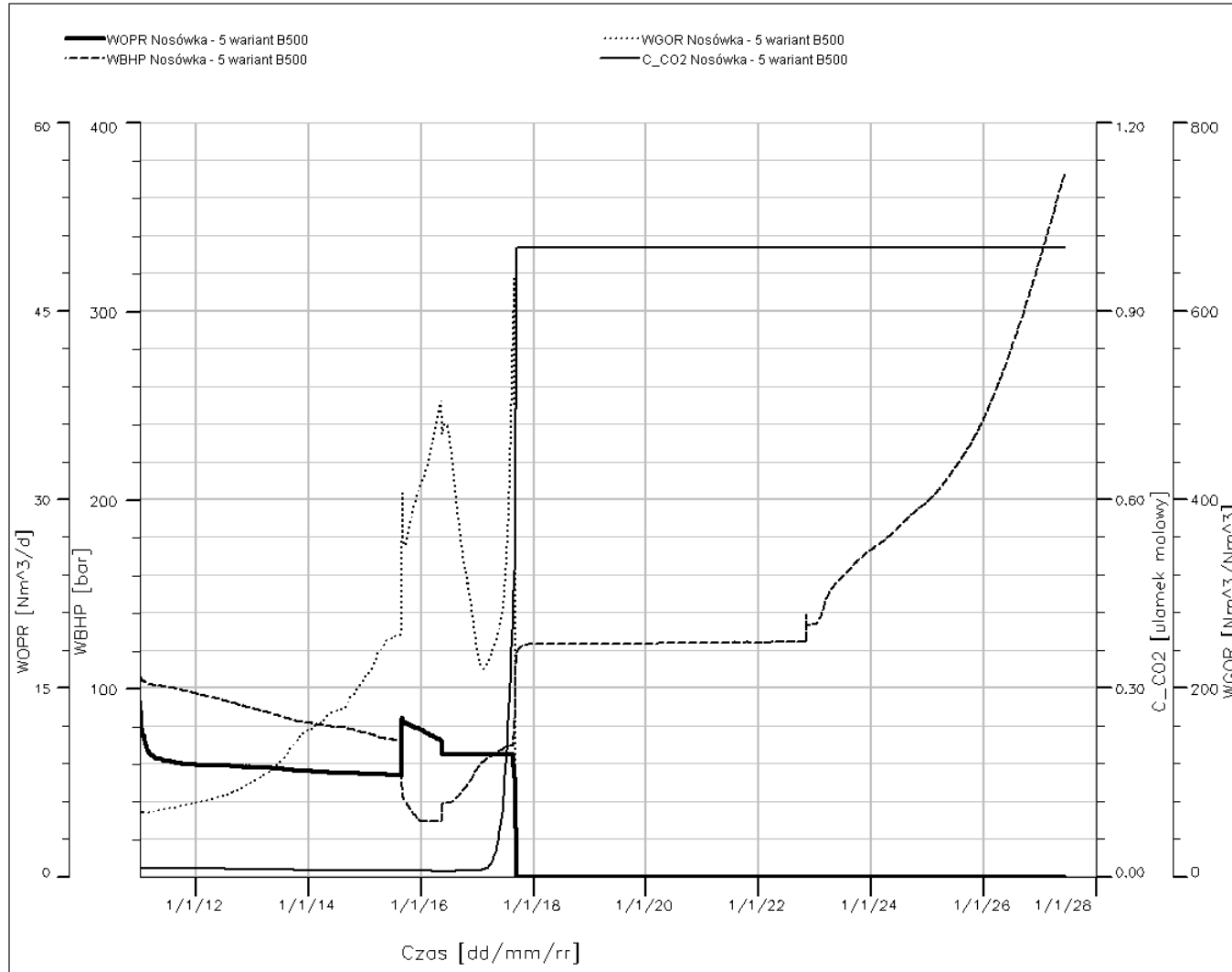


Fig.1.1.16_306 Złoże Nosówka. Prognoza wydobywania z zafłaczaniem w wariantcie B500. Odwiert Nosówka-5..Wydajność wydobywania, wykładnik gazowy, ciśnienie na spodzie odwiertu, ułamek molowy CO₂.

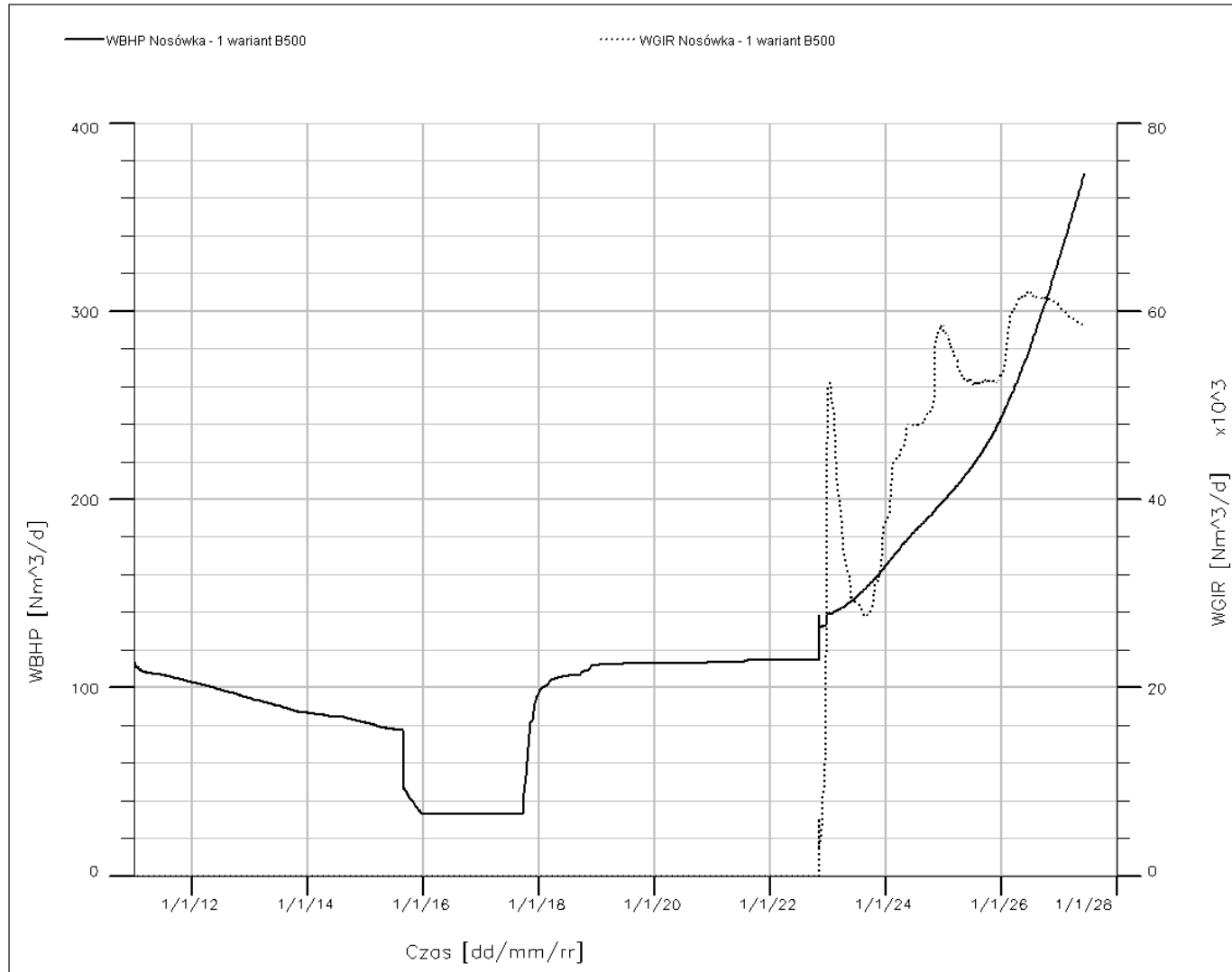


Fig.1.1.16_307 Złoże Nosówka. Prognoza wydobywania z zatłaczaniem w wariantcie B500. Odwiert Nosówka-1. Ciśnienie na spodzie odwiertu, wydajność zatłaczania.

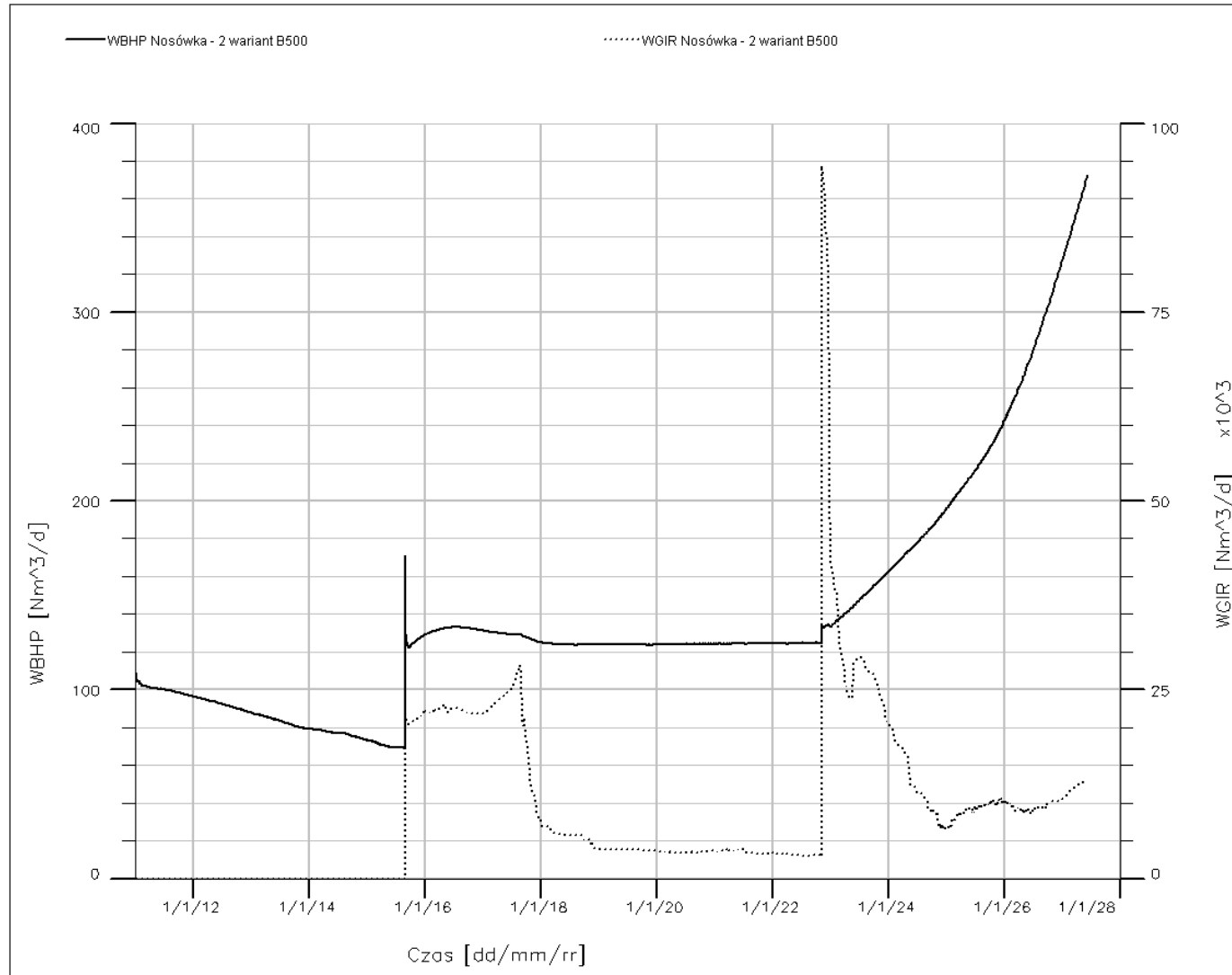


Fig.1.1.16_308 Złoże Nosówka. Prognoza wydobywania z zatlaczaniem w wariantcie B500. Odwiert Nosówka-2. Ciśnienie na spodzie odwiertu, wydajność zatlaczania.

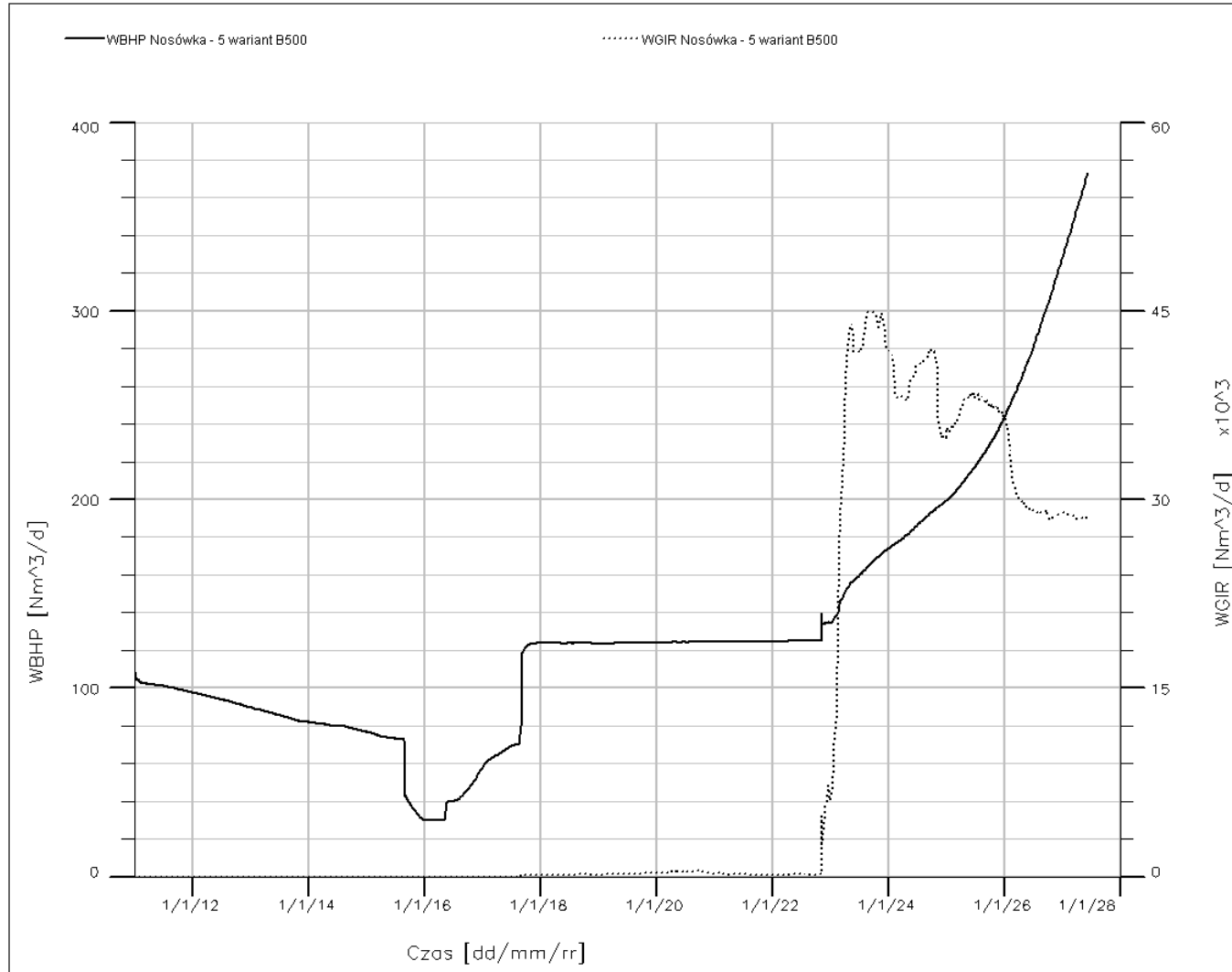


Fig.1.1.16_309 Złoże Nosówka. Prognoza wydobywania z zafłaczaniem w wariantcie B500. Odwiert Nosówka-5. Ciśnienie na spodzie odwiertu, wydajność zafłaczania.

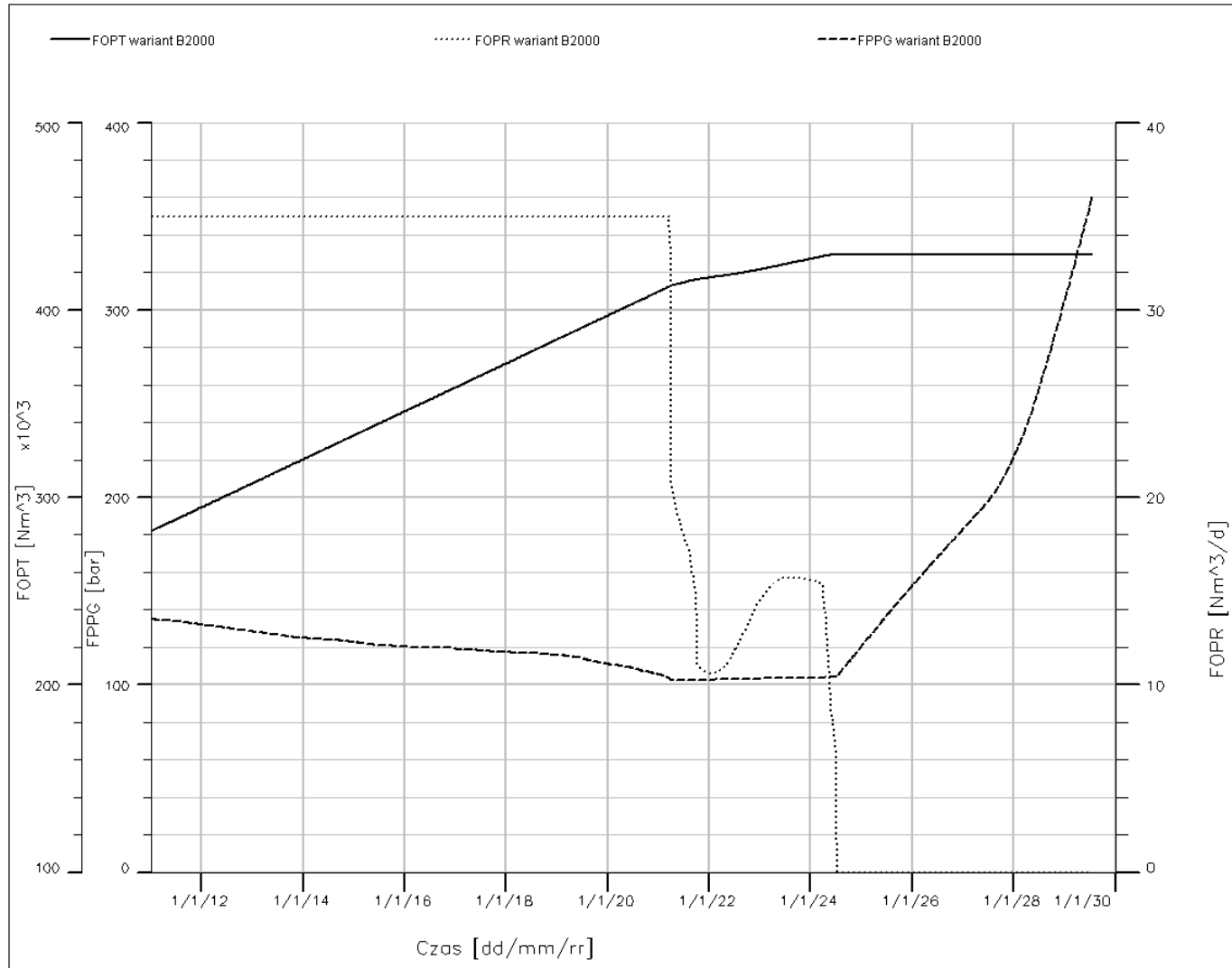


Fig.1.1.16_310 Złoże Nosówka. Prognoza wydobywania z zatłaczaniem w wariantcie B2000. Sumaryczne wydobywanie, wydajność wydobywania, średnie ciśnienie złożowe.

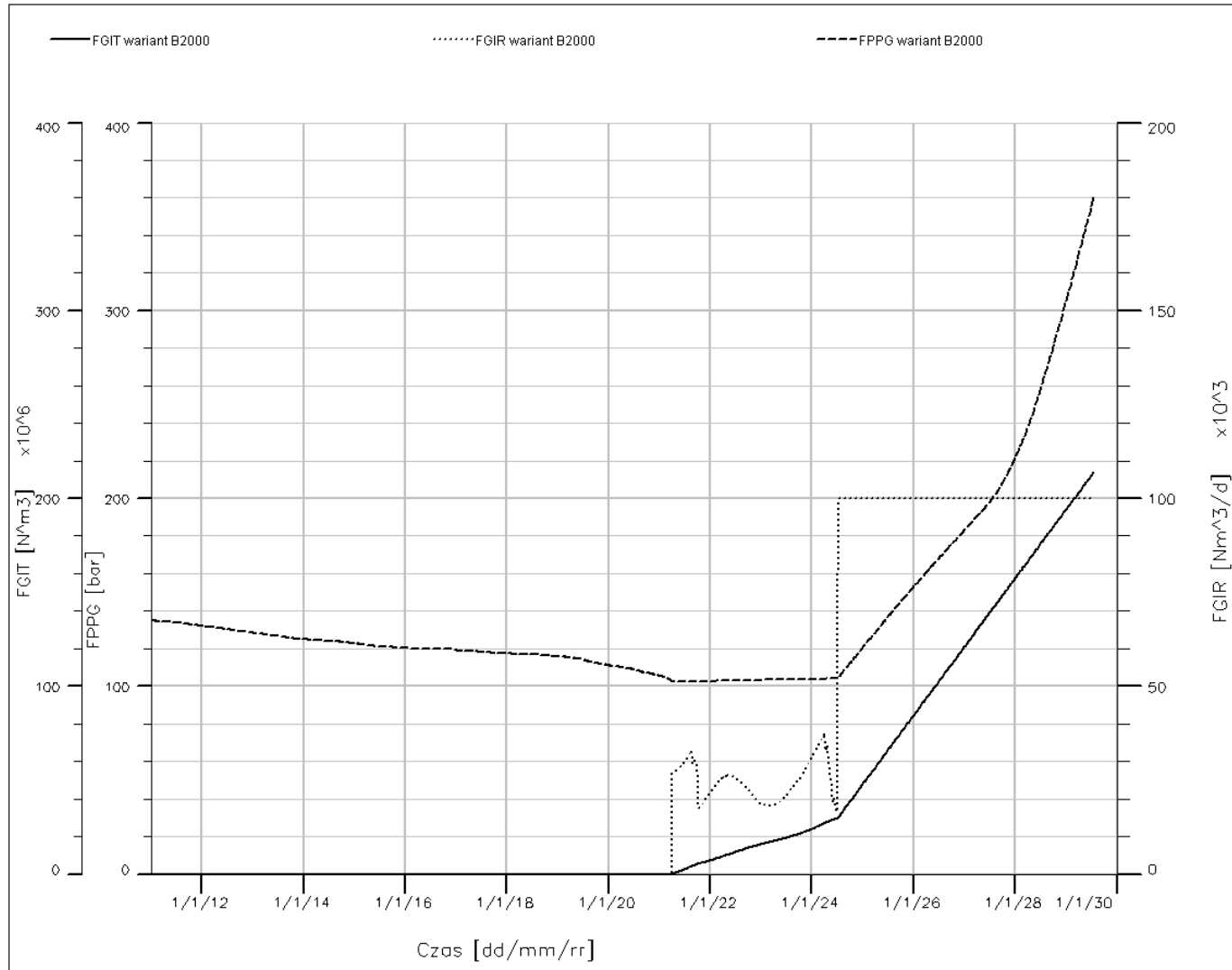


Fig.1.1.16_311 Złoże Nosówka. Prognoza wydobywania z zatlaczaniem w wariancie B2000. Zatlaczanie sumaryczne, wydajność zatlaczania, średnie ciśnienie złożowe.

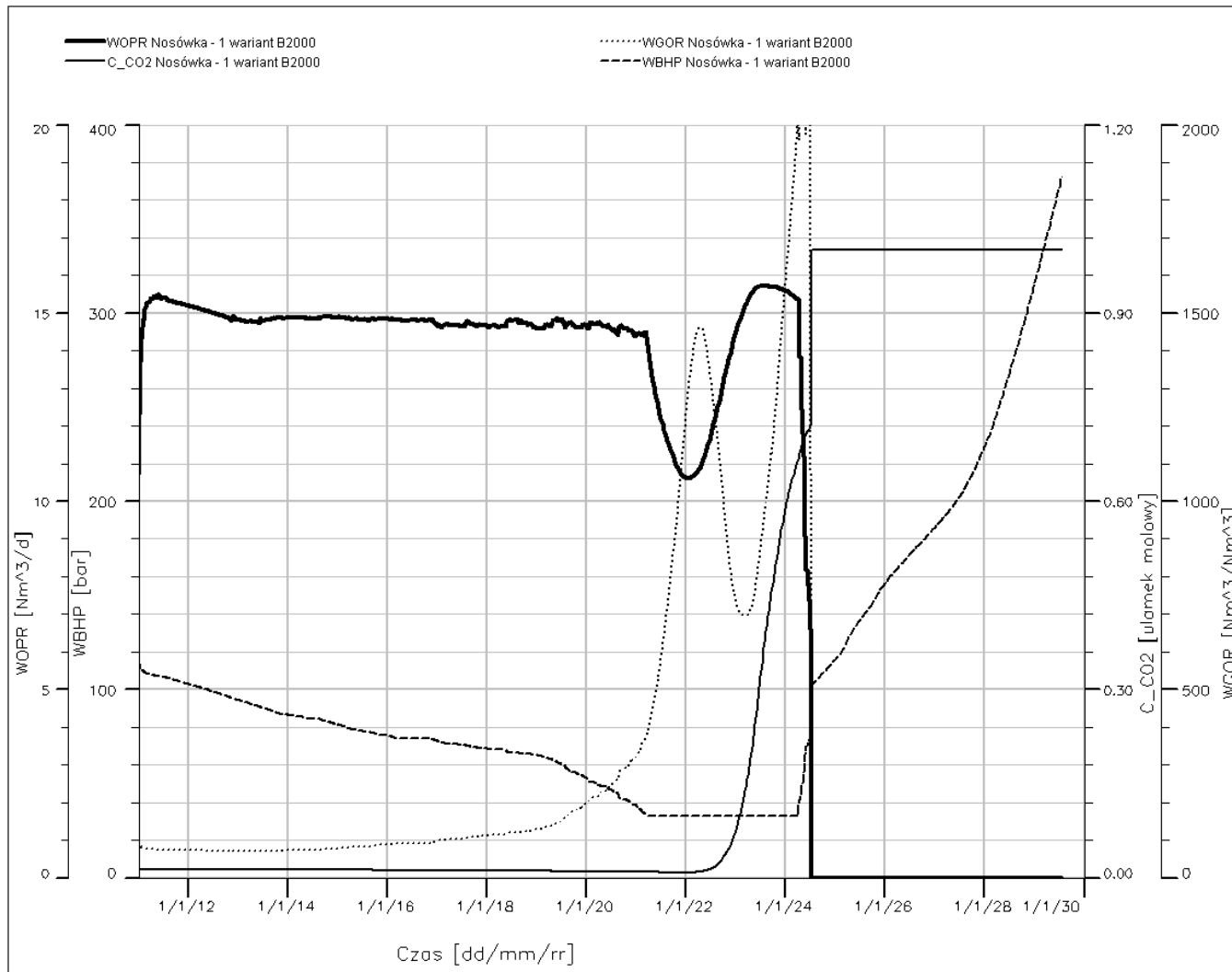


Fig.1.1.16_312 Złoże Nosówka. Prognoza wydobywania z zatlaczaniem w wariantcie B2000. Odwiert Nosówka-1. Wydajność wydobywania, wykładnik gazowy, ciśnienie na spodzie odwiertu, ułamek molowy CO₂.

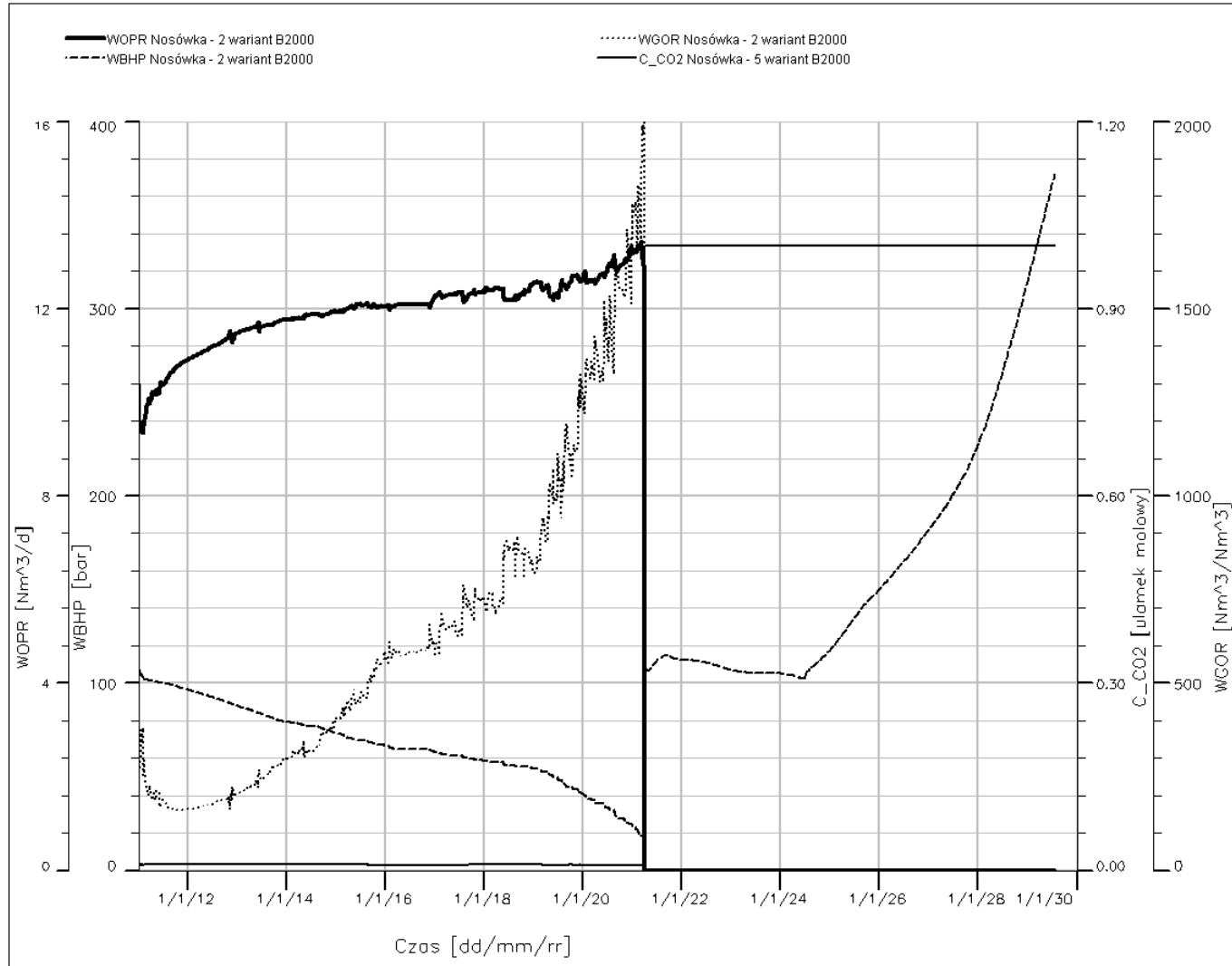


Fig.1.1.16_313 Złoże Nosówka. Prognoza wydobywania z zatlaczaniem w wariantcie B2000. Odwiert Nosówka-2. Wydajność wydobywania, wykładnik gazowy, ciśnienie na spodzie odwiertu, ułamek molowy CO₂.

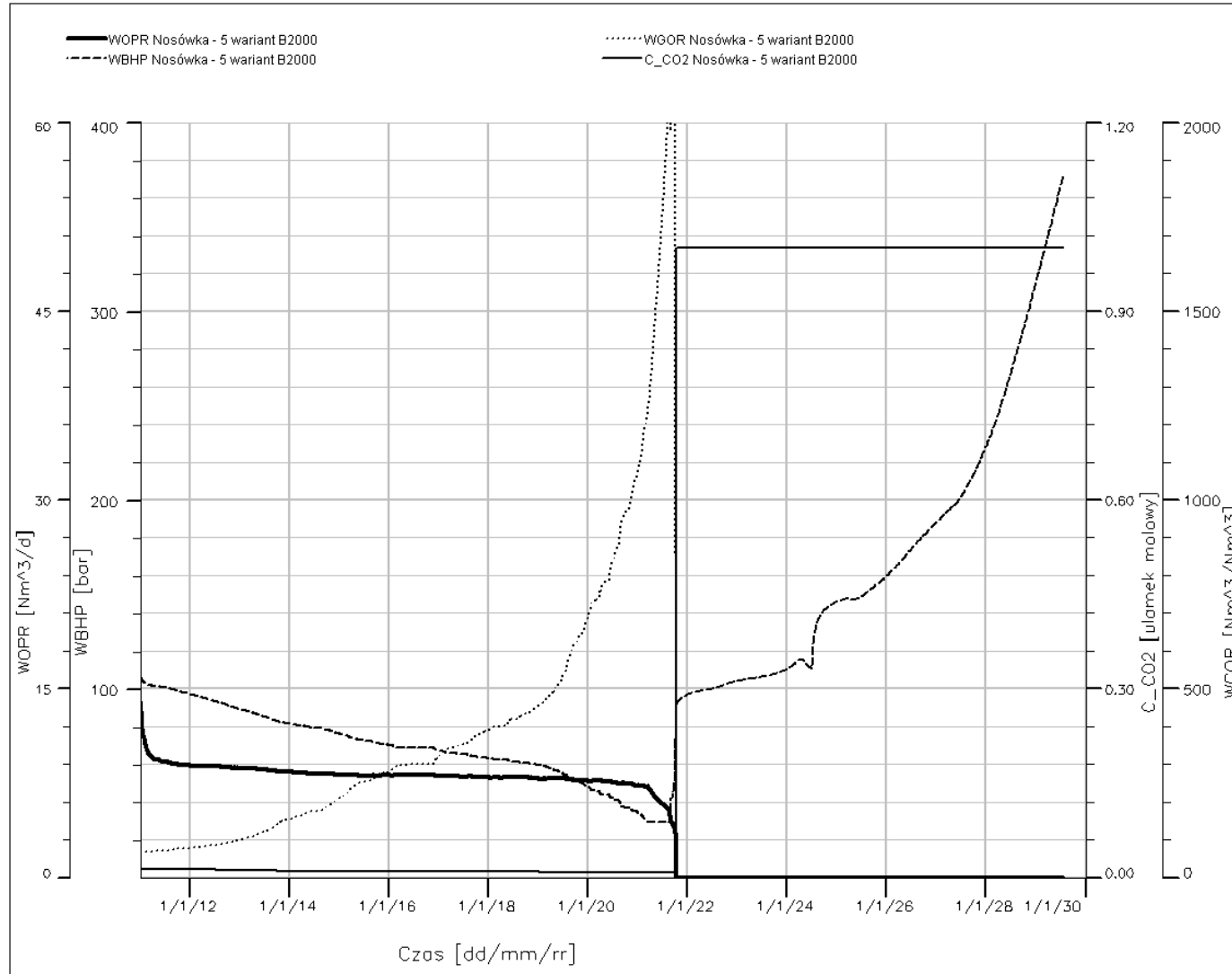


Fig.1.1.16_314 Złoże Nosówka. Prognoza wydobywania z zatlaczaniem w wariantcie B2000. Odwiert Nosówka-5. Wydajność wydobywania, wykładnik gazowy, ciśnienie na spodzie odwiertu, ułamek molowy CO₂.

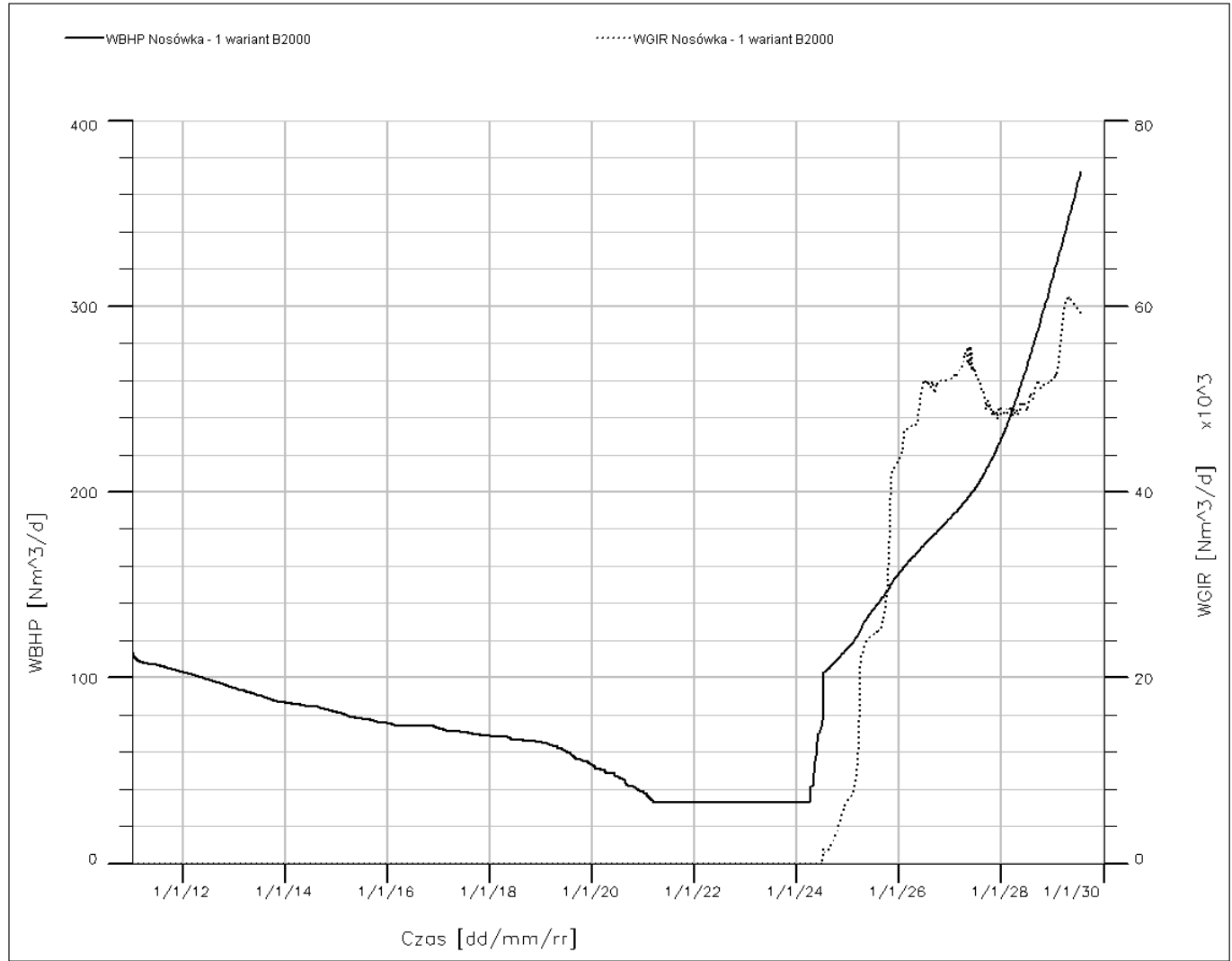


Fig.1.1.16_315 Złoże Nosówka. Prognoza wydobywania z zatlaczaniem w wariancie B2000. Odwiert Nosówka-1. Ciśnienie na spodzie odwiertu, wydajność zatlaczania.

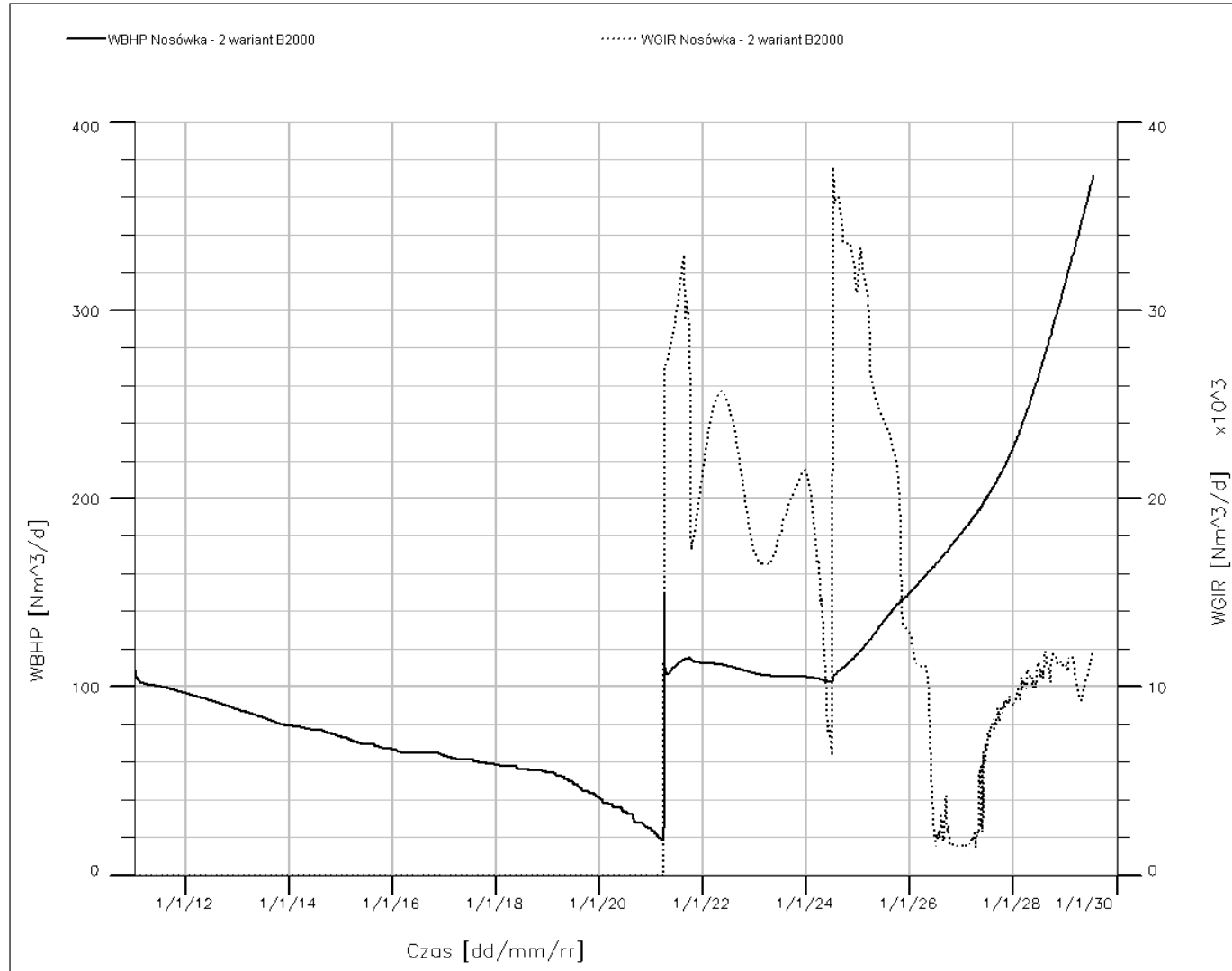


Fig.1.1.16_316 Złoże Nosówka. Prognoza wydobywania z zatlaczaniem w wariantcie B2000. Odwiert Nosówka-2. Ciśnienie na spodzie odwiertu, wydajność zatlaczania.

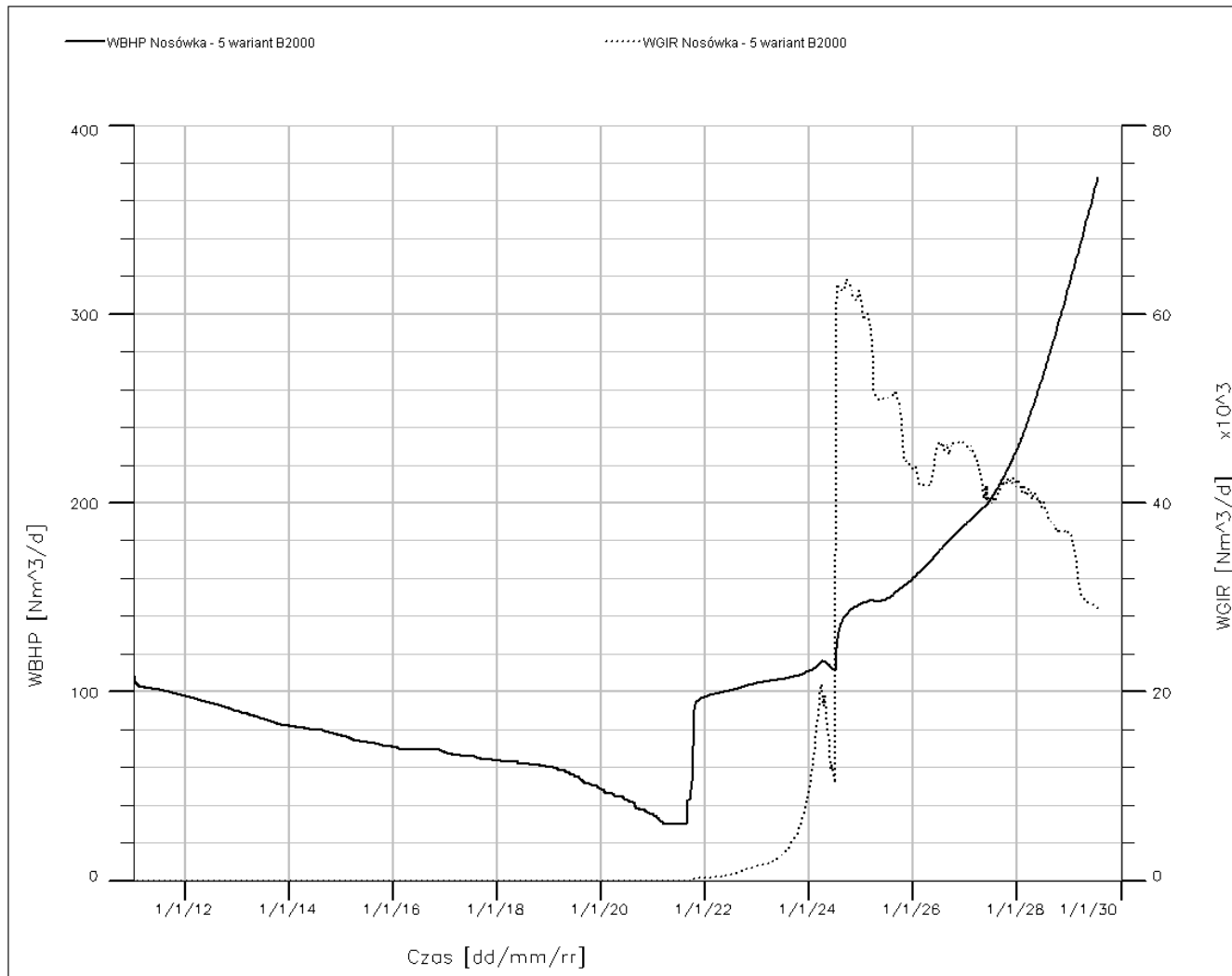


Fig.1.1.16_317 Złoże Nosówka. Prognoza wydobywania z zatlaczaniem w wariantcie B2000. Odwiert Nosówka-2.Ciśnienie na spodzie odwiertu, wydajność zatlaczania.

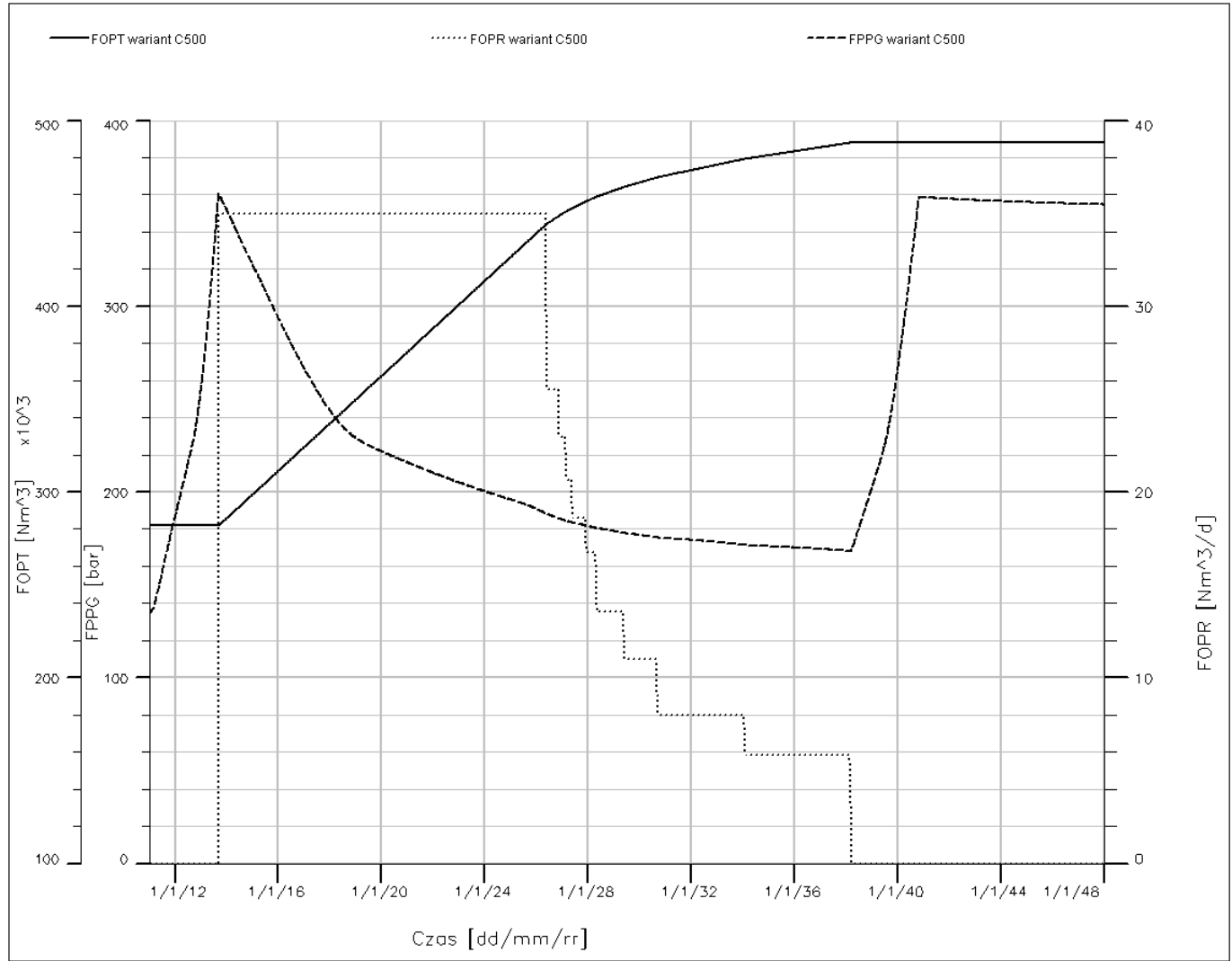


Fig.1.1.16_318 Złoże Nosówka. Prognoza wydobywania z zatlaczaniem w wariantcie C500. Sumaryczne wydobywanie, wydajność wydobywania, średnie ciśnienie złożowe.

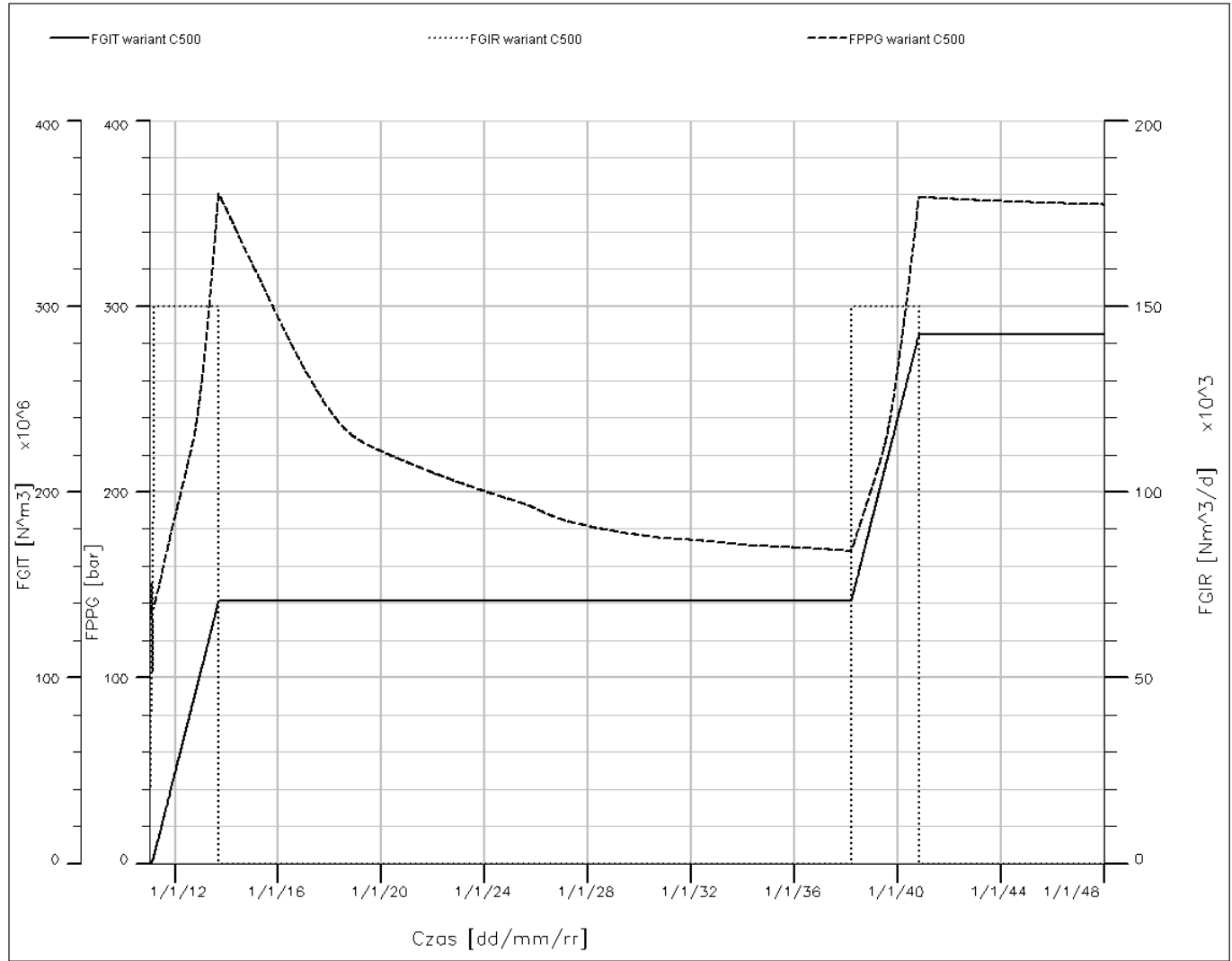


Fig.1.1.16_319 Złoże Nosówka. Prognoza wydobywania z zatlaczaniem w wariantcie C500. Zatlaczanie sumaryczne, wydajność zatlaczania, średnie ciśnienie złożowe.

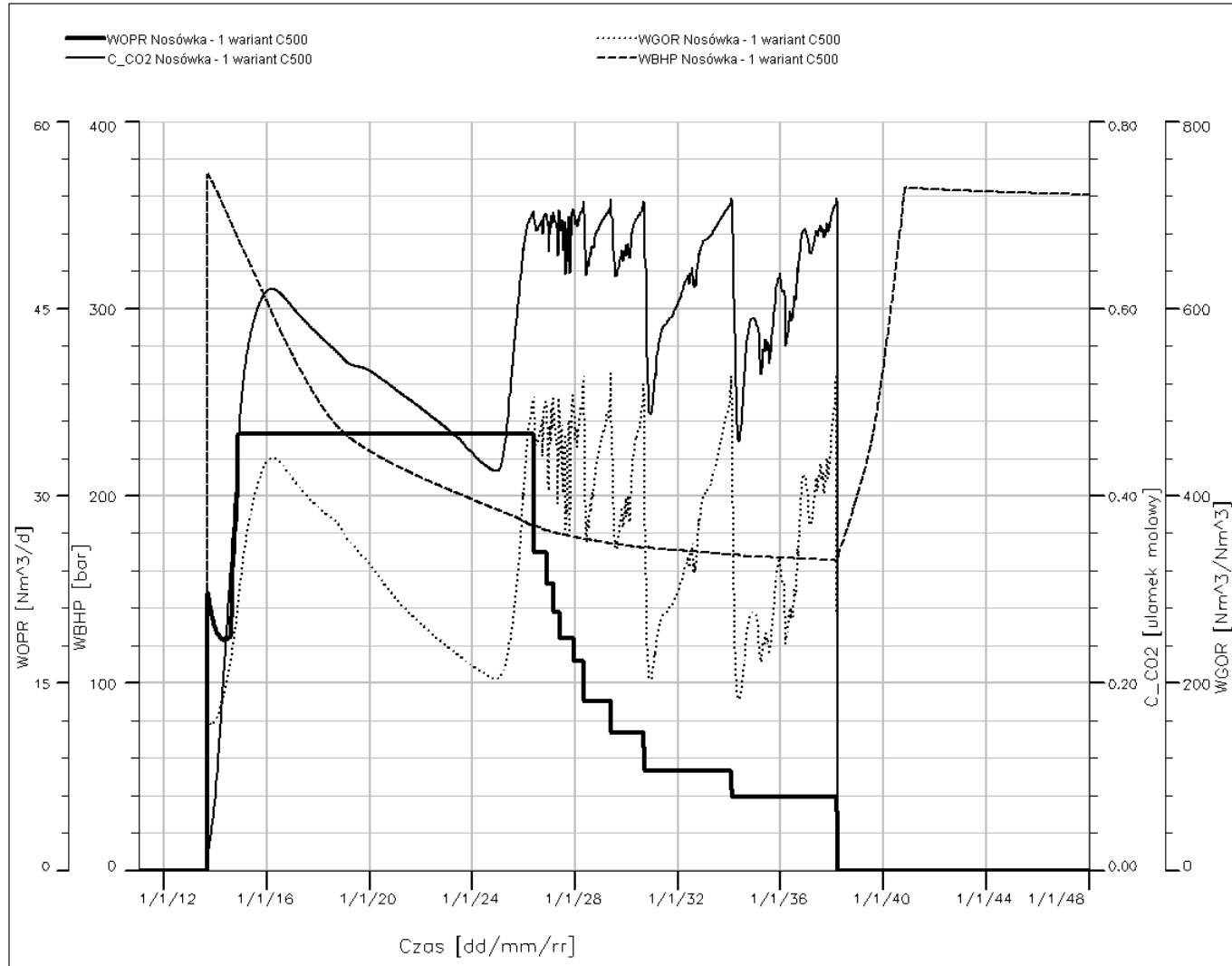


Fig.1.1.16_320 Złoże Nosówka. Prognoza wydobywania z zatlaczaniem w wariantcie C500. Odwiert Nosówka-1. Wydajność wydobywania, wykładnik gazowy, ciśnienie na spodzie odwiertu, ułamek molowy CO₂.

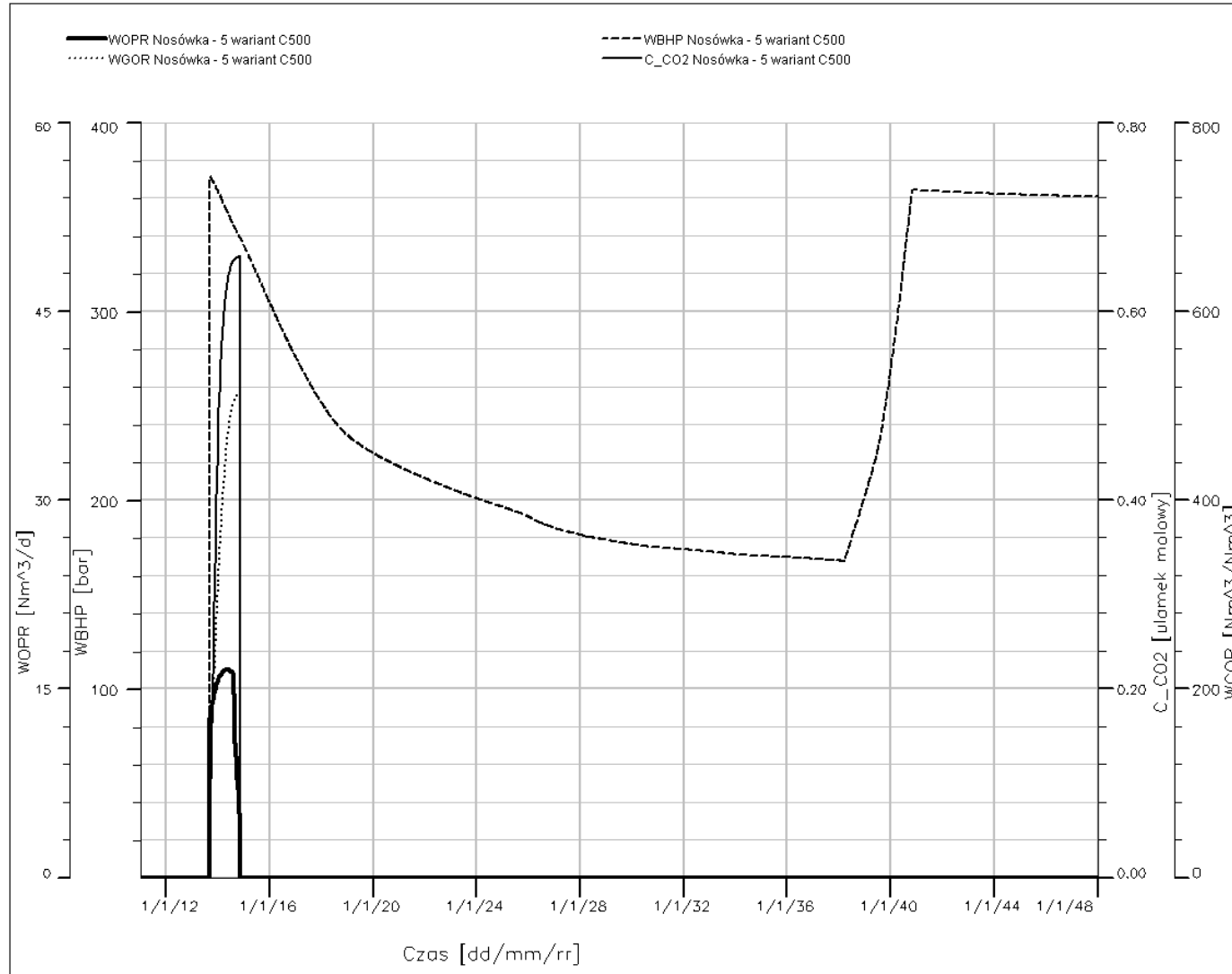


Fig.1.1.16_321 Złoże Nosówka. Prognoza wydobywania z zatlaczaniem w wariantcie C500. Odwiert Nosówka-5. Wydajność wydobywania, wykładnik gazowy, ciśnienie na spodzie odwiertu, ułamek molowy CO₂.

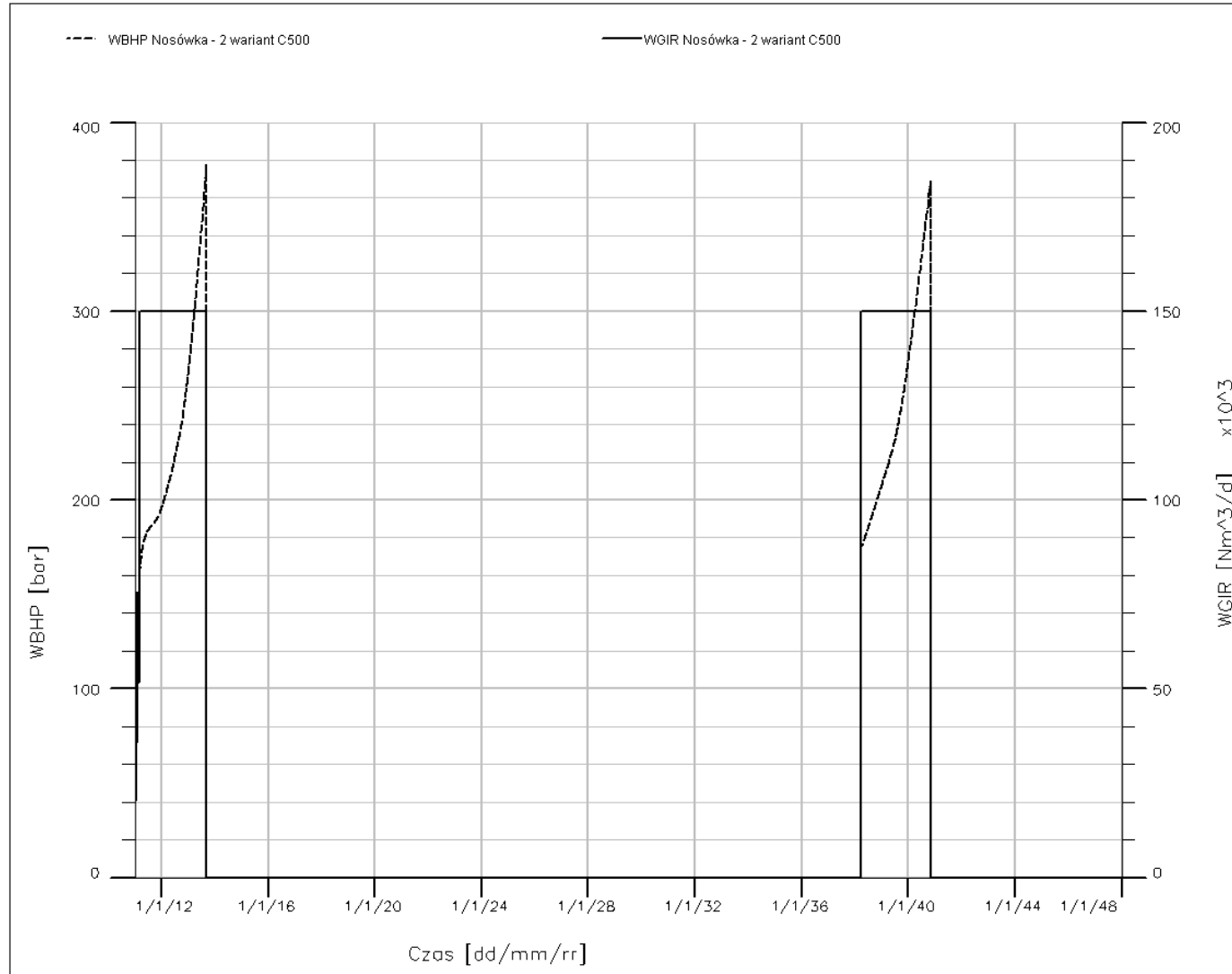


Fig.1.1.16_322 Złoże Nosówka. Prognoza wydobywania z zatlaczaniem w wariantcie C500. Odwiert Nosówka-2. Ciśnienie na spodzie odwiertu, wydajność zatlaczania.

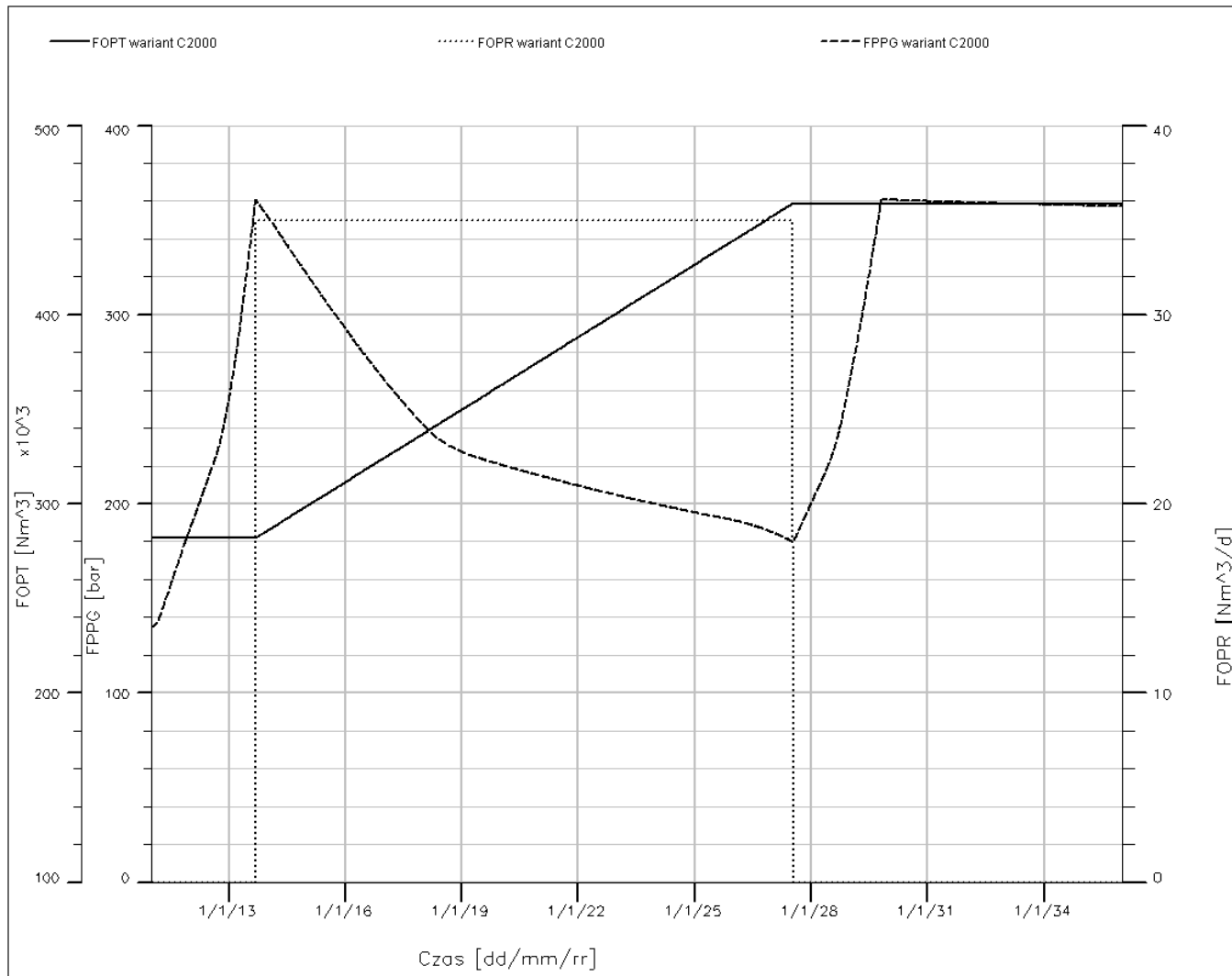


Fig.1.1.16_323 Złoże Nosówka. Prognoza wydobywania z zatlaczaniem w wariantcie C2000. umaryczne wydobywanie, wydajność wydobywania, średnie ciśnienie złożowe.

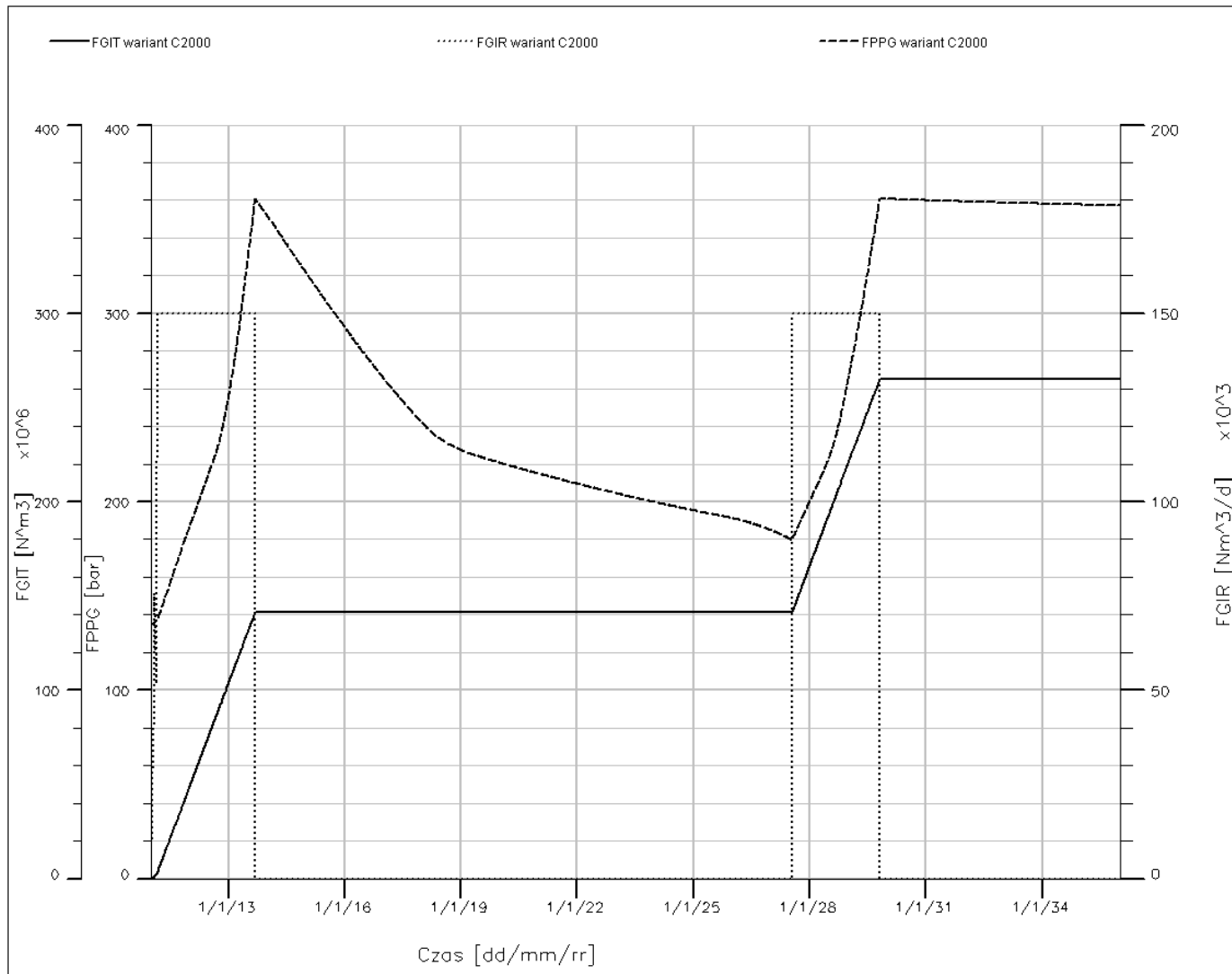


Fig.1.1.16_324 Złoże Nosówka. Prognoza wydobywania z zafłaczaniem w wariantcie C2000. Zafłaczanie sumaryczne, wydajność zafłaczania, średnie ciśnienie złożowe.

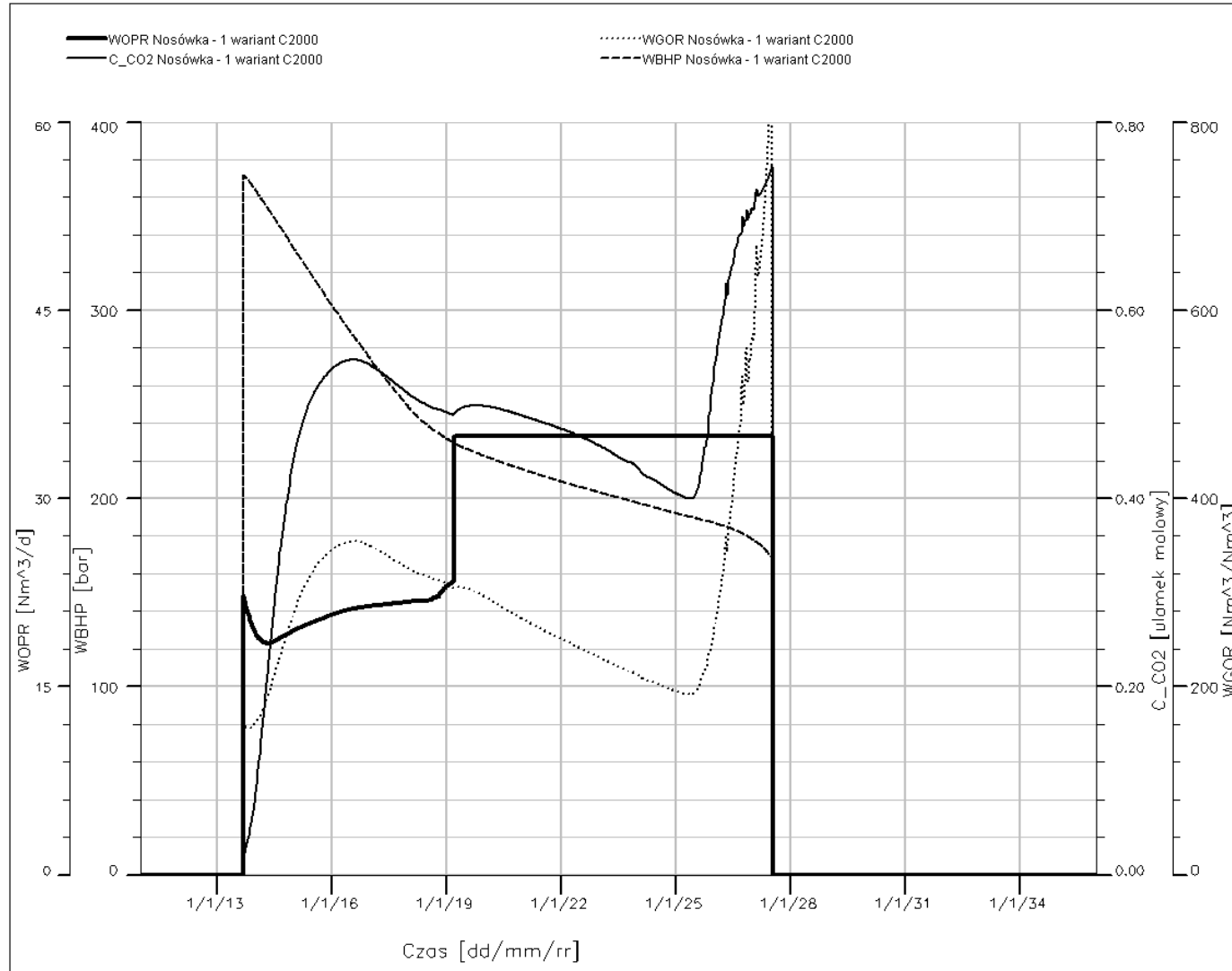


Fig.1.1.16_325 Złoże Nosówka. Prognoza wydobywania z zatlaczaniem w wariantcie C2000. Odwiert Nosówka-1. Wydajność wydobywania, wykładnik gazowy, ciśnienie na spodzie odwiertu, ułamek molowy CO₂.

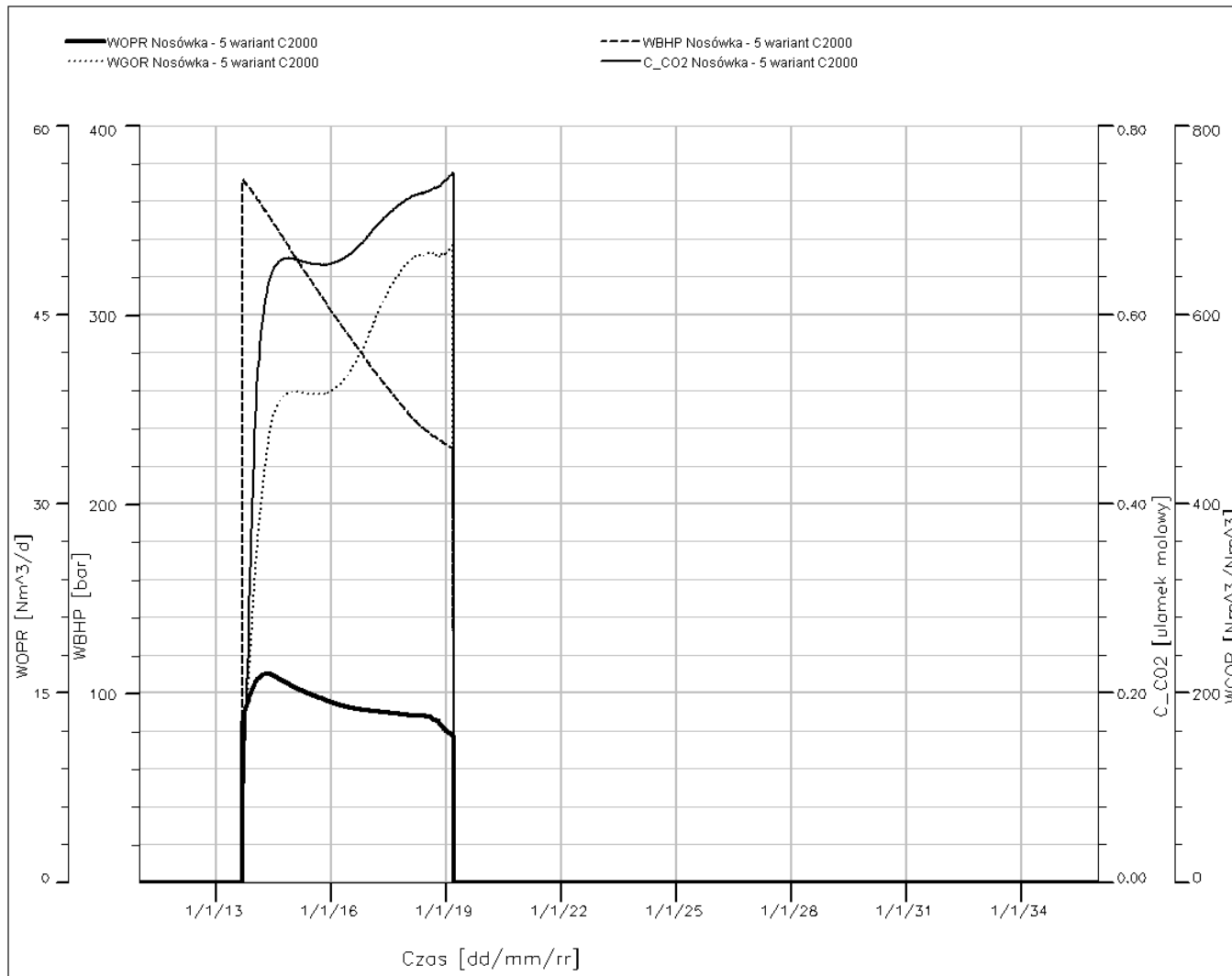


Fig.1.1.16_326 Złoże Nosówka. Prognoza wydobywania z zatafczaniem w wariantcie C500. Odwiert Nosówka-5. Wydajność wydobywania, wykładnik gazowy, ciśnienie na spodzie odwiertu, ułamek molowy CO₂.

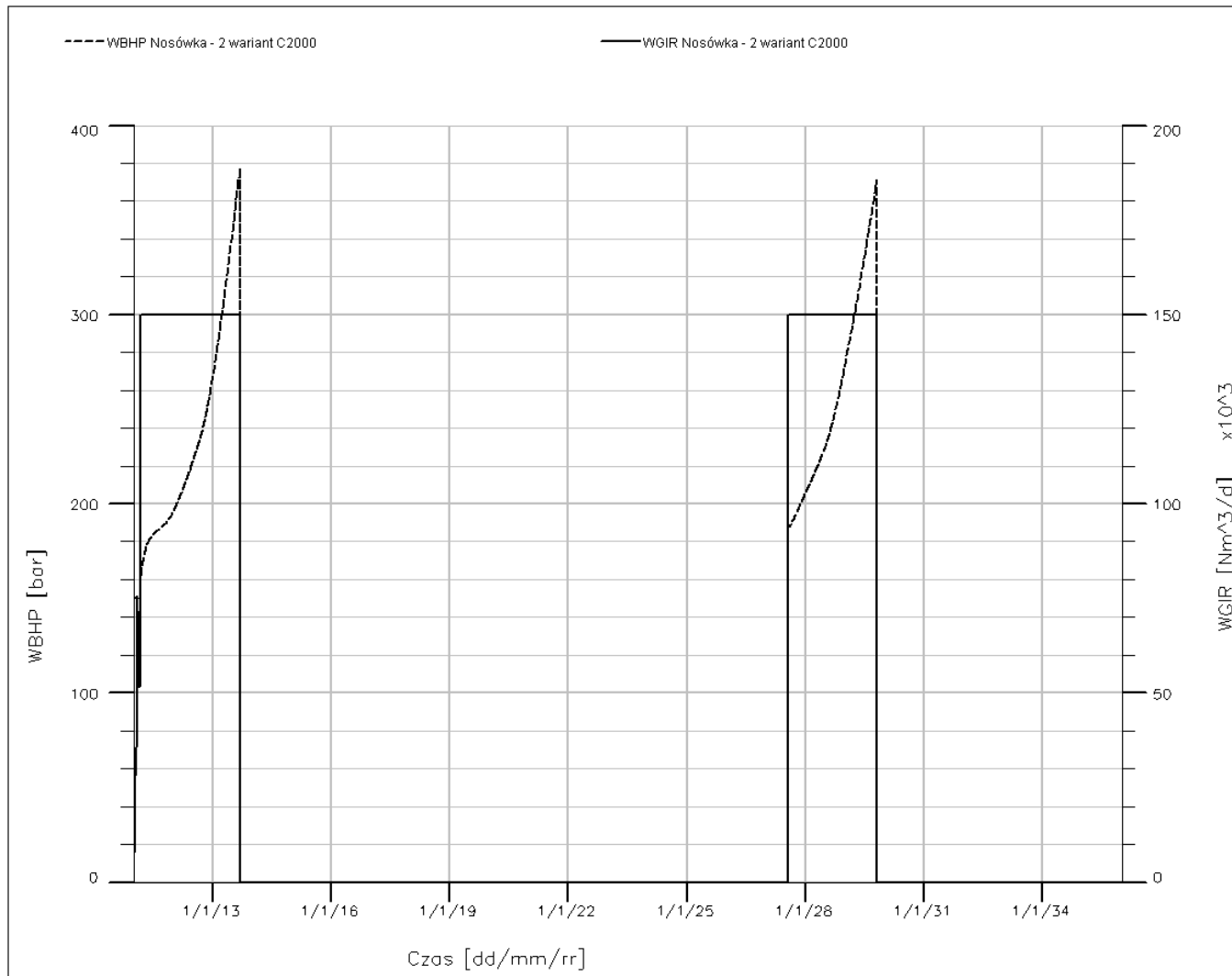


Fig.1.1.16_327 Złoże Nosówka. Prognoza wydobywania z zatłaczaniem w wariantcie C2000. Odwiert Nosówka-2. Ciśnienie na spodzie odwiertu, wydajność zatłaczania.

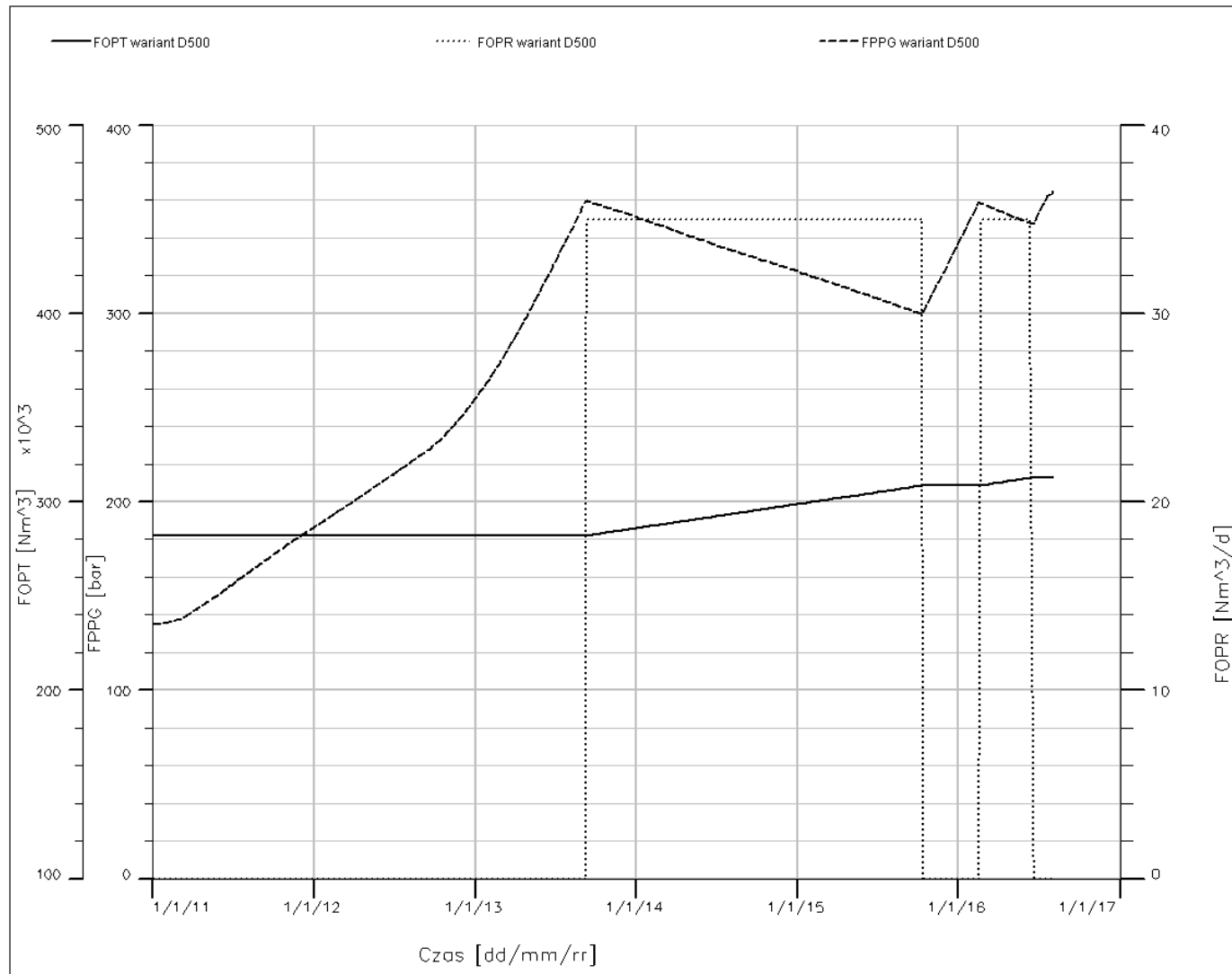


Fig.1.1.16_328 Złoże Nosówka. Prognoza wydobywania z zatlaczaniem w wariantcie D500. Sumaryczne wydobywanie, wydajność wydobywania, średnie ciśnienie złożowe.

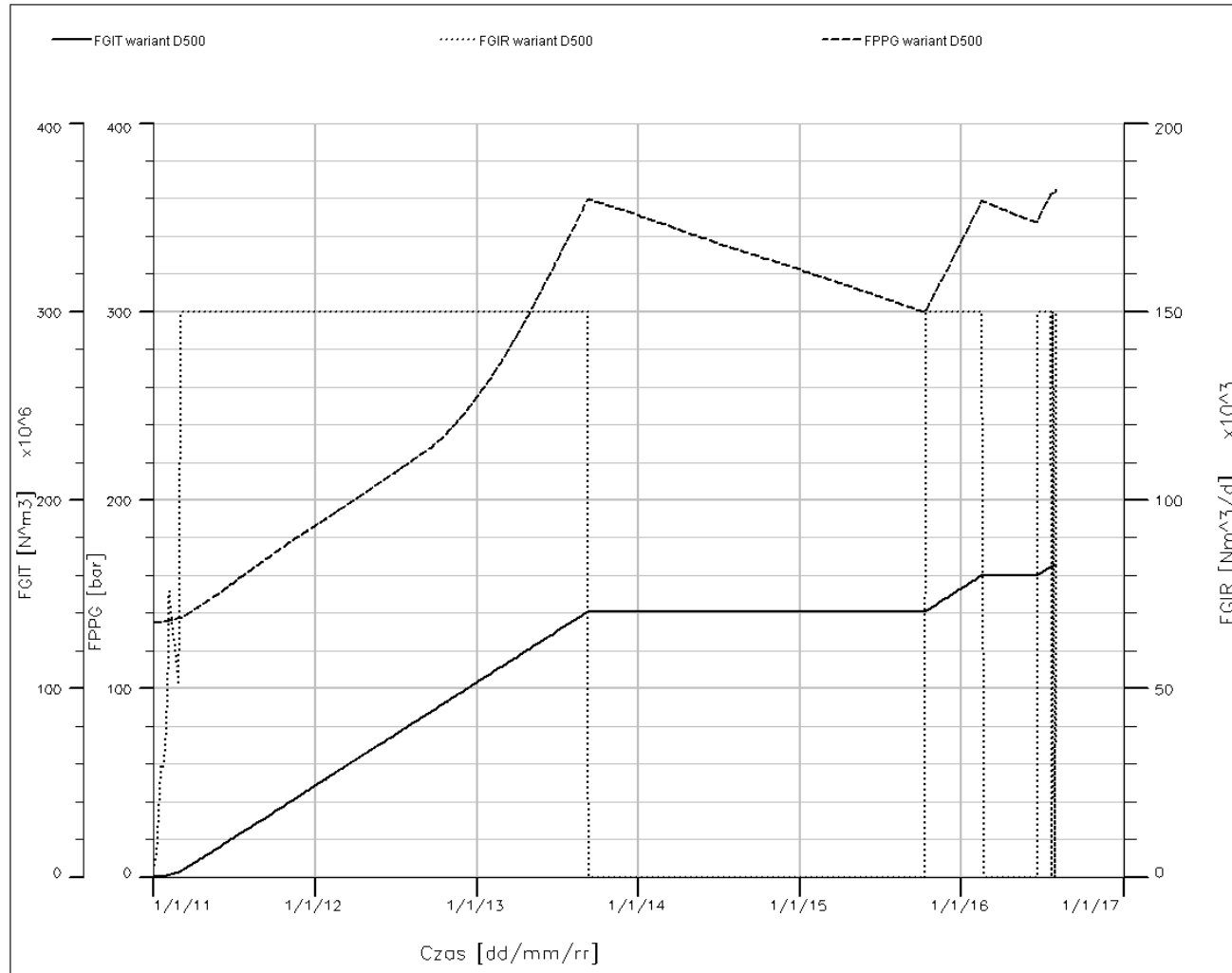


Fig.1.1.16_329 Złoże Nosówka. Prognoza wydobywania z zatłaczaniem w wariantcie D500. Zatłaczanie sumaryczne, wydajność zatłaczania, średnie ciśnienie złożowe.

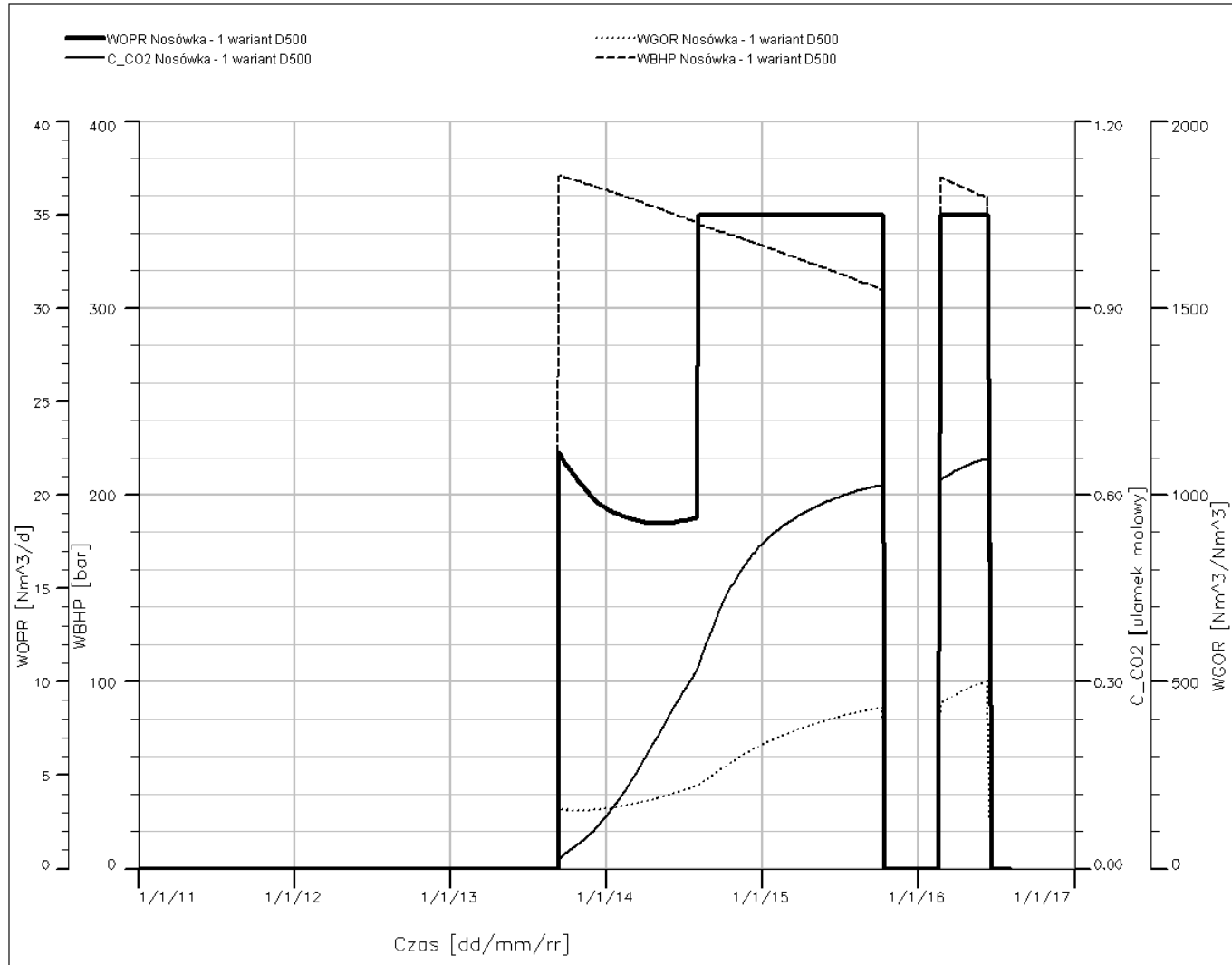


Fig.1.1.16_330 Złoże Nosówka. Prognoza wydobywania z zatłaczaniem w wariantcie D500. Odwiert Nosówka-1. Wydajność wydobywania, wykładnik gazowy, ciśnienie na spodzie odwiertu, ułamek molowy CO₂.

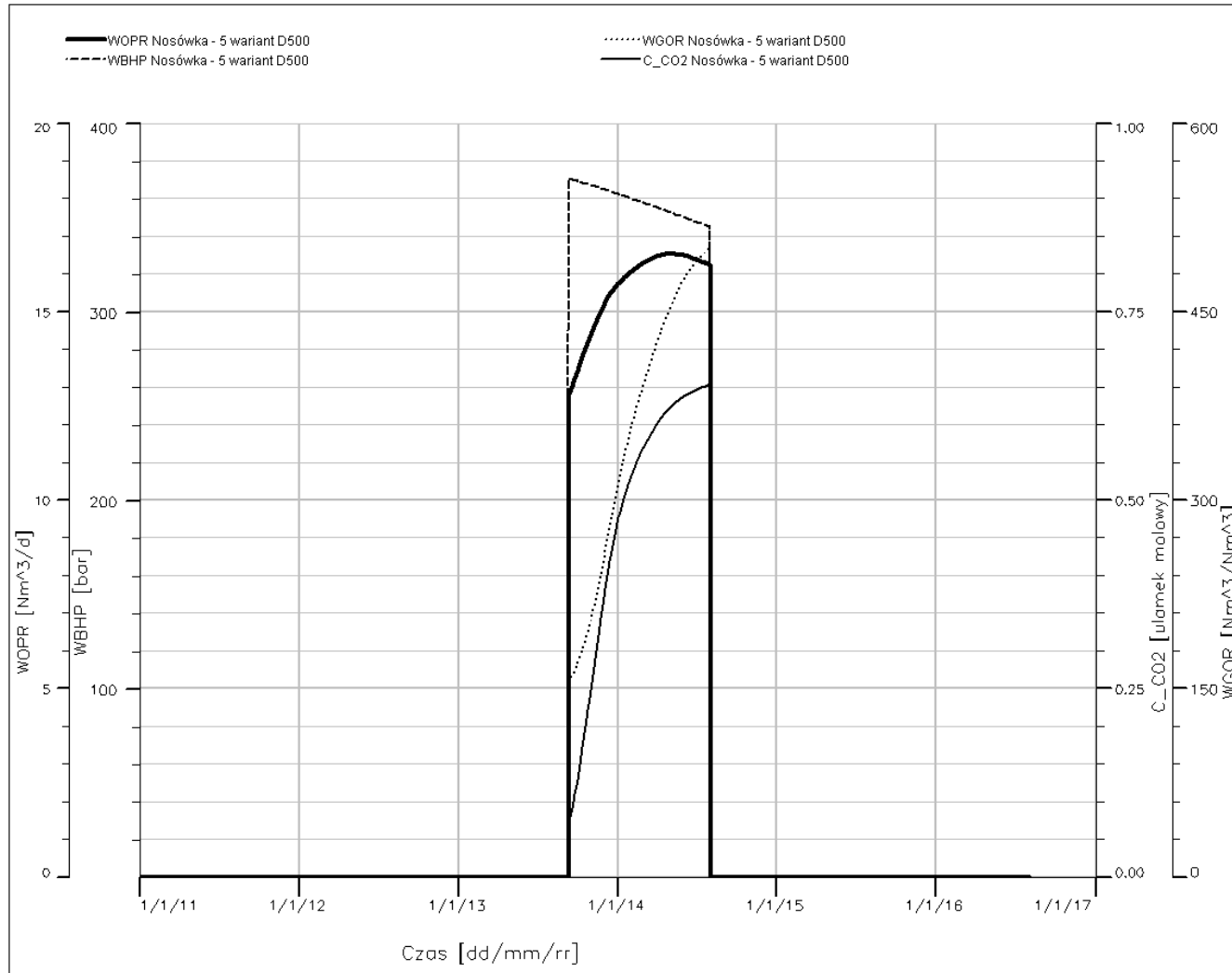


Fig.1.1.16_331 Złoże Nosówka. Prognoza wydobywania z zatlaczaniem w wariantcie D500. Odwiert Nosówka-1. Wydajność wydobywania, wykładnik gazowy, ciśnienie na spodzie odwiertu, ułamek molowy CO₂.

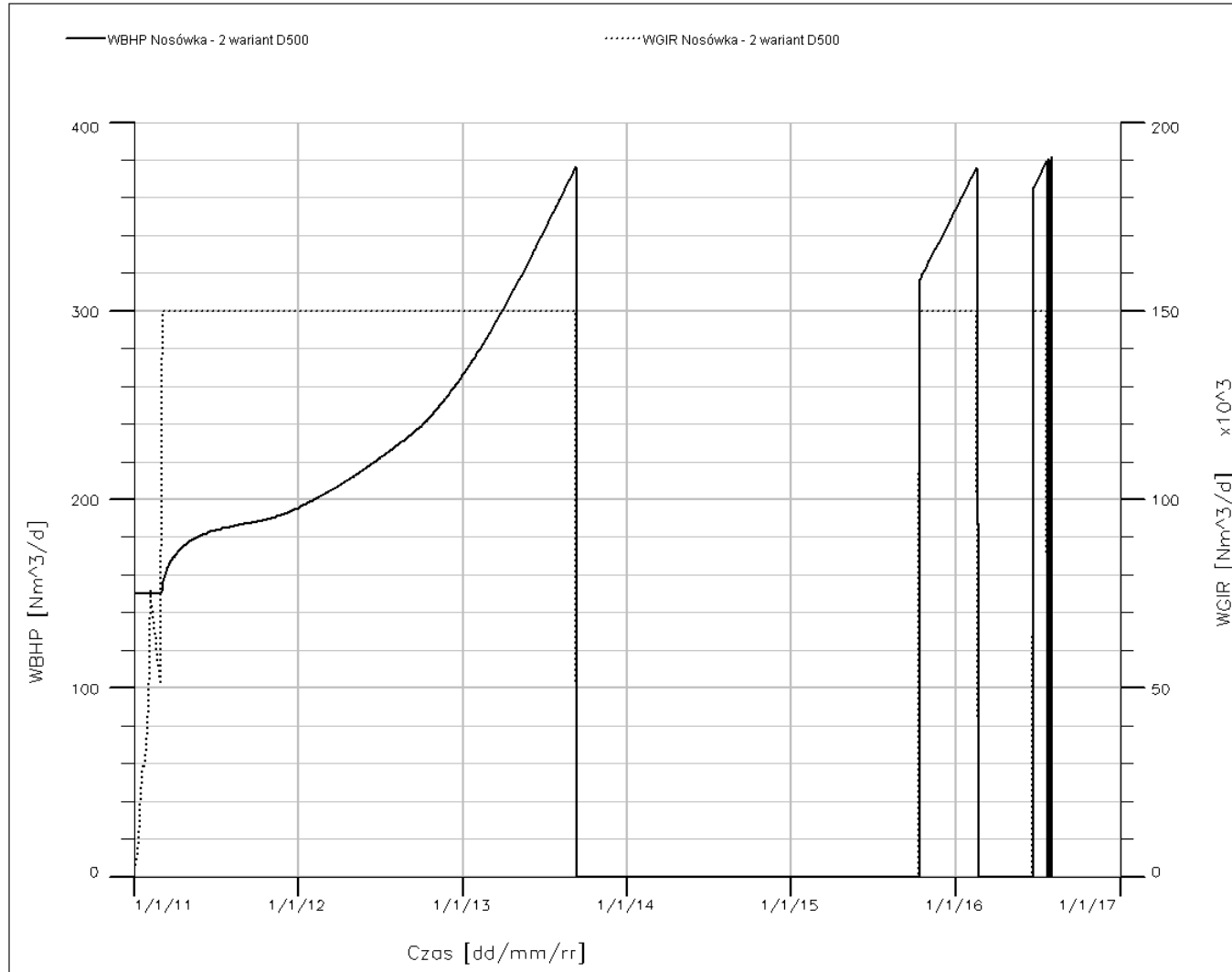


Fig.1.1.16_332 Złoże Nosówka. Prognoza wydobywania z zatłaczaniem w wariantcie D500. Odwiert Nosówka-2. Ciśnienie na spodzie odwiertu, wydajność zatłaczania.

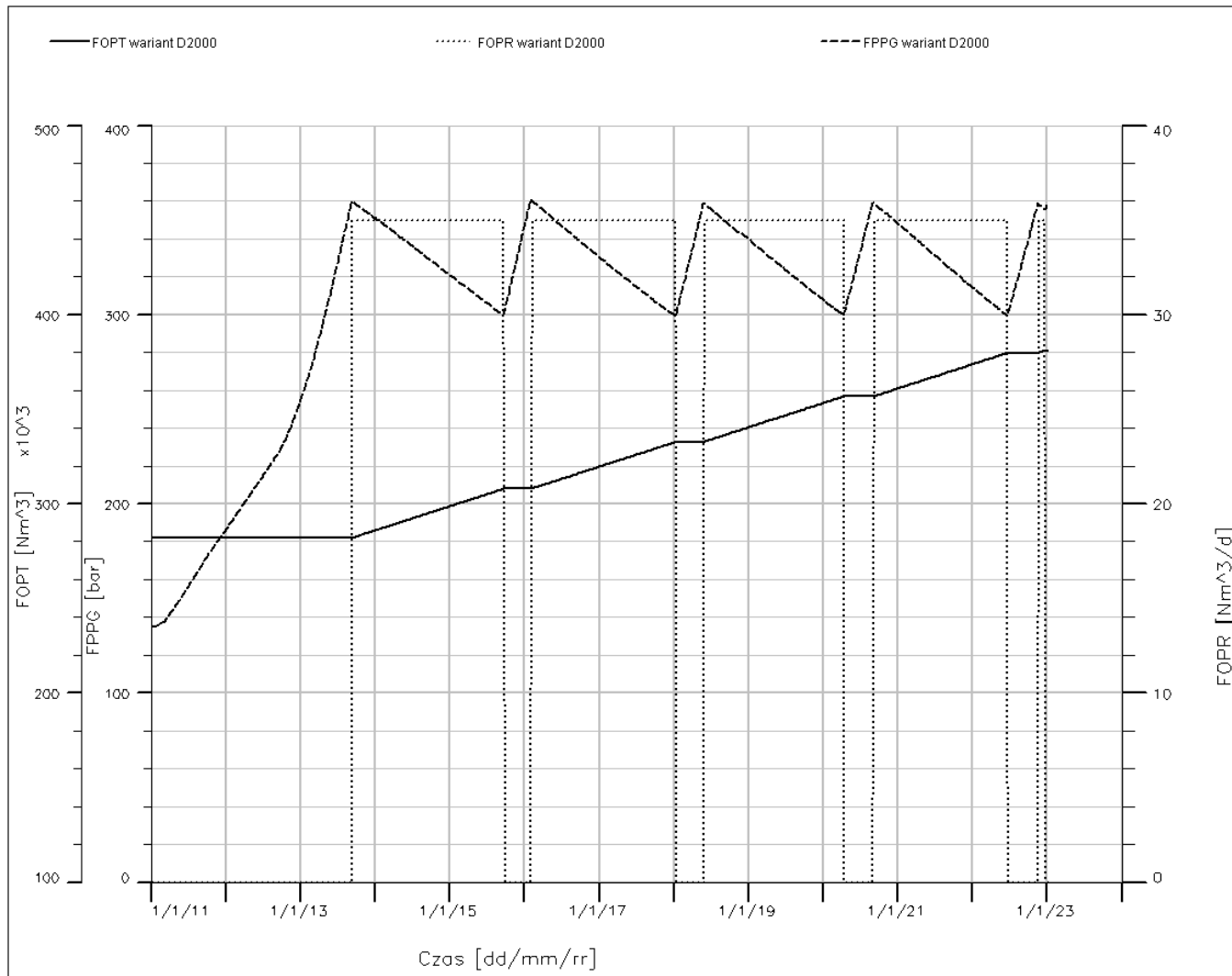


Fig.1.1.16_333 Złoże Nosówka. Prognoza wydobywania z zatłaczaniem w wariantcie D2000. Sumaryczne wydobywanie, wydajność wydobywania, średnie ciśnienie złożowe.

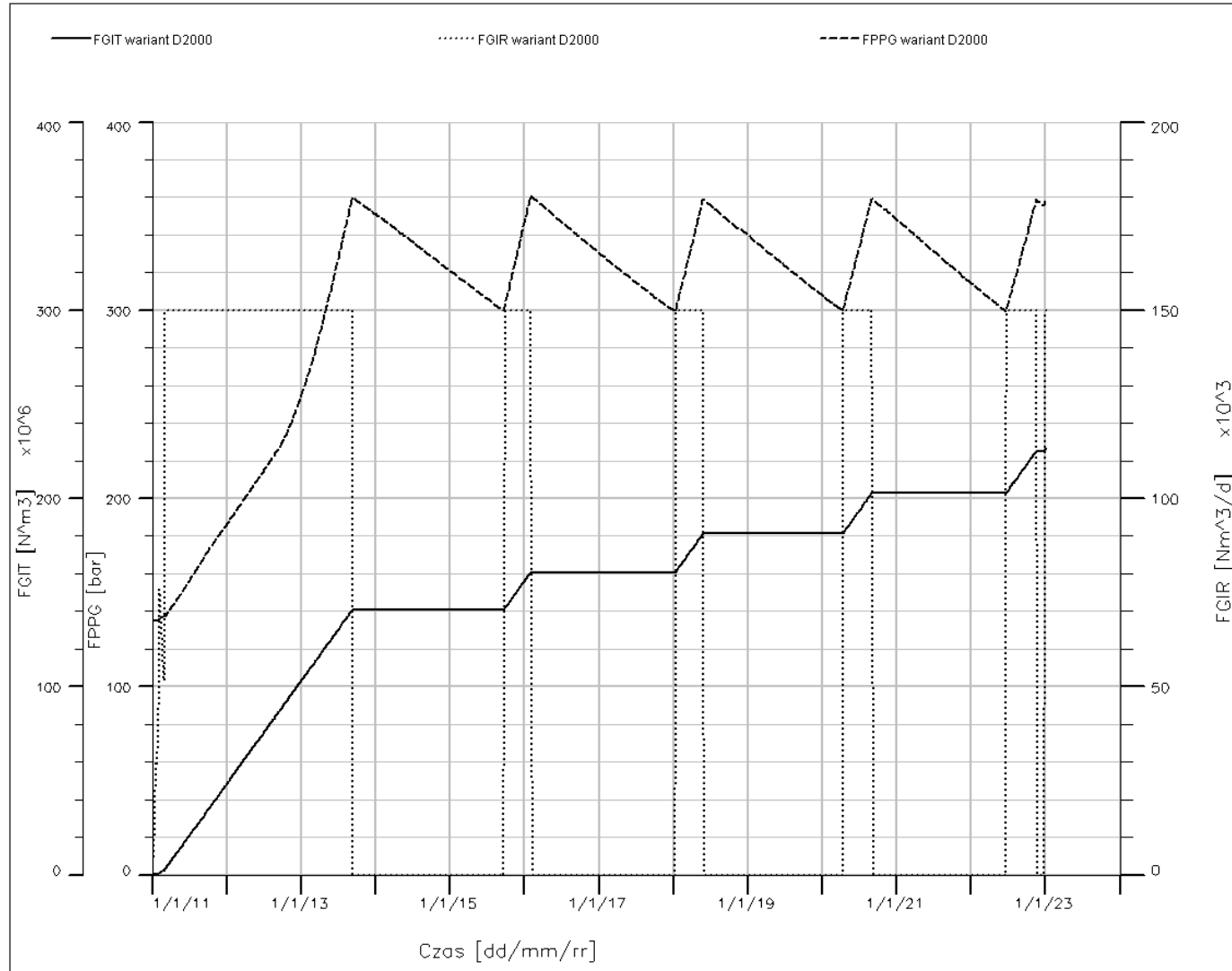


Fig.1.1.16_334 Złoże Nosówka. Prognoza wydobywania z zatlaczaniem w wariantcie D2000. Zatlaczanie sumaryczne, wydajność zatlaczania, średnie ciśnienie złożowe.

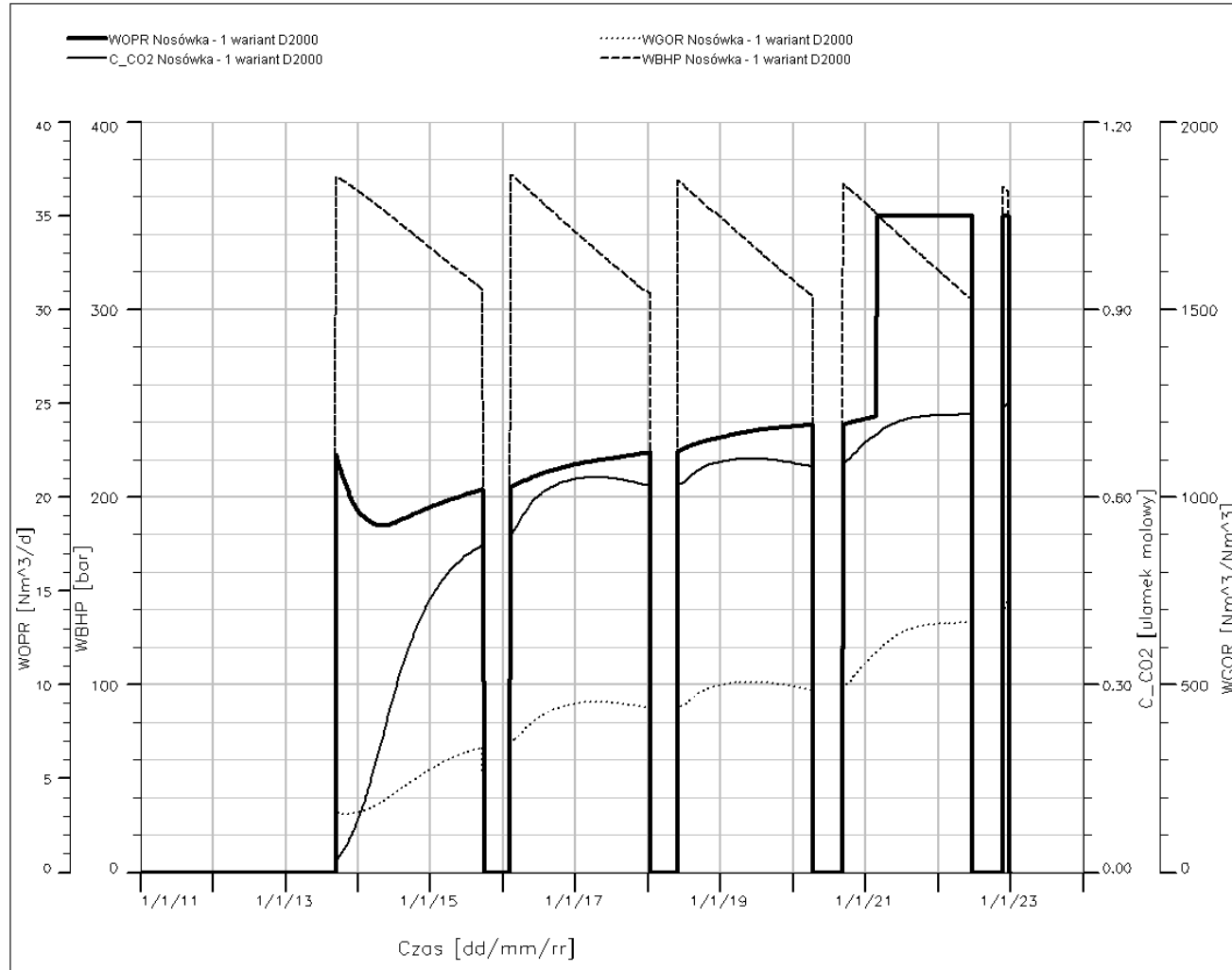


Fig.1.1.16_335 Złoże Nosówka. Prognoza wydobywania z zatłaczaniem w wariantcie D2000. Odwiert Nosówka-1. Wydajność wydobywania, wykładnik gazowy, ciśnienie na spodzie odwiertu, ułamek molowy CO₂.

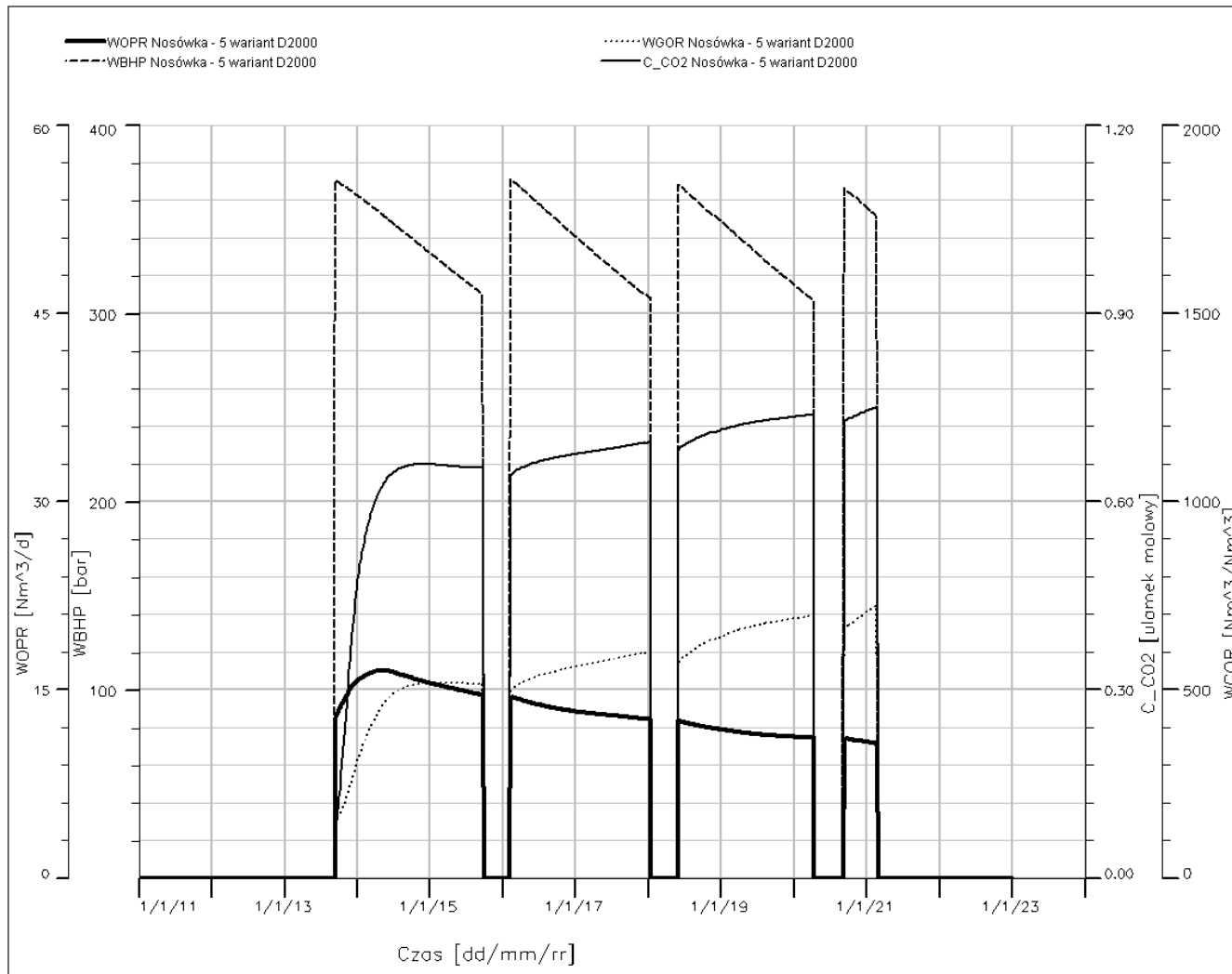


Fig.1.1.16_336 Złoże Nosówka. Prognoza wydobywania z zatłaczaniem w wariantcie D2000. Odwiert Nosówka-5. Wydajność wydobywania, wykładnik gazowy, ciśnienie na spodzie odwiertu, ułamek molowy CO₂.

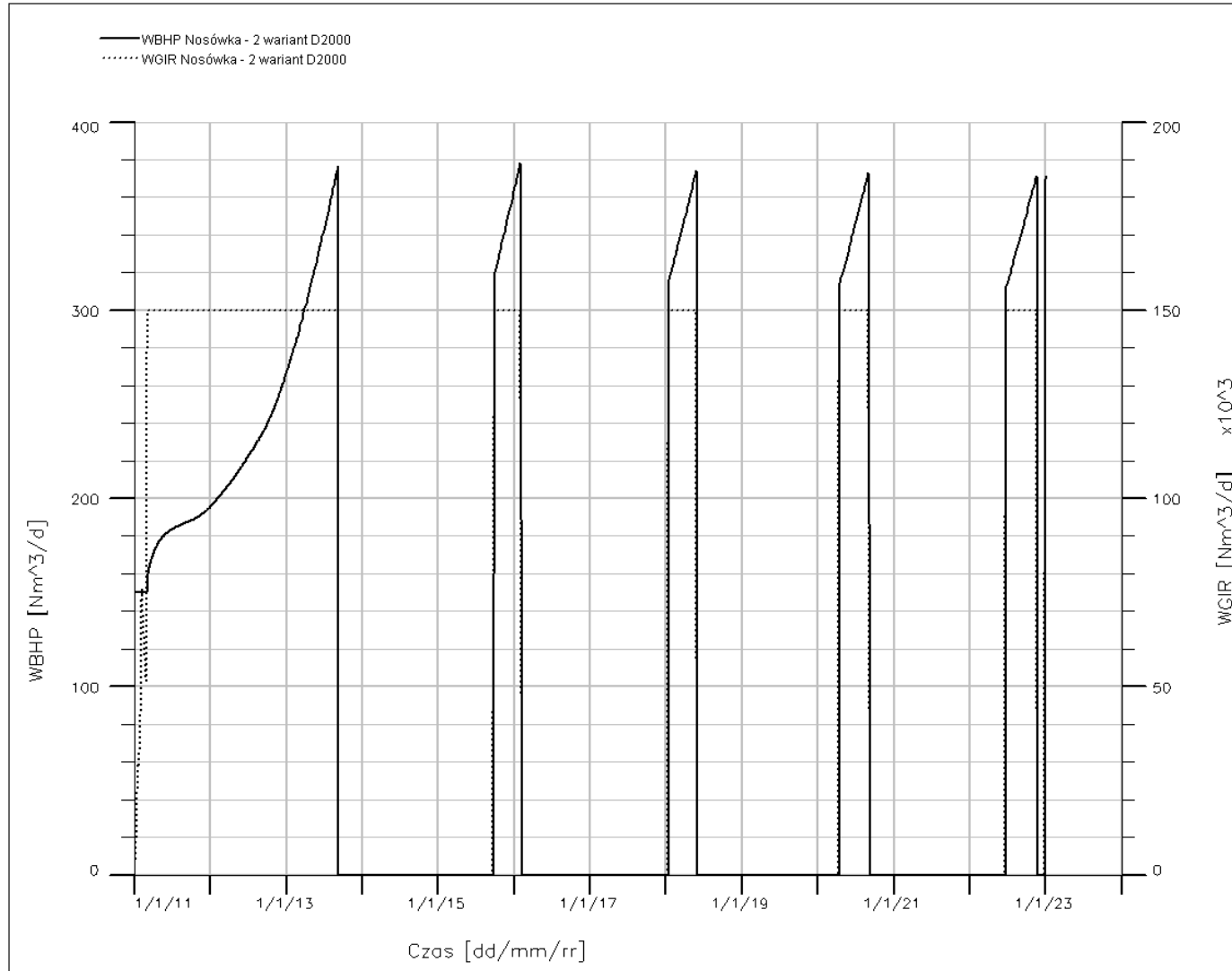


Fig.1.1.16_337 Złoże Nosówka. Prognoza wydobywania z zatlaczaniem w wariantcie D2000. Odwiert Nosówka-2. Ciśnienie na spodzie odwiertu, wydajność zatlaczania.

Podsumowanie i wnioski

W pracy skonstruowano dynamiczny model symulacyjny złoża Nosówka w utworach wizenu w celu zweryfikowania możliwości składowania CO₂ przy równoczesnej dalszej eksploatacji złoża. W tym celu:

- Dokonano implementacji statycznego modelu geologicznego struktury. Informacje geologiczne uzupełniono własnościami termodynamicznymi płynów złożowych niezbędnymi do zastosowania symulacji kompozycyjnych tworzonego modelu, wykorzystano korelacje teoretyczne do określenia oddziaływania wzajemnego płynów oraz ich własności transportowych w skałach rozpatrywanej struktury,
- Przeprowadzono kalibrację modelu statycznego na podstawie danych eksploatacyjnych udostępnionych przez operatora złoża, na podstawie której wytypowano obszar złoża dla dalszej analizy,
- Przeprowadzono wielowariantowe symulacje prognostyczne,
- Przeprowadzono analizę wpływu schematu dalszej eksploatacji na możliwości sekwestracyjne i eksploatacyjne złoża.

Przeprowadzone analizy porównawcze pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- Najbardziej obiecujące wyniki otrzymano dla wariantu zakładającego wydobycie ropy naftowej odwiertami Nosówka-1 i Nosówka-5, poprzedzone wstępną sekwestracją CO₂, poprzez zatłaczanie odwiertem Nosówka-2, przy czym eksploatacja rozpoczyna się w chwili osiągnięcia przez średnie ciśnienie złożowe pierwotnej wartości (C500). W wariantcie tym uzyskano stopień szczypania złoża na poziomie około 64%, co oznacza zysk na poziomie około 130 tys. Nm³ ropy naftowej w porównaniu z odpowiednim wariantem bazowym (A500). Zestawienie wyników otrzymanych w wyniku przeprowadzonych symulacji złożowych zamieszczono w poniższej tabeli:

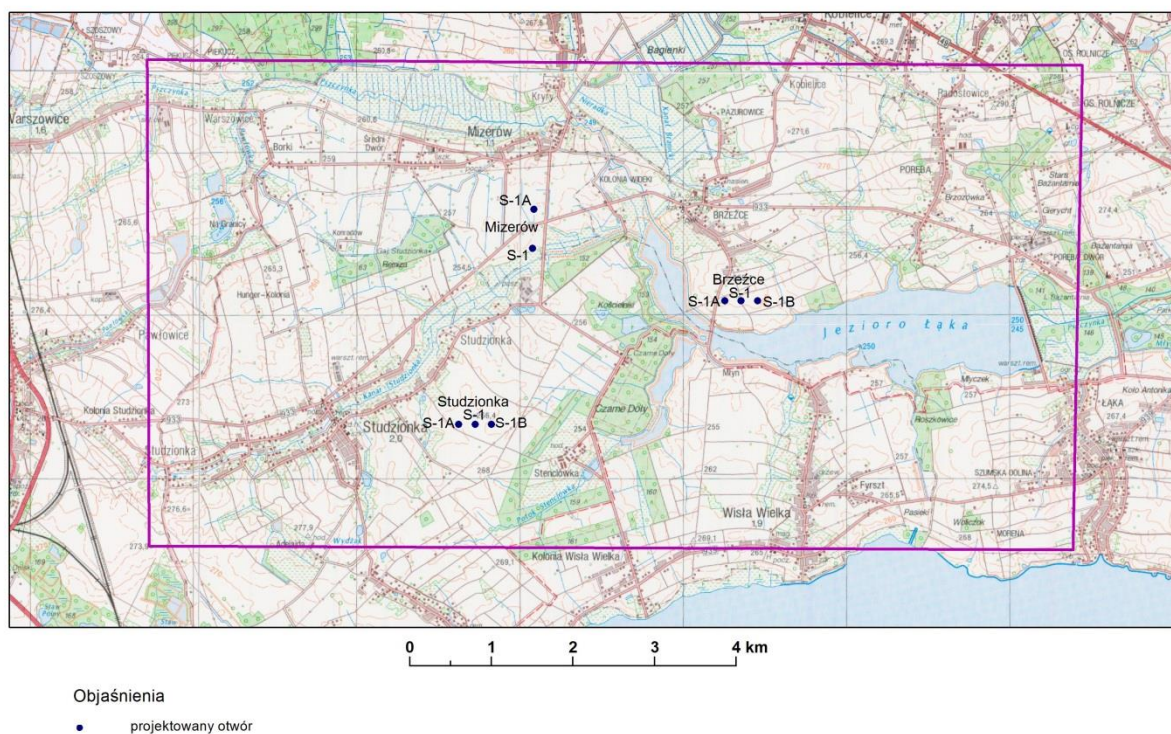
Wariant	Wydobycie sumaryczne [tys. Nm ³]	Wydobycie sumaryczne (od początku prognozy) [tys. Nm ³]	Ilość zatłoczonego CO ₂		Stopień szczypania
			[tys. ton]	[mln Nm ³]	
A500	357.9	76.0		-	0.47
A2000	419.0	137.1		-	0.55
B500	376.6	94.7	370	193	0.49
B2000	429.5	147.7	410	214	0.56
C500	487.9	206.1	546	285	0.64
C2000	458.7	177.0	507	265	0.60
D500	312.6	30.7	316	165	0.41
D2000	380.8	99.0	433	226	0.50

- Przyjęty limit maksymalnej wartości ułamka molowego zawartości CO₂ w gazie wydobywanym nie okazał się być krytycznym. Tylko w jednym wariantcie (D2000) przyjęty limit zadecydował o zakończeniu eksploatacji przez odwiert wydobywczy. We wszystkich pozostałych przypadkach o zakończeniu wydobywania ropy przez odwiert decydowała wartość wykładnika gazowego. Ponieważ dopuszczalna wartość ułamka molowego dwutlenku węgla w gazie wydobywanym przyjęta była arbitralnie, sytuacja ta mogłaby wpłynąć istotnie na wyniki symulacji w przypadku przyjęcia innej wartości limitującej,
- Dla dalszej eksploatacji złoża niewskazane jest zastosowanie schematów, w których fazy sekwestracji i wydobywania występują równocześnie. W wariantach takich obserwowano szybki wzrost wykładnika gazowego spowodowany migracją gazu z odwiertu zatłaczającego do wydobywczego spowodowaną wymuszoną różnicą ciśnień. Podobne zjawisko w mniejszym stopniu obserwowano dla schematów opartych na cykliczności faz produkcji i sekwestracji,
- W ramach realizacji pracy przeprowadzono również symulacje oparte o zatłaczanie dwutlenku węgla odwiertem najniższym udostępnionym, tj. Nosówka-1. Uzyskane rezultaty okazały się niezadowalające. Przyjęcie takiego schematu eksploatacji jest nieuzasadnione również ze względu na duże możliwości wydobywcze tego odwiertu w odpowiednich warunkach eksploatacji, co wykazano w wariantcie C500. Z powyższych względów zrezygnowano z prezentacji wyników otrzymanych w tym przypadku.

Obiekt w pokładach węgla

Prace realizował GIG (wykonawca symulacji zatłaczania CO₂ do pokładów węgla) we współpracy z Oddziałem Górnośląskim PIG-PIB.

Prace PIG-PIB OG obejmowały przygotowanie założeń dla komputerowych modeli dynamicznych (2 warianty) procesów zatłaczania dwutlenku węgla do składowiska z wykorzystaniem modeli statycznych z **1.1.15** dla w pokładach węgla Warszowice-Pawłowice, charakteryzujących efektywność i bezpieczeństwo składowania. Oszacowano wstępnie wydajności zatłaczania dla fazy pilotowej i fazy przemysłowej (o niecoj skali) oraz określono ilości lokalizację otworów zatłaczających (**Rys. 1**). Przygotowano i zweryfikowano niezbędne dane wejściowe dla wykonawców symulacji zatłaczania (GIG) dla obiektu w pokładach węgla w oparciu o informacje zebrane i opracowane w ramach zadań **1.1.14** i **1.1.15** dla pokładów węgla a także informacje zgromadzone w bazie danych (**zadanie 1.1.10**).



Rys. 1 Lokalizacja otworów zatłaczających dla wytypowanego rejonu Warszowice-Pawłowice (J. Jureczka)

GIG wykonał, z wykorzystaniem symulatora Eclipse (opcja ECBM), symulacje zatłaczania CO₂ do otworów pionowych w lokalizacjach/wariantach Brzeźce i Mizerów (patrz **Rys. 1**) przez okres około 1 roku, celem wspomaganie wydobywania metanu z pokładów węgla. Wykorzystano założenia projektu RECOPOL i zatłaczano CO₂ do pokładów 405 i 510. W każdym przypadku zatłaczano jednym otworem iniekcyjnym a do produkcji metanu służyły dwa otwory oddalone o około 200m. Dla otworów pionowych udało się zasymulować zatłaczanie jedynie kilkuset ton CO₂ (jak w RECOPOL) przy sumarycznej produkcji metanu około 50 tys. m³ (w warunkach normalnych, tzn. ciśnienia atmosferycznego). Jest to, więc przypadek (raczej małego) projektu pilotażowego.

Kolejne, dodatkowe prace PIG-PIB OG i specjalistów z GIG objęły przygotowanie i realizację założeń dla komputerowych modeli dynamicznych procesów zatłaczania dwutlenku węgla do składowiska w pokładach węgla rejonie Warszowice-Pawłowice – lokalizacja Mizerów (**Rys. 1**), charakteryzujących efektywność i bezpieczeństwo składowania, z zastosowaniem otworów poziomych. W tym przypadku udało się zasymulować projekt przemysłowego zatłaczania CO₂ w ilości od około 35 tys. ton do 203 tys. ton, zależnie od wariantu, co dało sumaryczną produkcję od 36 do ponad 62 mln m³ metanu (w warunkach normalnych, tzn. ciśnienia atmosferycznego). Daje to około 500 m³ metanu na 1 tonę zatłoczonego CO₂ co daje nadzieje na opłacalne ekonomicznie zastosowanie CO₂-ECBMR w przyszłości.

Modelowanie dynamiczne w pokładach węgla GZW w rejonie Pawłowice-Mizerów (GIG we współpracy z PIG-PIB)

(Jarosław Chećko, Tomasz Urych, Tadeusz Bromek, Magdalena Głogowska, Robert Warzecha)

We wcześniejszym etapie prac dokonano przeglądu literatury opisującej projekty światowe i krajowe związane z procesem zatłaczania CO₂ do pokładów węgla. Na tej podstawie przeprowadzono wstępną analizę zjawisk termodynamicznych uwzględniającą założenia do modelowania procesów migracji CO₂ w pokładach węgla – Zad. 1.1.9 (Głogowska i in., 2010).

Następnie dokonano oceny rozprzestrzeniania się zatłoczonego CO₂ w mediach złożowych dla wytypowanych obszarów - Zad. 1.1.9 (Chećko i in., 2010).

W powyższych opracowaniach scharakteryzowano między innymi następujące czynniki i mechanizmy towarzyszące procesowi sekwestracji CO₂ w pokładach węgla:

- struktura węgla, w tym matrycy węglowej;
- mechanizmy wpływające na obecność gazu w pokładzie węgla;
- modele i wzory określające transport gazu w pokładach węgla;
- czynniki wpływające na procesy sorpcji i dyfuzji gazów w ośrodku porowatym;
- zjawisko kurczenia się i pęcznienia matrycy węglowej;
- migracja gazów w pokładach węgla oraz w ich otoczeniu;
- przepuszczalność pokładów węgla i jej wpływ na efektywność technologii ECBM;
- proces wymiany chemicznej CO₂ w miejsce CH₄ w pokładach węgla.

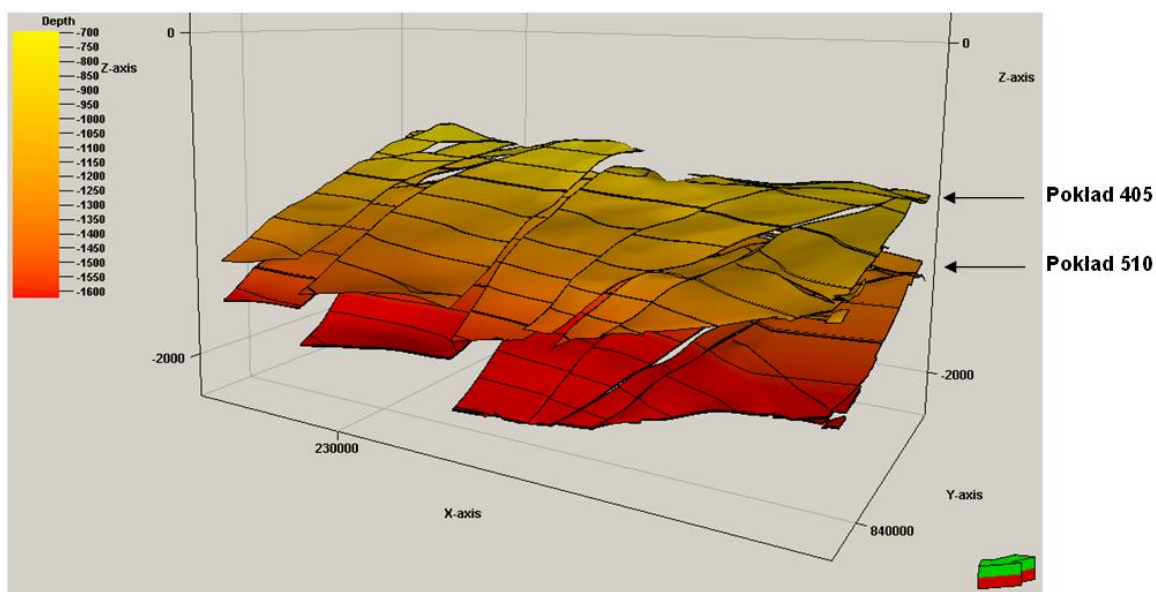


Fig.1.1.16_338 Przestrzenny model pokładów 405 i 510

W kolejnym etapie prac zbudowano statyczny model geologiczny pokładów 405 i 510 (Fig.1.1.16_338) wykonany w ramach zadania 1.1.15 (Urych i in., 2011), który następnie wykorzystano do konstrukcji dynamicznych modeli symulacyjnych we wspomnianych pokładach węgla (Fig.1.1.16_339).

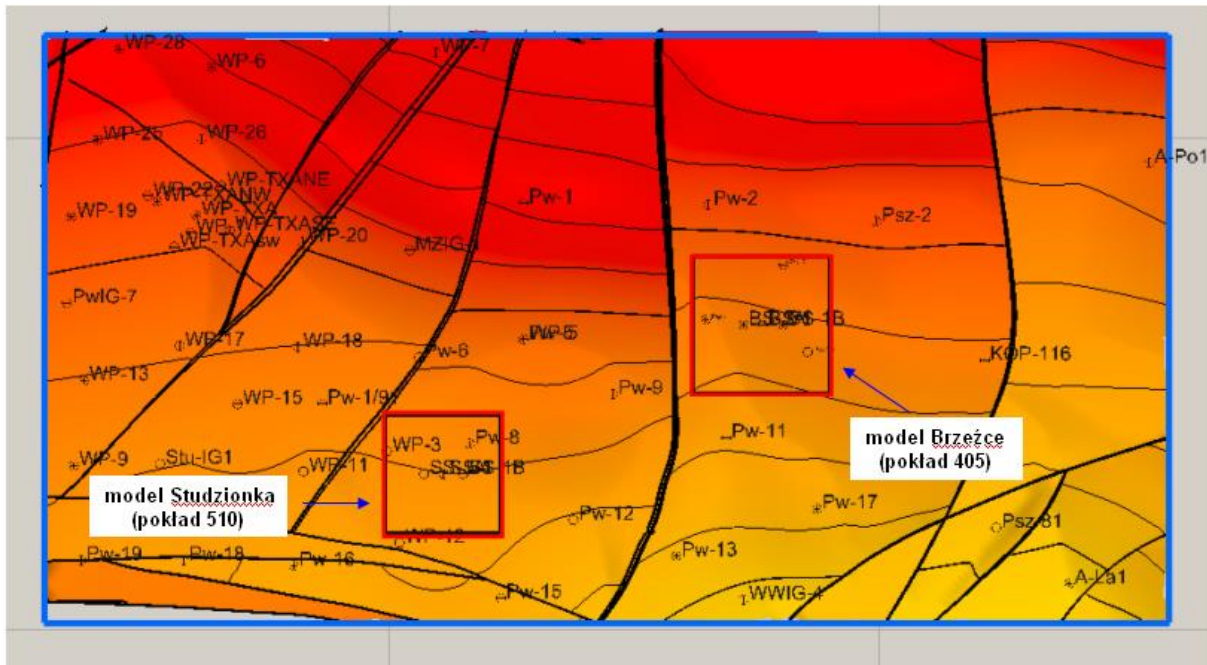


Fig.1.1.16_339 Lokalizacja zasięgu modeli symulacyjnych na mapie stropu pokładu 510

Lokalizacja wytypowanych otworów

Na figurze poniżej (Fig.1.1.16_340) 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. Na poniższej figurze zaznaczono także kolorem czerwonym zasięg dynamicznych modeli symulacyjnych wykonanych w ramach tego opracowania. Współrzędne wytypowanych otworów zestawiono w Tab. 1.1.16_25.

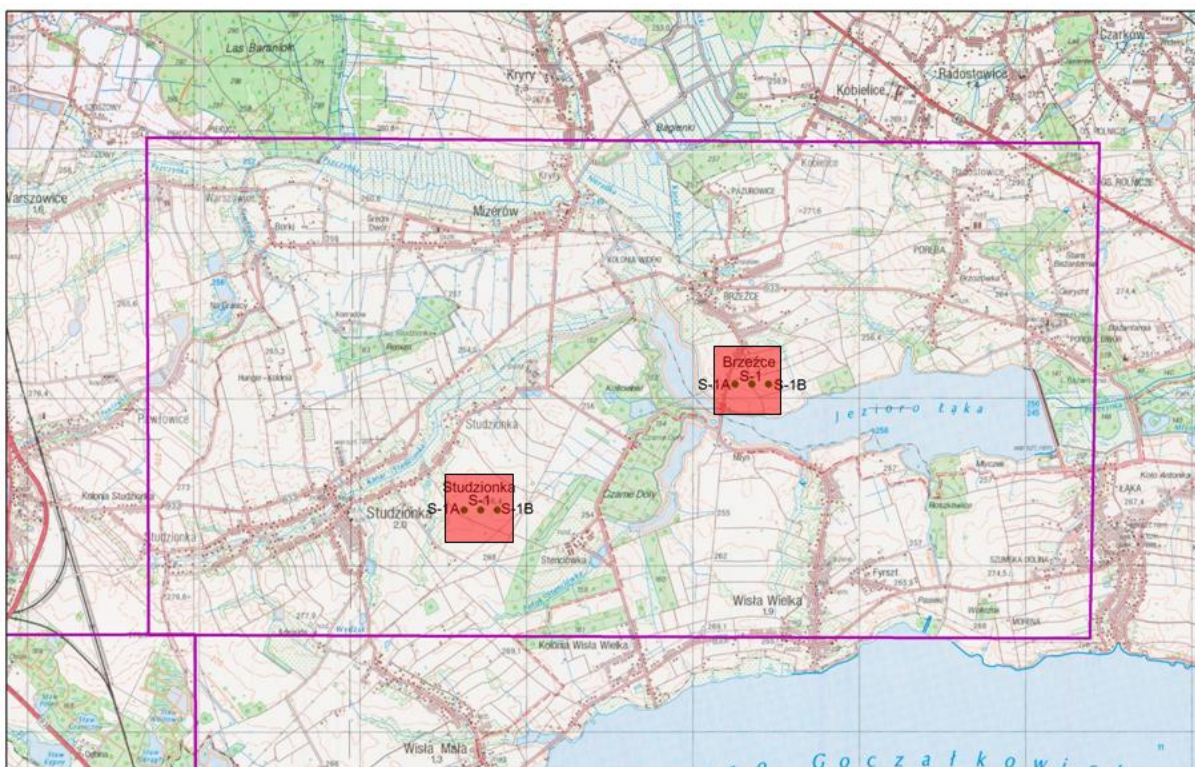


Fig.1.1.16_340 Rozmieszczenie wytypowanych otworów

Tab. 1.1.16_25 Zestawienie informacji dotyczących wytypowanych otworów

Nazwa otworu	Nr pokładu	Wysokość m n.p.m.	Współrzędne w układzie 1965/5	
Brzeźce S-1	405	263,0	228 822.3355	838 096.6130
Brzeźce S-1A	405	263,2	228 622.1977	838 096.5019
Brzeźce S-1B	405	262,0	229 022.4733	838 096.7240
Studzionka S-1	510	262,0	225 759.0666	836 579.8700
Studzionka S-1A	510	263,2	225 358.7911	836 579.6480
Studzionka S-1B	510	262,0	225 558.9289	225 558.9289

Budowa modeli numerycznych w pokładach węgla

Charakterystyka modelu dla rejonu miejscowości Brzeźce

W pierwszym z wykonanych modeli numerycznych przeprowadzono szereg symulacji związanych z zatłaczaniem CO₂ 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.1.1.16_341). W otworze zatłaczającym spąg pokładu 405 zalega na głębokości 1388 m. Przyjęta miąższość pokładu wynosi 3 metry. Model w pokładzie 405 skonstruowano na bazie regularnej siatki 69x69 bloków. Powierzchnia modelowanego obszaru wynosi 1,9044 km². Jest to obszar o wymiarach 1,38 x 1,38 km obejmujący swym zasięgiem przedział głębokościowy wynoszący 180 m. Ze względu na stosunkowo niewielką powierzchnię modelowanego obszaru zastosowano horyzontalną rozdzielczość siatki interpolacyjnej o wartości 20 x 20 m. W efekcie powstał model składający się z 14 283 komórek. Jednak dla potrzeb modelowania podwójnej porowatości węgla i procesu desorpcji gazu w czasie obliczenia w trakcie symulacji prowadzone są dla podwójnej ilości komórek tzn. 28 566 (69x69x6), z czego połowa tej liczby dotyczy matrycy węglowej, a druga połowa – systemu szczelin. Dane dotyczące konstrukcji modelu Brzeźce zebrano w Tab. 1.1.16_26.

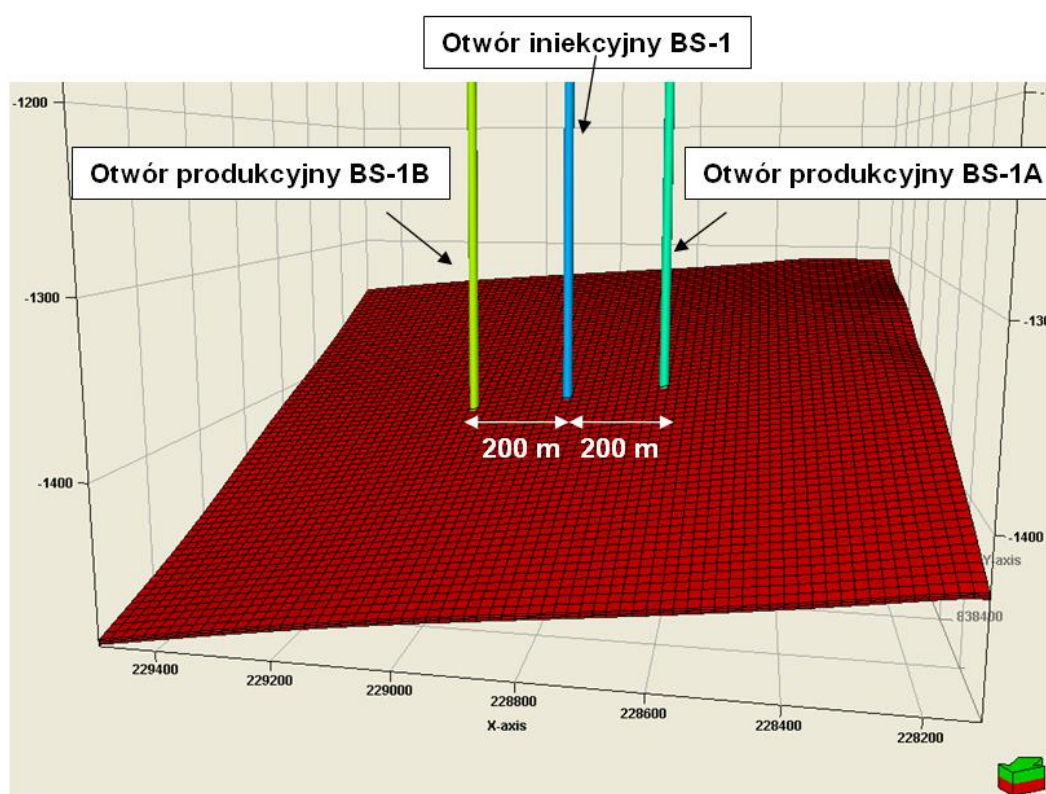


Fig.1.1.16_341 Rozmieszczenie otworów w modelu Brzeźce

Tab. 1.1.16_26 Parametry konstrukcyjne modelu Brzeźce

Parametr	Wartość
Miąższość [m]	3,0
Głębokość [m]	1310 – 1490
Powierzchnia modelu [m ²]	1 904 400
Horyzontalna rozdzielczość siatki interpolacyjnej [m]	20x20
Pionowa rozdzielczość modelu [m]	1
Porowatość matrycy węglowej [%]	8,0 – 9,0
Porowatość szczelinowa [%]	0,5
Przepuszczalność X,Y [mD]	3,0 – 3,83
Przepuszczalność Z [mD]	0,9 – 0,97

Charakterystyka modelu dla rejonu miejscowości Studzionka

Drugi z wykonanych modeli numerycznych obejmuje szereg symulacji związanych z zatłaczaniem CO₂ do pokładu 510. Na **Fig.1.1.16_342**. Przedstawiano 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. Przyjęta miąższość pokładu wynosi 7 metrów. Powierzchnia modelowanego obszaru wynosi 1,416 km². Jest to obszar o wymiarach 1,18x1,2 km obejmujący swym zasięgiem przedział głębokościowy od 1440 do 1595 m. Model dynamiczny skonstruowano na bazie regularnej siatki 59x60 komórek o wymiarach powierzchniowych 20x20 m. Miąższość pokładu podzielono na trzy warstwy. W efekcie powstał model składający się z 10 620 komórek. Podobnie jak dla modelu w pokładzie 405 tak i tutaj, ze względu na podwójną porowatość węgla liczba komórek w modelu została podwojona. W rezultacie symulacje przeprowadzono dla modelu składającego się z 21 240 komórek. Dane, dotyczące konstrukcji modelu Studzionka zebrano w **Tab. 1.1.16_27**.

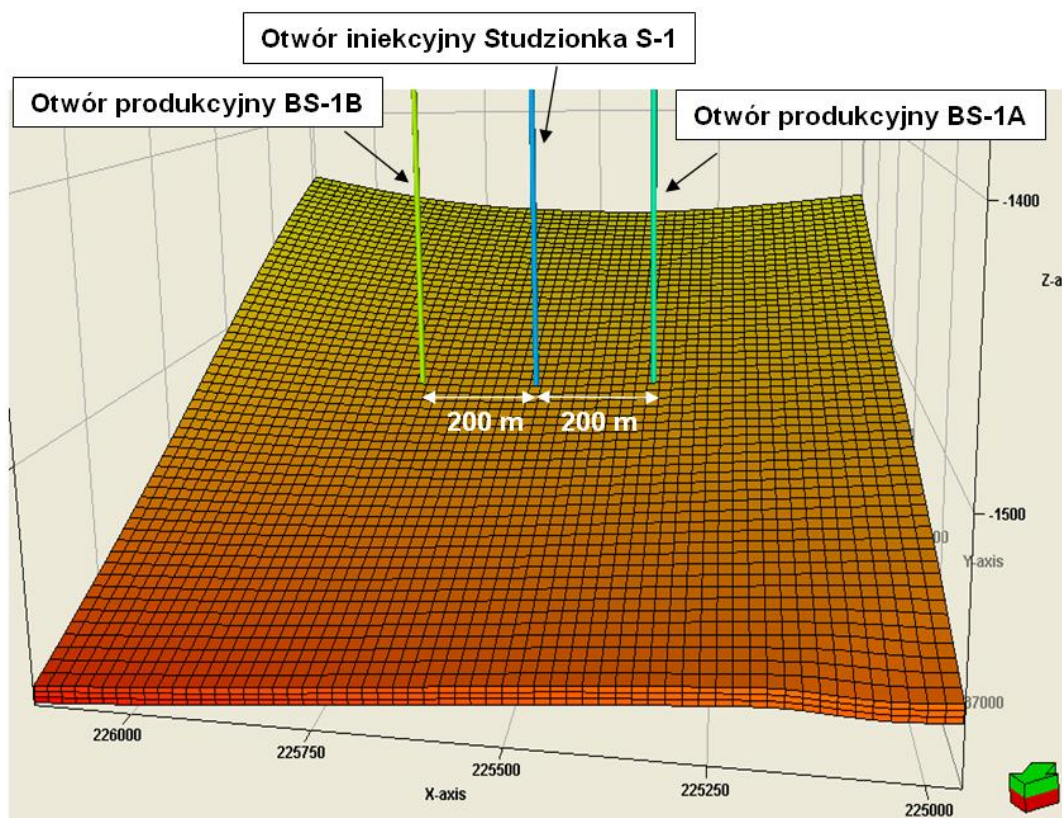


Fig.1.1.16_342 Rozmieszczenie otworów w modelu Studzionka

Tab. 1.1.16_27 Parametry konstrukcyjne modelu Studzionka

Parametr	Wartość
Miąszość [m]	7,0
Głębokość [m]	1440 - 1595
Powierzchnia modelu [m ²]	1 416 000
Horyzontalna rozdzielczość siatki interpolacyjnej [m]	20x20
Pionowa rozdzielczość modelu [m]	2,33
Porowatość matrycy węglowej [%]	6,0 – 7,0
Porowatość szczelinowa [%]	0,5
Przepuszczalność X,Y [mD]	2,07 – 2,85
Przepuszczalność Z [mD]	0,63 – 0,97

Założenia do modelowania z wykorzystaniem symulatora Eclipse

Do symulacji procesów zatłaczania CO₂ do pokładów węgla 405 i 510 wykorzystano kompozycyjną wersję symulatora ECLIPSE z opcją Coal Bed Methane, która uwzględnia zjawiska towarzyszące procesowi zatłaczania CO₂ do pokładów węgla. Obejmuje to główne mechanizmy odpowiadające za przepływ wody i gazu w pokładzie węgla (desorpcja gazu z matrycy węglowej do systemu szczelin, dyfuzja w matrycy zgodna z prawem Ficka, przepływ Darcy'ego w szczelinach), zjawisko kurczenia się i pęcznienia matrycy węglowej, proces wymiany chemicznej cząsteczek CO₂ w miejsce CH₄.

Podwójna porowatość

Symulator Eclipse uwzględnia w modelu podwójną porowatość. Model składa się z dwóch połączonych ze sobą systemów reprezentujących matrycę węglową oraz system szczelin. Metan magazynowany jest poprzez sorpcję w bardzo słabo przepuszczalnej matrycy węglowej charakteryzującej się odmienną porowatością w stosunku do szczelin, w których zachodzi zjawisko przepływu zdesorbowanego gazu. W związku z tym w modelach o podwójnej porowatości liczba warstw jest podwajana, a obliczenia w trakcie symulacji są prowadzone dla podwójnej ilości komórek.

Izotermy adsorpcji

Model adsorpcji gazów na węglu jest opisany w Eclipse 300 za pomocą rozszerzonej izotermy Langmuira (Arri, 1992). Dla każdego z gazów (CO₂ i CH₄) wymagane jest wprowadzenie parametrów izotermy Langmuira, tzn. objętości i ciśnienia Langmuira. Symulator Eclipse 300 wymaga założenia początkowego stężenia gazu w węglu poprzez wprowadzenie objętości gazu w masie skały podstawowej (sm³/kg). Oprogramowanie Eclipse definiuje jednostkę sm³/kg jako metr sześcienny gazu (przy ciśnieniu 1 atm=1013,25 hPa i temperaturze 15,56 °C) na kilogram węgla w warunkach *in situ*.

W opracowanym modelu wykorzystano dane wyznaczone laboratoryjnie w trakcie realizacji projektu RECOPOL (Wageningen, Maas, 2007). Szczegółowe parametry wykorzystane w symulacji zebrano w **Tab. 1.1.16_28**.

Tab. 1.1.16_28 Parametry wykorzystane w trakcie modelowania

Parametr	Pokład 405	Pokład 510	Jednostka
Ciśnienie początkowe w pokładzie w miejscu iniekcji	140	153	bar
Temperatura	47	50	°C
Gęstość węgla	1330		kg/m ³
Współczynnik dyfuzji CH ₄	0.000864		m ² /d
Współczynnik dyfuzji CO ₂	0.0000864		m ² /d
Min. ciśnienie produkcji	1		bar
Max. produkcja gazu	800		sm ³ /d
Max. ciśnienie zatłaczania	175	180	bar
Parametry rozszerzonej izotermy Langmuira:	-		-
CH ₄ , objętość VL	0.017		[sm ³ /kg]
CH ₄ , ciśnienie PL	2.3		[MPa]
CO ₂ , objętość VL	0.087		sm ³ /kg]
CO ₂ , ciśnienie PL	2.49		[MPa]

Krzywa przepuszczalności względnych

W modelowaniu wykorzystano krzywe zależności przepuszczalności względnych od nasycenia wodą (**Fig.1.1.16_343**) wyznaczone podczas realizacji projektu pilotażowego CBM prowadzonego na obszarze GZW przez firmę Texaco (Cants i in., 2001). Zależności te wykorzystano podczas modelowania dynamicznego w ramach realizacji projektu RECOPOL (Reeves, Taillefert, 2002).

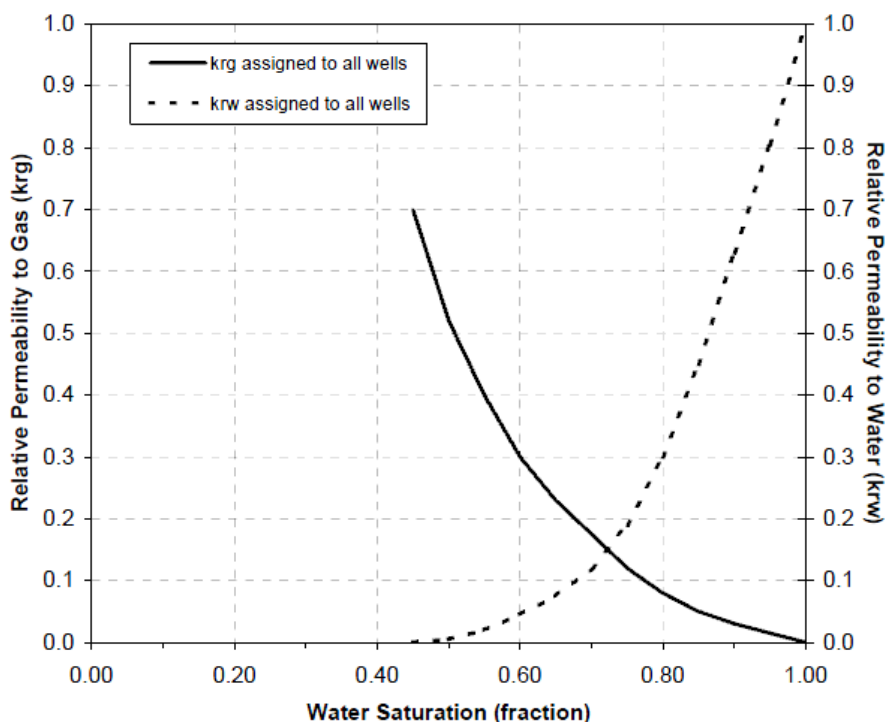


Fig.1.1.16_343 Zależność przepuszczalności względnych od nasycenia wodą (Reeves, Taillefert, 2002)

Wyniki symulacji

Model Brzeźce (pokład 405)

Przez pierwsze sześć miesięcy symulacji zaznacza się wyraźna dominacja produkcji wody z pokładu. W tym czasie obserwowane jest zmniejszanie ciśnienia w górotworze spowodowane rozpoczęciem produkcji wody z pokładu. Proces ten wywołuje desorpcję metanu z matrycy węglowej. Po upływie 6 miesięcy od rozpoczęcia symulacji rozpoczyna się zatłaczanie CO₂ do pokładu węgla, które trwa nieprzerwanie przez 1 rok. Symulacja procesu migracji gazów po zaprzestaniu iniekcji prowadzona jest przez 5 lat.

W trakcie modelowania procesu zatłaczania dwutlenku węgla rejestrowano ciśnienia na spodzie poszczególnych odwiertów (Fig.1.1.16_344) oraz zmiany średniego ciśnienia w strefie zatłaczania (Fig.1.1.16_345). Na figurze 1.1.16_345 przedstawiono także wydatki dobowe produkowanej wody oraz zatłaczanego dwutlenku węgla. Zestawienie podstawowych parametrów zatłaczania i produkcji przedstawiono w tabeli 1.1.16_29 i 1.1.16_30.

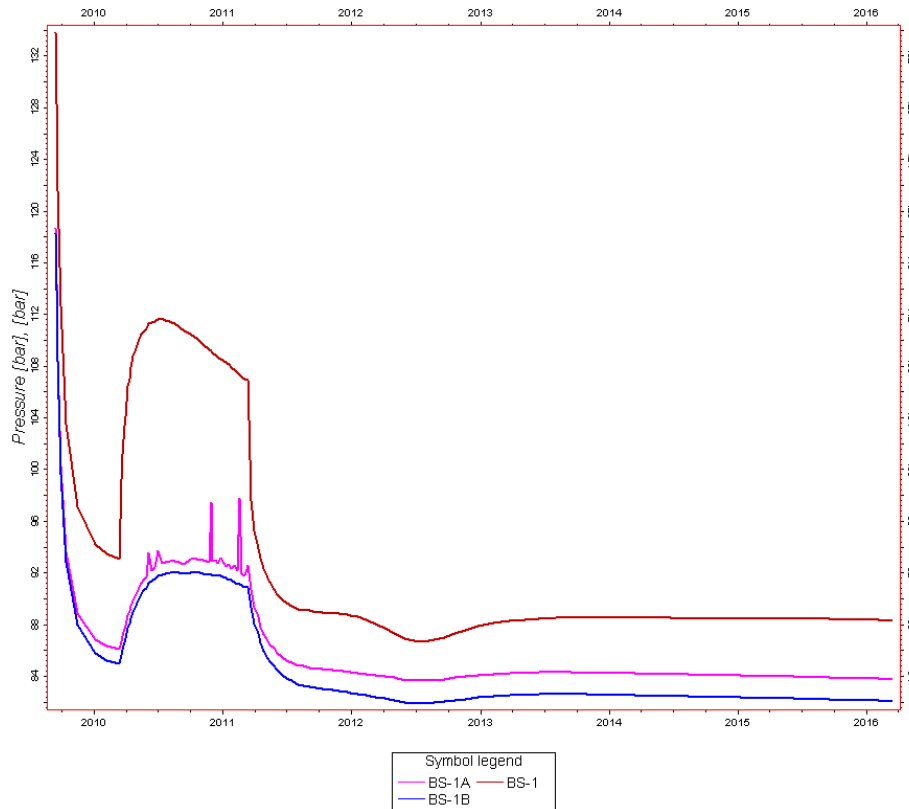


Fig.1.1.16_344 Ciśnienia denne w poszczególnych otworach

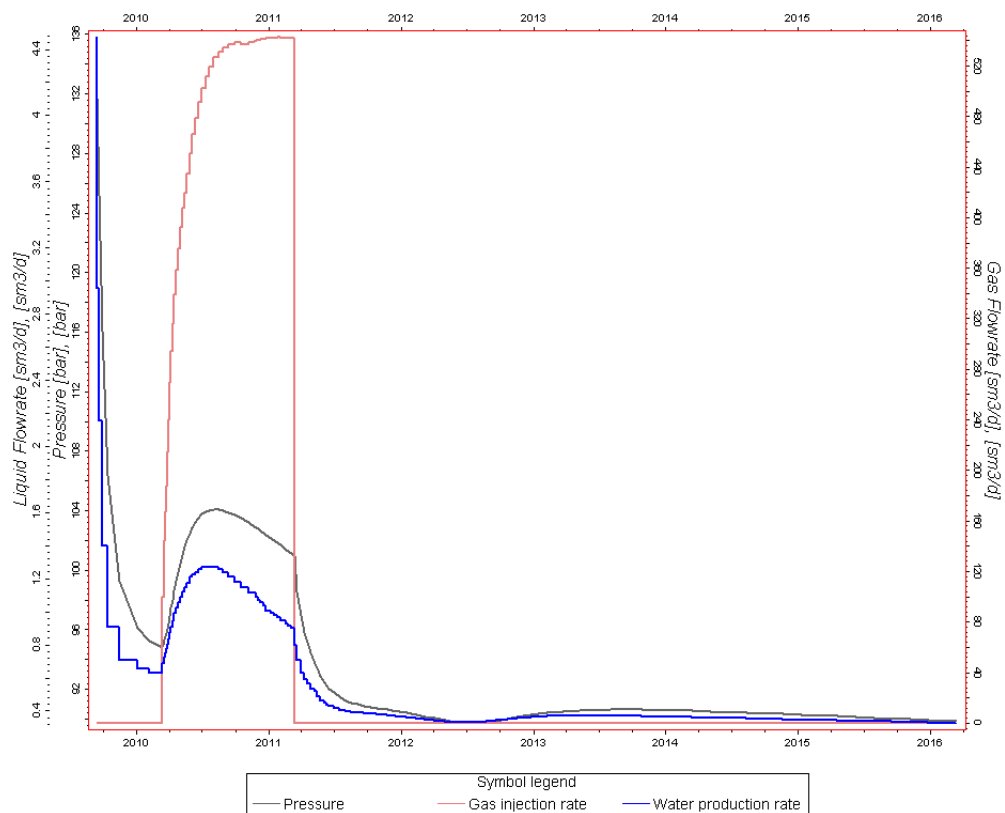


Fig.1.1.16_345 Zmiany ciśnienia średniego strefie w zatłaczania CO₂, wydajność produkcji wody oraz wydajność zatłaczania dwutlenku węgla

Tab. 1.1.16_29 Zestawienie podstawowych parametrów zatłaczania

Czas od rozpoczęcia symulacji	Wydajność zatłaczania [sm ³ /d]	Całkowita objętość zatłoczonego CO ₂ [sm ³]	Średnie ciśnienie w strefie zatłaczania [MPa]
0	0	0	13.58
6 mies.	99.57	497.8	9.52
9 mies	465.54	31 571.8	10.32
1 rok	534.34	78 991.8	10.38
15 mies	540.54	126 221.4	10.26
1,5 roku	0	176 257.5	9.86
2 lata	0	176 257.5	9.09
2,5 roku	0	176 257.5	9.00
3 lata	0	176 257.5	8.99
3,5 roku	0	176 257.5	9.05
4 lata	0	176 257.5	9.06
4,5 roku	0	176 257.5	9.05
5 lat	0	176 257.5	9.04
5,5 roku	0	176 257.5	9.02
6 lat	0	176 257.5	9.00
6,5 roku	0	176 257.5	8.99

Tab. 1.1.16_30 Zestawienie podstawowych parametrów produkcji

Czas od rozpoczęcia Symulacji	Wydajność produkcji wody [sm ³ /d]	Całkowita objętość produkcji CO ₂ [sm ³]	Całkowita objętość produkcji CH ₄ [sm ³]
0	0	0	0
1 dzień	4.471	0	0.03
6 mies.	0.687	8.21E-09	371.82
9 mies	1.222	28.07	931.40
1 rok	1.235	612.72	1866.03
15 mies	1.072	3207.97	3192.19
1,5 roku	0.798	9503.67	5369.74
2 lata	0.387	14460.95	8680.77
2,5 roku	0.346	16233.23	12538.95
3 lata	0.337	16743.15	15547.73
3,5 roku	0.368	17246.42	19509.08
4 lata	0.369	17788.62	23834.70
4,5 roku	0.362	18359.39	28604.28
5 lat	0.352	18953.05	33920.00
5,5 roku	0.342	19513.87	39319.29
6 lat	0.335	19912.76	43413.49
6,5 roku	0.326	20364.69	48312.27

Nasylenie wodą systemu szczelin w węglu w strefie zatłaczania w fazie końcowej symulacji zawiera się w przedziale od około 45 do 100 % (**Fig.1.1.16_346**). Natomiast nasylenie szczelin fazą gazową wynosi od 0 do około 55 % (**Fig.1.1.16_347**).

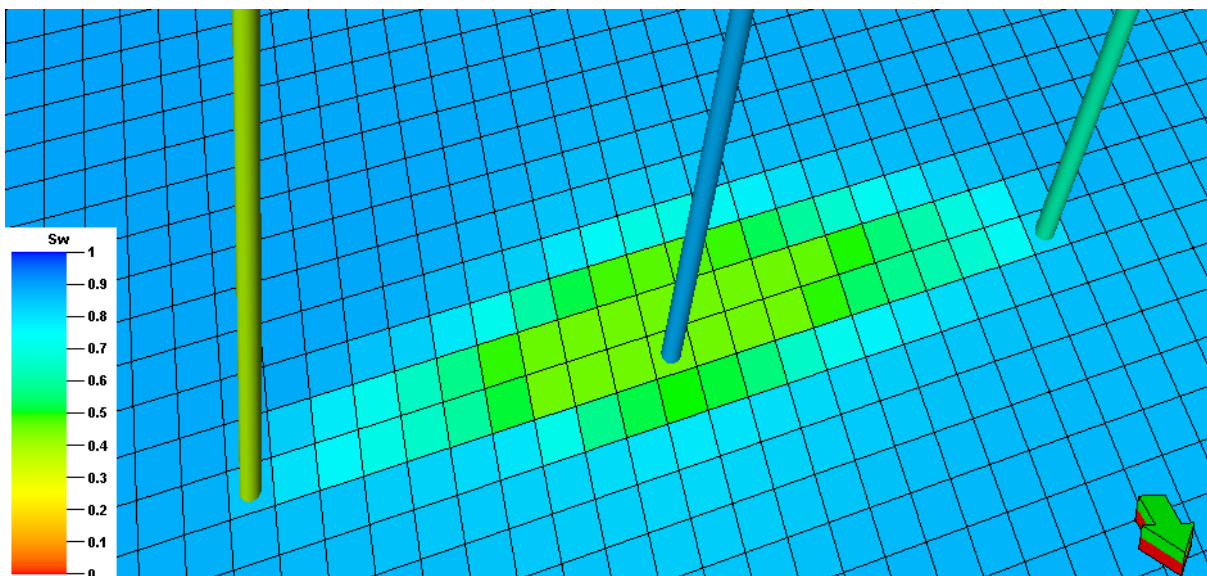


Fig.1.1.16_346 Zasięg strefy nasycenia wodą w systemie szczelin

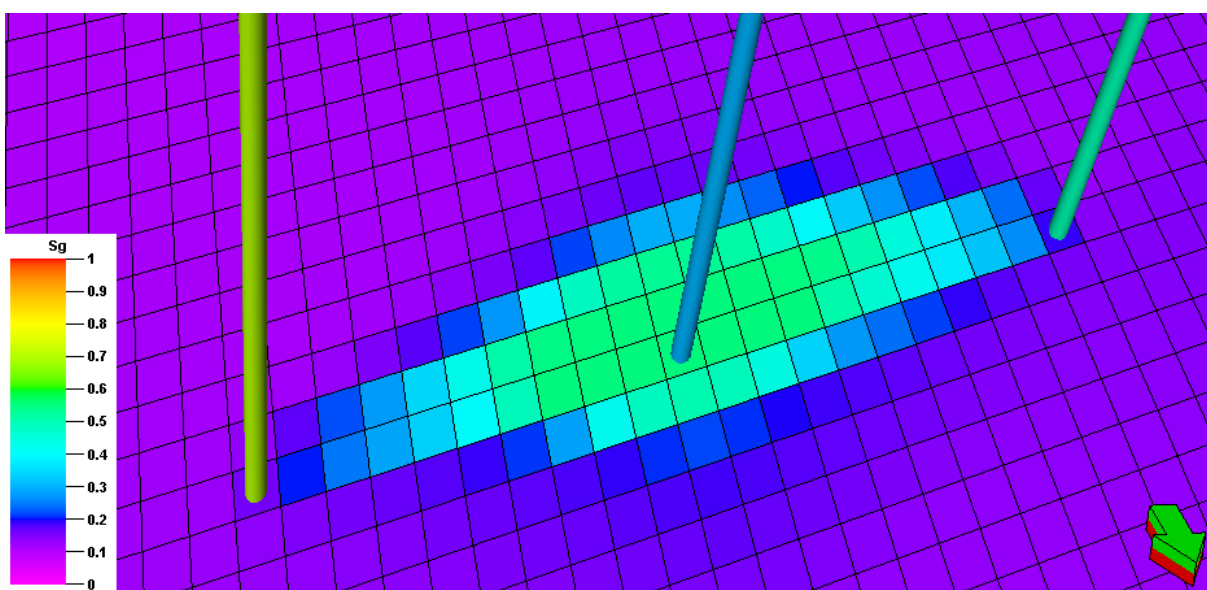
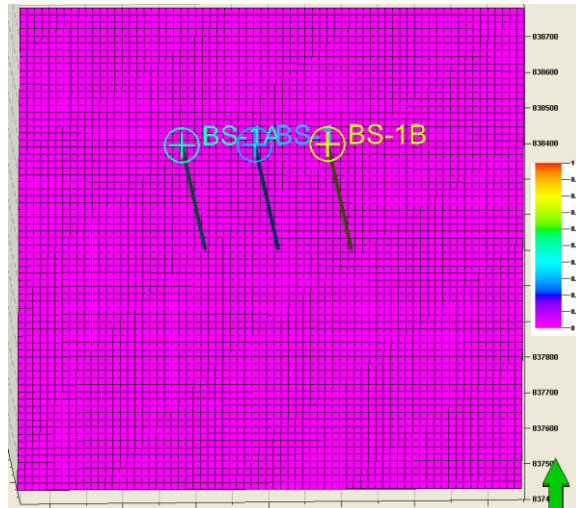


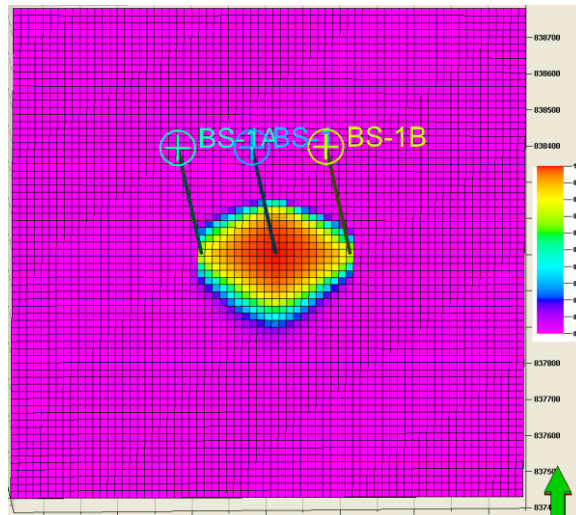
Fig.1.1.16_347 Zasięg strefy nasycenia fazą gazową w systemie szczelin

Zasięg strefy nasycenia dwutlenkiem węgla fazy gazowej w szczelinach na poszczególnych etapach symulacji przedstawiono na **Fig.1.1.16_348**. Natomiast **Fig.1.1.16_349**. ilustruje rozkład stężenia CO_2 i CH_4 w szczelinach i matrycy węglowej na końcu symulacji.

a) przed rozpoczęciem iniekcji



b) po roku iniekcji CO₂



c) po 5-ciu latach od zakończenia iniekcji

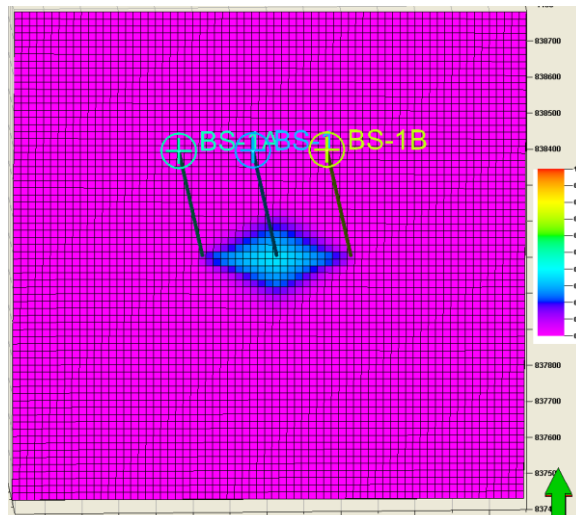
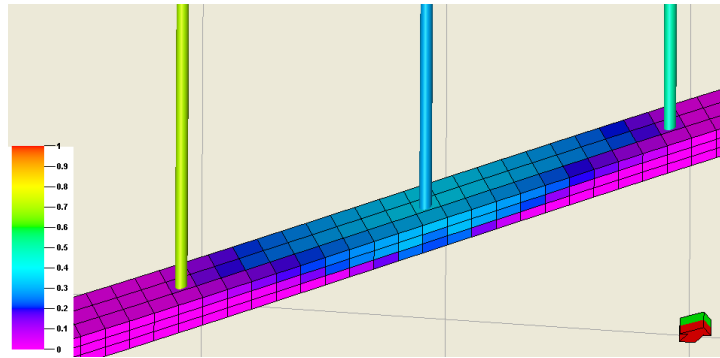
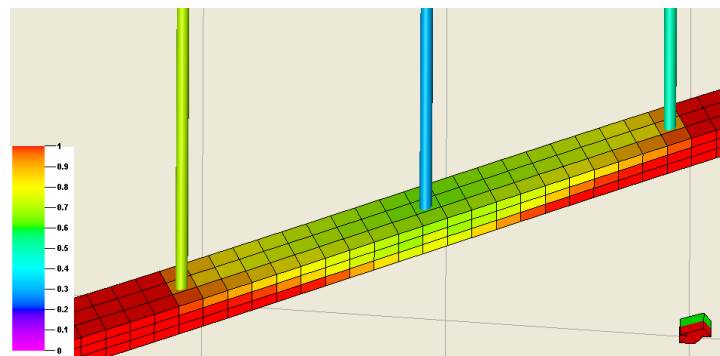


Fig.1.1.16_348 Zasięg strefy nasycenia szczelin dwutlenkiem węgla (ułamek molowy CO₂ w mieszaninie gazów wypełniającej szczeliny)

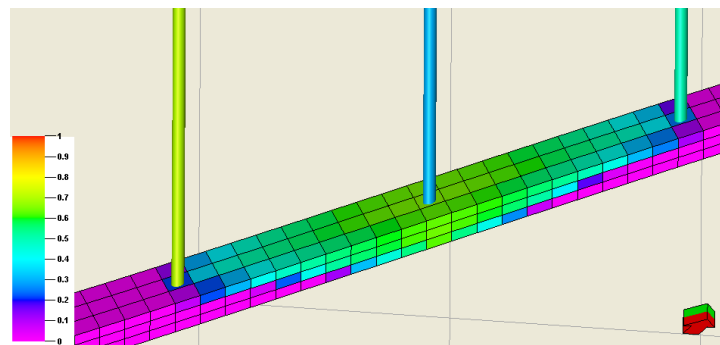
a) stężenie CO₂ w szczelinach



b) stężenie CH₄ w szczelinach



c) stężenie CO₂ w matrycy



d) stężenie CH₄ w matrycy

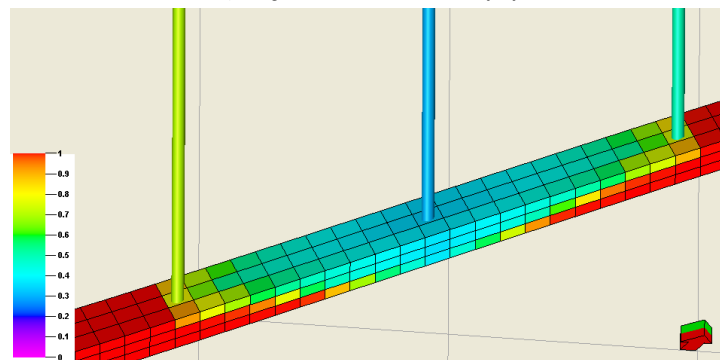


Fig.1.1.16_349 Rozkład stężenia CO₂ i CH₄ na końcu symulacji
(ułanki molowe gazów w szczelinach i matrycy węglowej)

Model Studzionka (pokład 510)

Podobnie jak w modelu dla pokładu 405 w początkowej fazie symulacji (0,5 roku) zaznacza się wyraźna dominacja produkcji wody z pokładu. W drugim etapie założono roczny interwał czasowy zatłaczania dwutlenku węgla, a następnie 5 lat obserwacji migracji gazów po zaprzestaniu iniekcji.

Analogicznie jak w poprzednim modelu zarejestrowano zmiany średniego ciśnienia w strefie zatłaczania (Fig.1.1.16_350), jak również zmiany ciśnień dennych w poszczególnych odwiertach (Fig.1.1.16_351). Zaznacza się tu brak znacznego wpływu iniekcji na ciśnienie w otworach produkcyjnych w porównaniu do modelu dla pokładu 405.

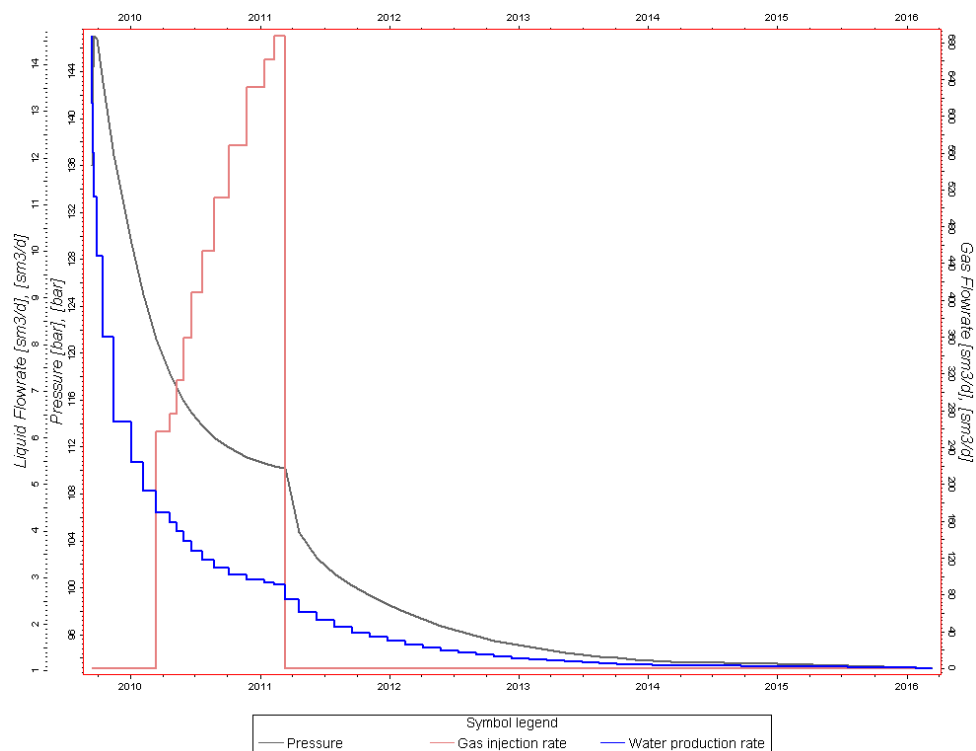


Fig.1.1.16_350 Zmiany ciśnienia średniego strefie zatłaczania CO₂, wydajności produkcji wody oraz wydajności zatłaczania dwutlenku węgla

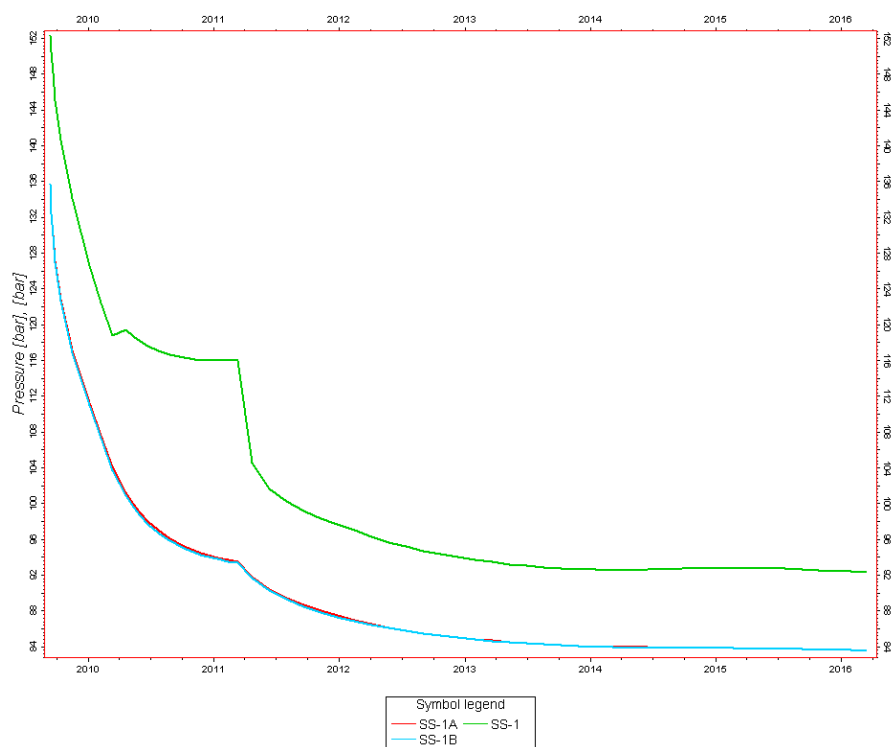


Fig.1.1.16_351 Ciśnienia denne w poszczególnych otworach

Wydatki dobowe produkowanej wody oraz zatłaczanego dwutlenku węgla (**Fig.1.1.16_350**) są zbliżone do wyników symulacji przeprowadzonej dla pokładu 405. Zestawienie podstawowych parametrów zatłaczania i produkcji przedstawiono w **Tab. 1.1.16_31** i **1.1.16_32**.

Tab. 1.1.16_31 Zestawienie podstawowych parametrów zatłaczania

Czas od rozpoczęcia symulacji	Wydajność zatłaczania [sm³/d]	Całkowita objętość zatłoczonego CO₂ [sm³]	średnie ciśnienie w strefie zatłaczania [MPa]
0	0	0	14.68
1 mies.	0	0	13.60
6 mies.	257.55	257.55	12.11
9 mies	358.98	30 041.79	11.49
1 rok	511.19	78 695.17	11.19
1,5 roku	0	177 761.1	11.01
2 lata	0	177 761.1	10.01
2,5 roku	0	177 761.1	9.72
3 lata	0	177 761.1	9.58
3,5 roku	0	177 761.1	9.46
4 lata	0	177 761.1	9.40
4,5 roku	0	177 761.1	9.37
5 lat	0	177 761.1	9.35
5,5 roku	0	177 761.1	9.34
6 lat	0	177 761.1	9.32
6,5 roku	0	177 761.1	9.31

Tab. 1.1.16_32 Zestawienie podstawowych parametrów produkcji

Czas od rozpoczęcia symulacji	Wydajność produkcji wody [sm ³ /d]	Całkowita objętość produkcji CO ₂ [sm ³]	Całkowita objętość produkcji CH ₄ [sm ³]
0	0	0	0
1 dzień	14.625	0	0.002799
6 mies.	4.865	0	78.87972
9 mies.	3.782	0.000430	174.5815
1 rok	3.210	0.016413	308.8764
1,5 roku	2.860	0.541949	586.1282
2 lata	1.936	2.496984	962.2387
2,5 roku	1.563	5.423785	1403.970
3 lata	1.388	7.950573	1767.867
3,5 roku	1.244	11.54590	2299.652
4 lata	1.161	15.29462	2890.276
4,5 roku	1.124	18.18839	3376.316
5 lat	1.107	22.18183	4081.000
5,5 roku	1.093	26.38770	4856.435
6 lat	1.080	29.69309	5488.425
6,5 roku	1.054	33.97629	6341.958

Analogicznie do analizy przeprowadzonej dla pokładu 405, również w modelu dla pokładu 510 zbadano rozkład nasycenia gazów w szczelinach i matrycy węglowej.

Nasycenie szczelin fazą gazową w fazie końcowej symulacji wynosi od 0 do około 55 % (**Fig.1.1.16_352**). Natomiast nasycenie wodą systemu szczelin w węglu w strefie zatłaczania zawiera się w przedziale od około 45 do 100 % (**Fig.1.1.16_353**).

Zasięg strefy nasycenia dwutlenkiem węgla fazy gazowej w szczelinach na poszczególnych etapach symulacji przedstawiono na **Fig.1.1.16_354**.

Rozkład stężenia CO₂ i CH₄ w systemie szczelin na końcu symulacji w postaci ułamków molowych dwóch komponentów mieszaniny gazów wypełniającej szczeliny zilustrowano na **Fig.1.1.16_355**. Natomiast rozkład stężenia CO₂ i CH₄ w matrycy węglowej na końcu symulacji przedstawiono na **Fig.1.1.16_356**.

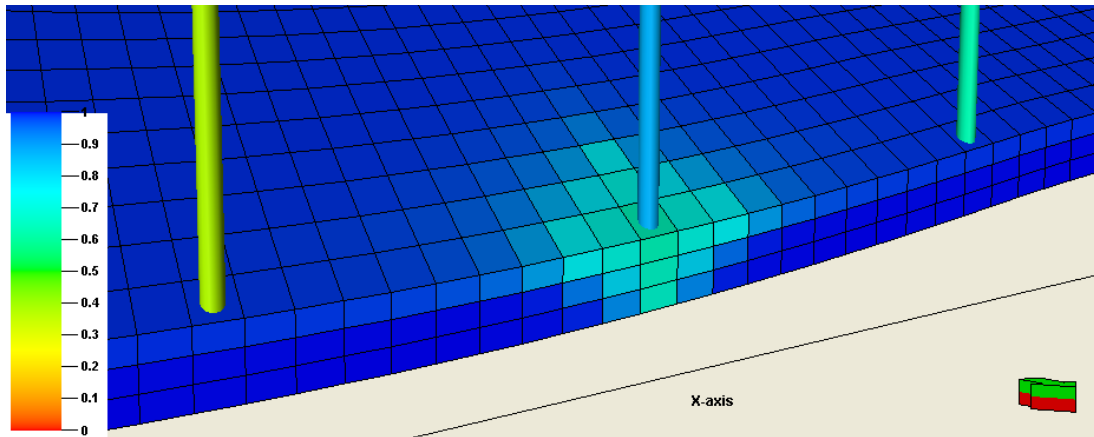


Fig.1.1.16_352 Rozkład nasycenia wodą w szczelinach

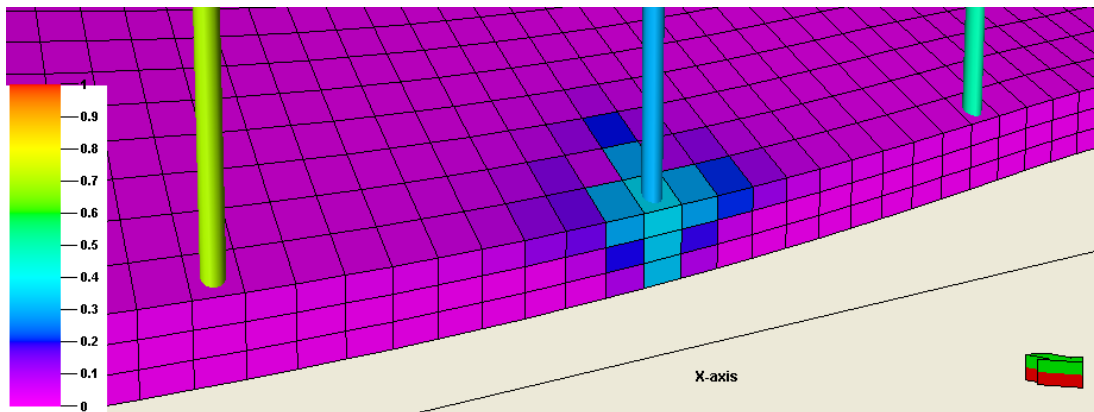
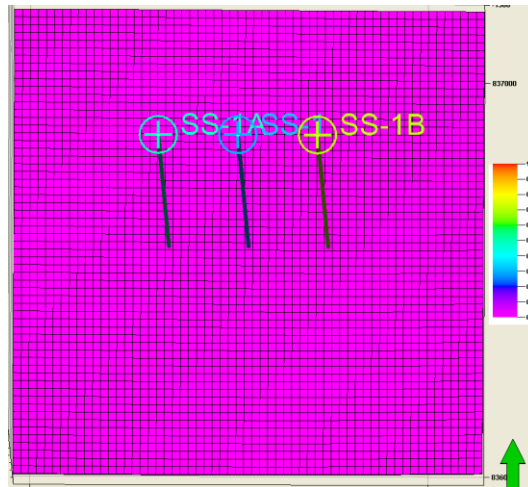


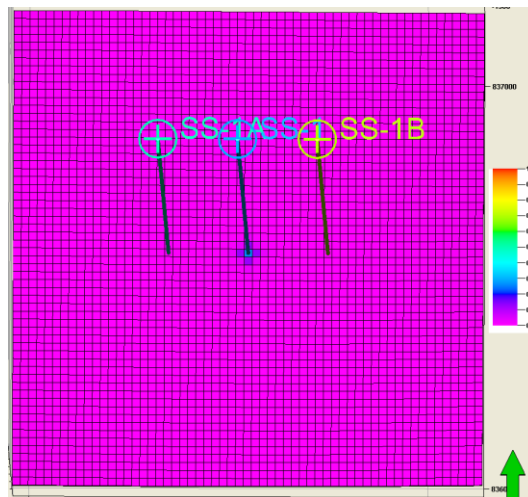
Fig.1.1.16_353 Rozkład nasycenia fazą gazową w szczelinach

Część dwutlenku węgla zatłaczanego do pokładu węgla jest adsorbowana przez matrycę węglową, a pozostała część powoduje powstawanie i rozwój strefy CO₂ wokół otworu iniekcyjnego. Rozmiary omawianych stref są odmienne dla pokładu 405 i 510 ze względu na różnej wielkości parametry zbiornikowe. Analizowane figury obrazują nie tylko proces zwiększania się stref nasycenia CO₂, ale również jego migrację do góry w kierunku stropu pokładu.

a) Przed rozpoczęciem iniekcji



b) po roku iniekcji CO2



c) po 5-ciu latach od zakończenia iniekcji

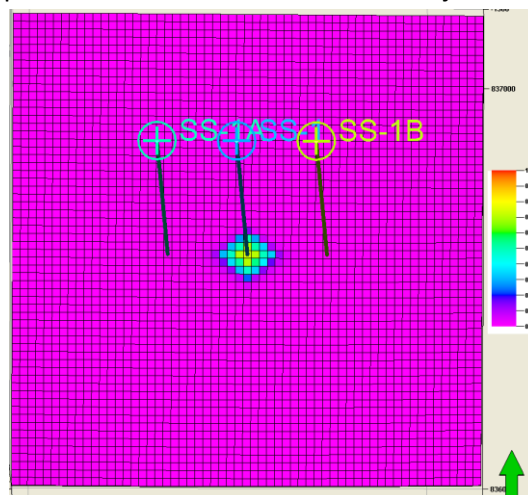
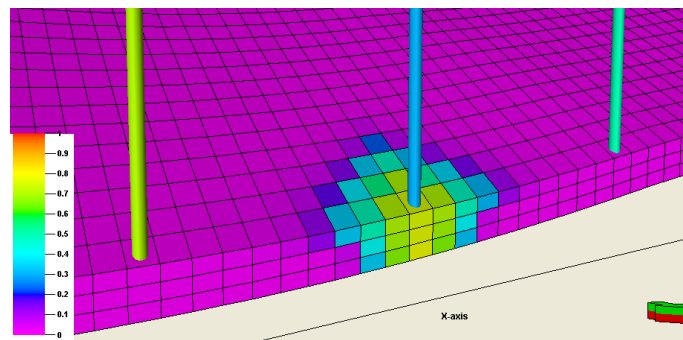


Fig.1.1.16_354 Zasięg strefy nasycenia szczelin dwutlenkiem węgla (ułamek molowy CO₂ w mieszaninie gazów wypełniającej szczeliny)

a) stężenie CO₂ w szczelinach



b) stężenie CH₄ w szczelinach

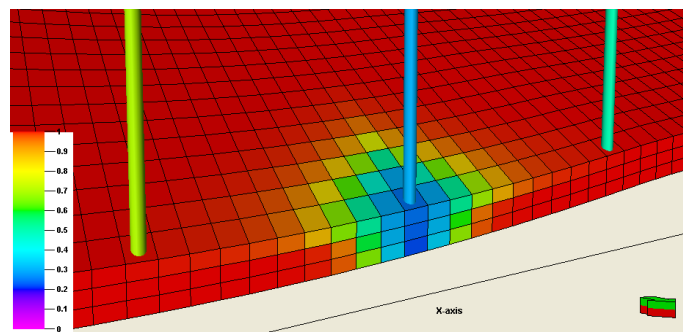
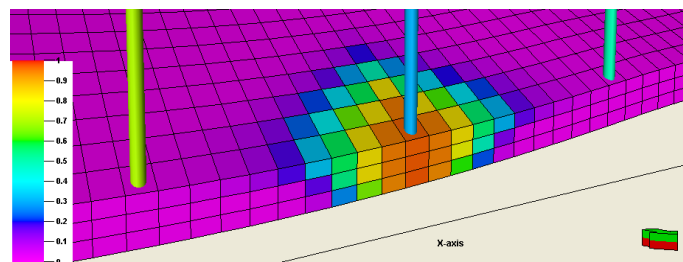


Fig.1.1.16_355 Rozkład stężenia CO₂ i CH₄ w systemie szczelin na końcu symulacji
(ułamki molowe dwóch komponentów mieszaniny gazów wypełniającej szczeliny)

a) stężenie CO₂ w matrycy



b) stężenie CH₄ w matrycy

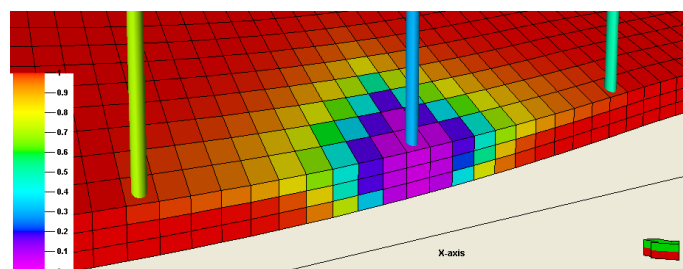


Fig.1.1.16_356 Rozkład stężenia CO₂ i CH₄ w matrycy węglowej na końcu symulacji
(ułamki molowe gazów w matrycy węglowej)

Podsumowanie

W ramach realizacji niniejszego zadania skonstruowano dynamiczne modele symulacyjne w pokładach węgla 405 i 510. Do konstrukcji tych modeli wykorzystano statyczny model geologiczny wykonany we wcześniejszym etapie prac. Zaimplementowany model statyczny uzupełniono o szczegółowe parametry zbiornikowe oraz własności termodynamiczne płynów i gazów złożowych. Przeprowadzono szereg symulacji procesu intensyfikacji wydobycia metanu z pokładu węgla przy równoczesnym zatłaczaniu dwutlenku węgla. Wykorzystano do tych celów kompozycyjny symulator złożowy ECLIPSE 300 z opcją Coal Bed Methane. W trakcie modelowania uwzględniono złożoną strukturę węgla oraz szereg procesów towarzyszących technologii intensyfikacji wydobycia metanu z pokładu węgla (*Enhanced Coal Bed Methane*).

Zaprezentowane zostały wyniki symulacji dotyczące zmian ciśnień w poszczególnych odwiertach oraz zmian średniego ciśnienia w strefie zatłaczania dwutlenku węgla. Scharakteryzowano wyniki dotyczące wydajności produkcyjnych, jak również wydajności zatłaczania CO₂. Ponadto zaprezentowano wyniki modelowania w zakresie przestrzennych rozkładów fazy gazowej i wodnej w systemie szczelin przy założeniu równowagi fazowej. W sposób graficzny przedstawiono także rozkład nasyceń CO₂ i CH₄ w pokładzie węgla oraz proces migracji tych gazów w poszczególnych etapach trwania symulacji.

Budowa modelu statycznego do alternatywnych wariantów zatłaczania CO2 do pokładów węgla dla wspomaganie wydobywania metanu dla wytypowanej lokalizacji obejmującej dwa pokłady 405 i 510

(Tomasz Urych, Janusz Jureczka)

W ramach niniejszego opracowania wykonano statyczny model parametryczny dla pokładów 405 i 510 w rejonie wytypowanych otworów. Obszar ten został wybrany, jako potencjalny rejon perspektywiczny do składowania CO2 w pokładach węgla.

Prezentowany model wykonano przy wykorzystaniu oprogramowania Petrel firmy Schlumberger.

W opracowanym modelu przedstawiono zaleganie wytypowanych pokładów węgla wraz z uwzględnieniem potencjalnie występujących uskoków. Ponadto oszacowano rozkład podstawowych parametrów jakościowych węgla, a także rozkład metanonośności. Na podstawie danych otworowych wykonano model litologiczny całej struktury zbiornikowej.

Model ten stanowi podstawę do konstrukcji modelu dynamicznego obejmującego symulację procesu zatłaczania CO2 do pokładów węgla przy wykorzystaniu otworów kierunkowych.

Budowa modelu statycznego

Lokalizacja projektowanych otworów

Wytypowane otwory zlokalizowane zostały na terenie gminy Suszec w pobliżu miejscowości Mizerów (**Fig. 1.1.16_357**). Projektowany odwiert Mizerów S-1 jest otworem pionowym pełniącym funkcję rozpoznawczą i nawierca analizowane pokłady węgla. Natomiast odwiert o nazwie Mizerów S-1A składa się z dwóch rozgałęzionych otworów kierunkowych wiercone z pionowego odcinka otworu. Odwiert Mizerów S-1A penetruje pokłady 405 i 510 i umożliwia symulację procesu zatłaczania dwutlenku węgla. Wiercenie archiwalne Pw-5 pełni w modelu funkcję otworu produkcyjnego. Współrzędne wytypowanych otworów zestawiono w **Tabeli 1.1.16_33**.

Tab. 1.1.16_33 Zestawienie informacji dotyczących wytypowanych otworów

Nazwa otworu	Wysokość [m n.p.m.]	Współrzędne w układzie 1965/5	
Mizerów S-1	253,0	226 263.2158	838 740.6376
Mizerów S-1A	257,0	226 276.9611	839 216.9732

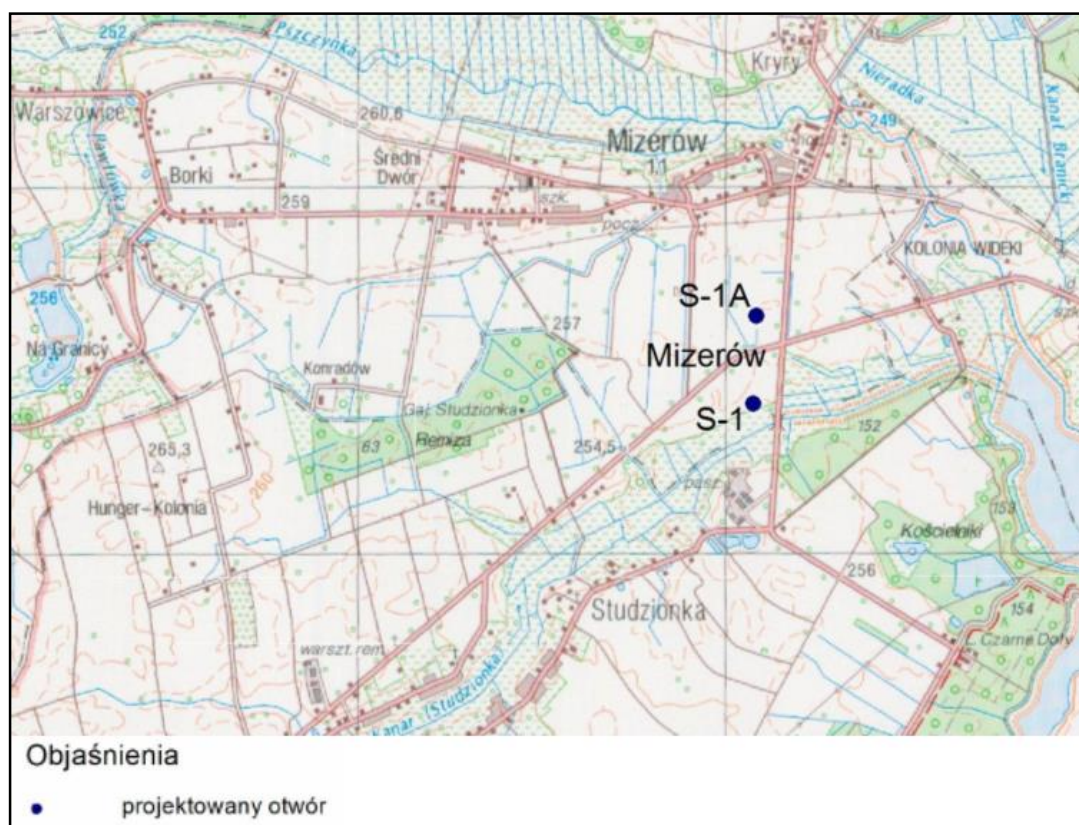
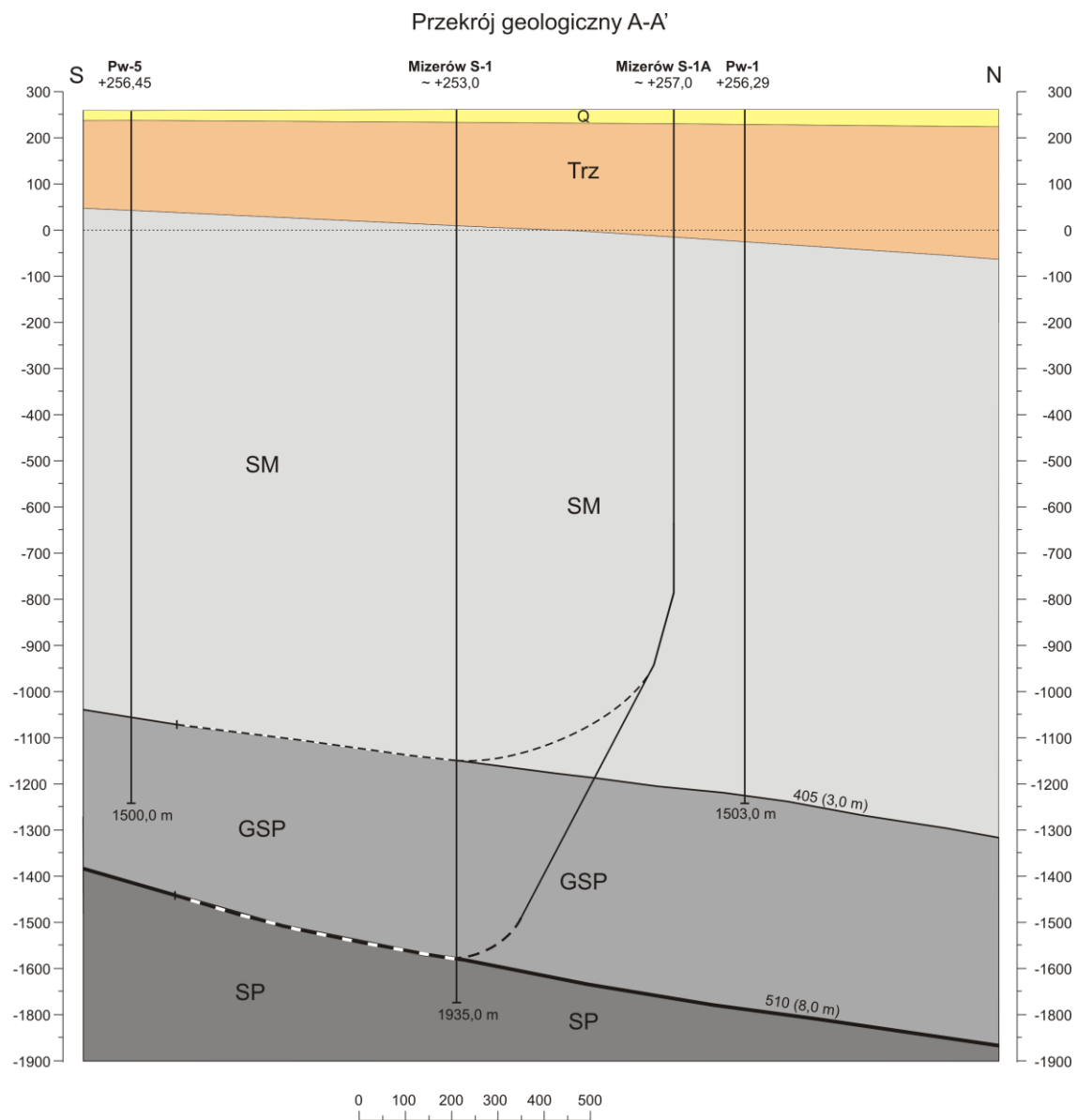


Fig. 1.1.16_357 Rozmieszczenie projektowanych otworów na mapie topograficznej

Na Fig. 1.1.16_358 przedstawiono przekrój geologiczny przez projektowaną strefę zatłaczania wraz z rozmieszczeniem projektowanych otworów (Mizerów S-1, Mizerów S-1A) oraz wierceń archiwalnych (Pw-1, Pw-5).



- Q czwartorzęd
- Trz trzeciorzęd - miocen
- SM karbon górny (węglonośny) - seria mułowcowa
- GSP karbon górny (węglonośny) - górnośląska seria piaskowcowa
- SP karbon górny (węglonośny) - seria paraliczna

Fig. 1.1.16_358 Przekrój geologiczny przez projektowaną strefę zatłaczania

W Tabeli 1.1.16_34 zebrano informacje dotyczące utworów geologicznych występujących w profilu odwiertu Mizerów S-1. Ponadto informacje dotyczące utworów geologicznych w rejonie projektowanych otworów zilustrowano na Fig. 1.1.16_359.

Tab. 1.1.16_34 Profil otworu Mizerów S-1

Interwał	Wiek	Utwory
0,0 – 24,0	czwartorzęd	glina pylasta oraz piaski z przewarstwieniami żwirów
24,0 – 246,0	trzeciorzęd – miocen (formacja skawińska)	iły i iłowce margliste, cienkie przewarstwienia piasków i piaskowców
246,0 – 1405,0	karbon górny - seria mułowcowa (do pokładu 405)	mułowce, piaskowce, iłowce, liczne pokłady węgla i łupku węglowego; w spągu pokład 405 o grubości 3,0 m
1405,0 – 1835,0	karbon górny - górnośląska seria piaskowcowa (z odcinka profilu poniżej pokładu 405)	piaskowce, zlepieńce, mułowce i iłowce, pojedyncze grube pokłady węgla i łupku węglowego, w spągu pokład 510 o grubości ok. 8,0 m
1835,0 – 1935,0	karbon górny - seria paraliczna	mułowce, piaskowce, iłowce

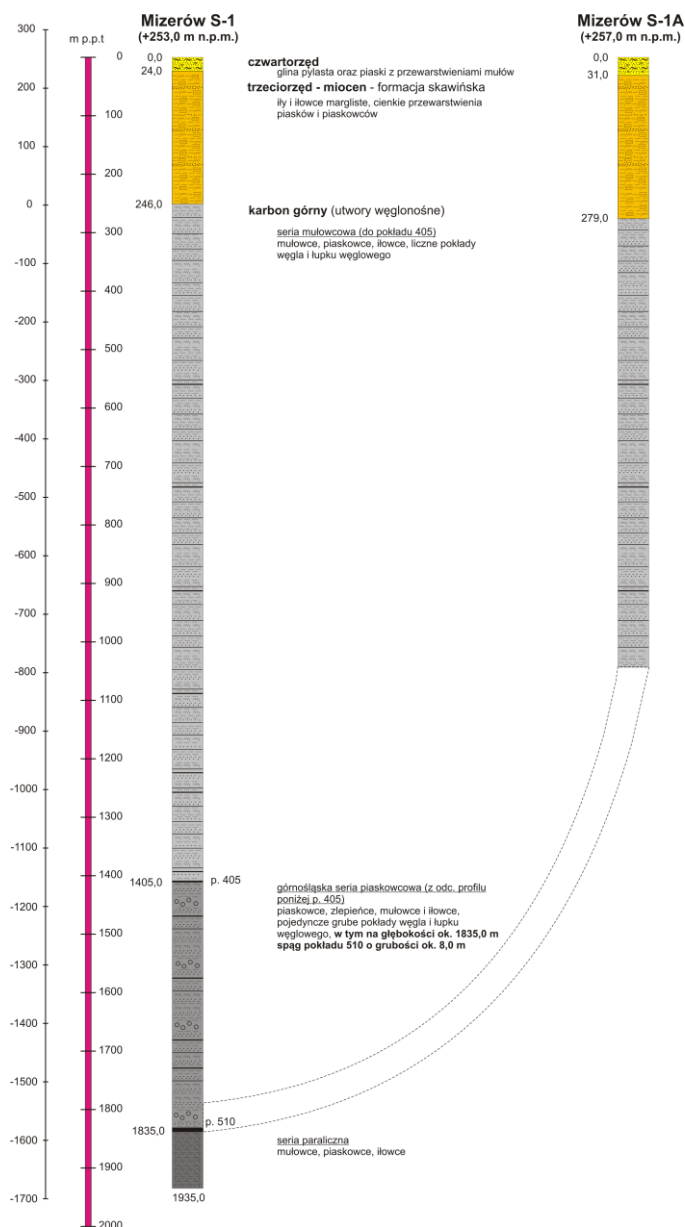


Fig. 1.1.16_359 Schematyczne zestawienie projektowanych otworów

Lokalizacja modelowanego obszaru

Poniżej przedstawiono kontur modelowanego obszaru wraz z rozmieszczeniem otworów wiertniczych, z których dane zostały wykorzystane do budowy modelu statycznego (**Fig. 1.1.16_360**). Parametryczny model statyczny obejmuje jeden blok tektoniczny wyznaczony przez uskoki potencjalnie wstępujące w obrębie projektowanych otworów.

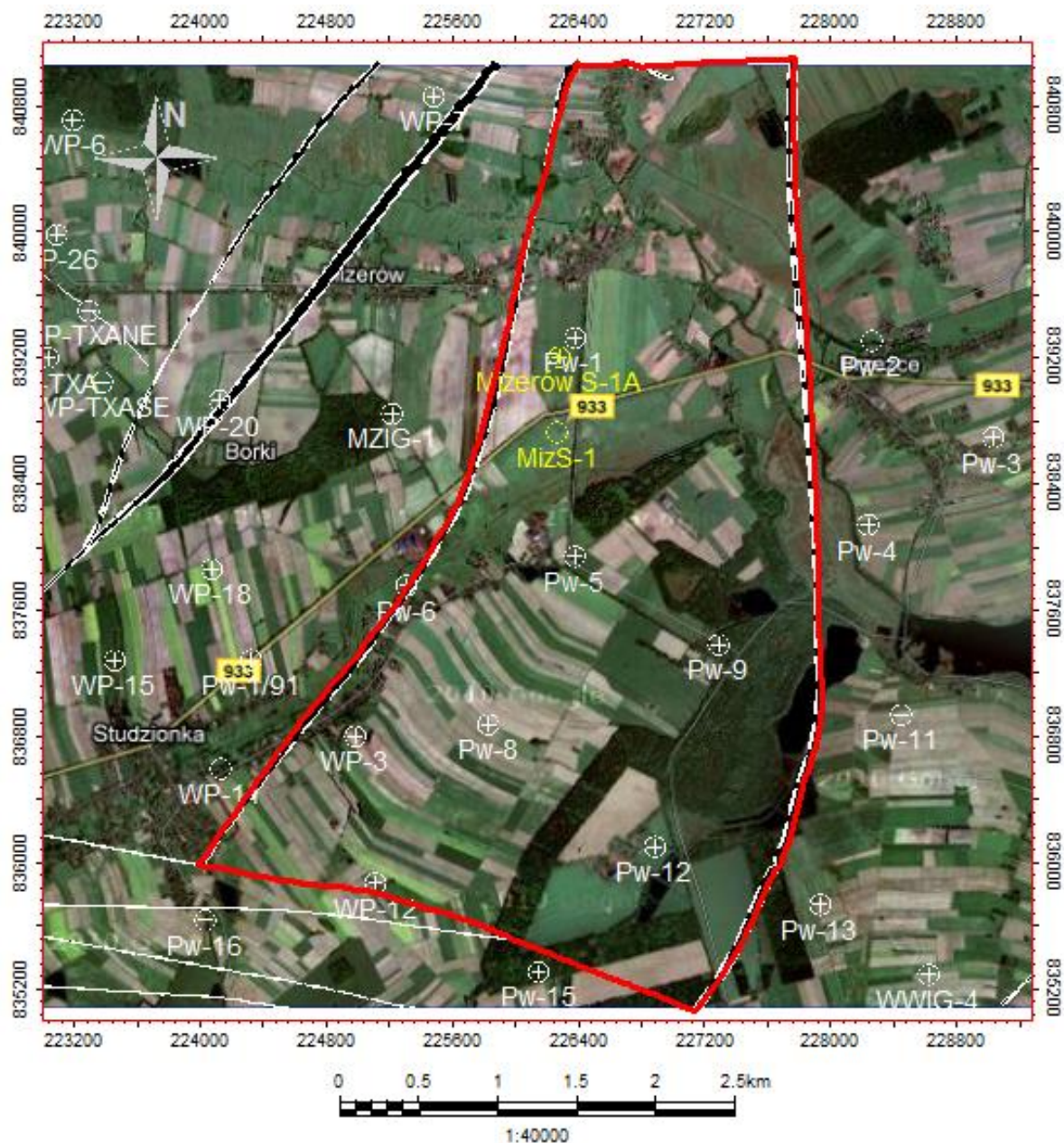


Fig. 1.1.16_360 Lokalizacja modelowanego obszaru na tle mapy zagospodarowania terenu wraz z lokalizacją wytypowanych otworów, odwiertów archiwalnych oraz bloków tektonicznych

Modelowanie strukturalne

Pokład 405 należy do warstw załęskich serii mułowcowej, natomiast pokład 510 zaliczamy do warstw siodłowych górnośląskiej serii piaskowcowej.

Rozciągłość pokładów węgla w tym rejonie przedstawia kierunek E-W, a pokłady zapadają w kierunku północnym (Fig. 1.1.16_361). Występujące tu uskoki dzielą model na 17 bloków, z których największy ma powierzchnię około 19 km² (blok ograniczony uskokami o zrzutach do 300 m).

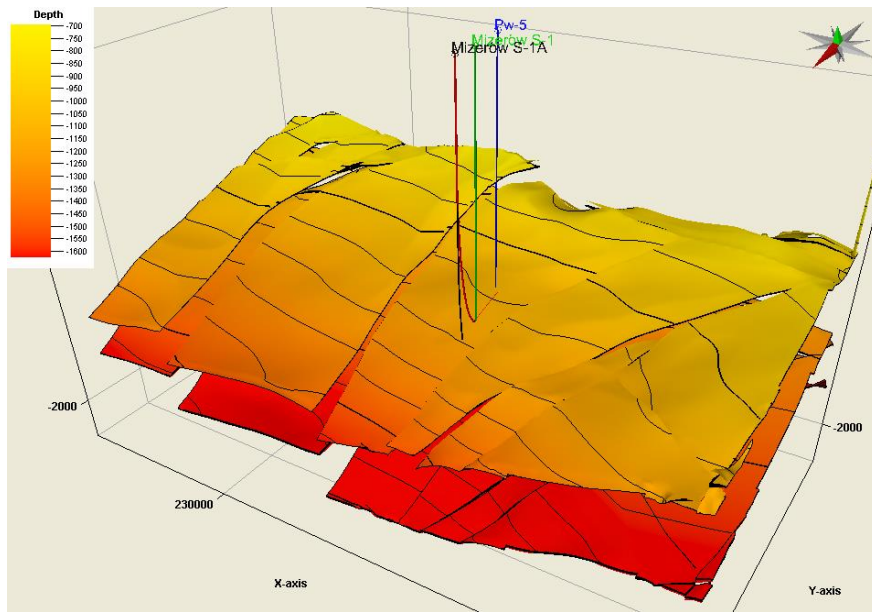


Fig. 1.1.16_361 Zaleganie pokładów 405 i 510 w modelu

Pokład 405 usytuowany jest w modelowanym bloku tektonicznym na głębokości poniżej 1130 m (Fig. 1.1.16_362). Największa głębokość, jaką osiąga spąg pokładu 405 w tym rejonie wynosi ok. 1877 m. Natomiast pokład 510 zalega w omawianym bloku tektonicznym na głębokości poniżej 1331 m. Największa głębokość, jaką osiąga spąg pokładu 405 w tym rejonie to ok. 2271 m.

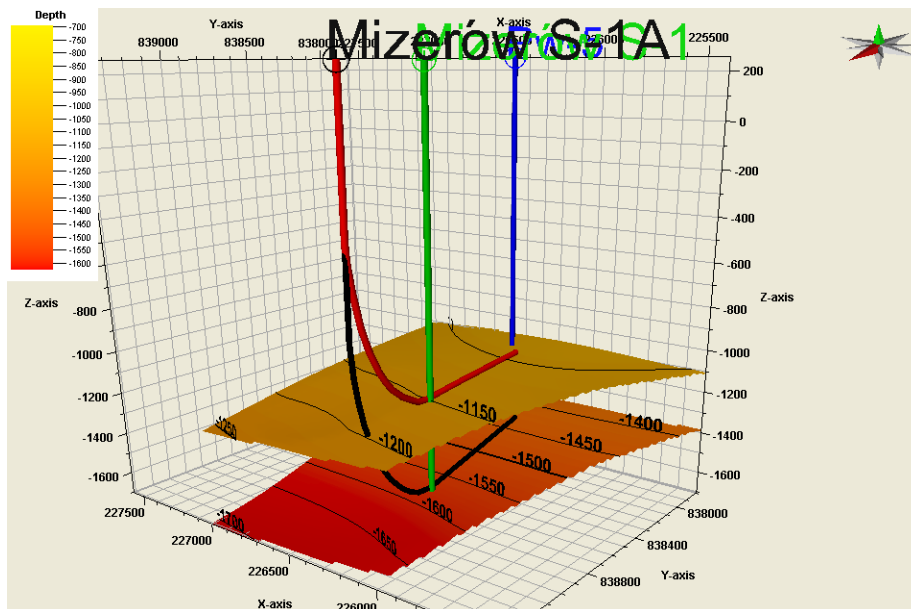


Fig. 1.1.16_362 Zaleganie pokładów 405 i 510 w obrębie wybranego bloku tektonicznego

Powierzchnia modelowanego obszaru wynosi 13 km². Miąższość modelowanego obszaru zawiera się w przedziale od 209 do 521 m. Zastosowano horyzontalną rozdzielczość siatki interpolacyjnej o wartości 50 x 50 m. W efekcie powstał model składający się z 499 800 komórek, 7 warstw i 1 bloku (Fig. 1.1.16_363).

Przedział głębokościowy modelu jest następujący:

- od rzędnej -840 m n.p.m. (głęb. ok. 1100 m);
- do rzędnej -2021 m n.p.m. (głęb. ok. 2275 m).

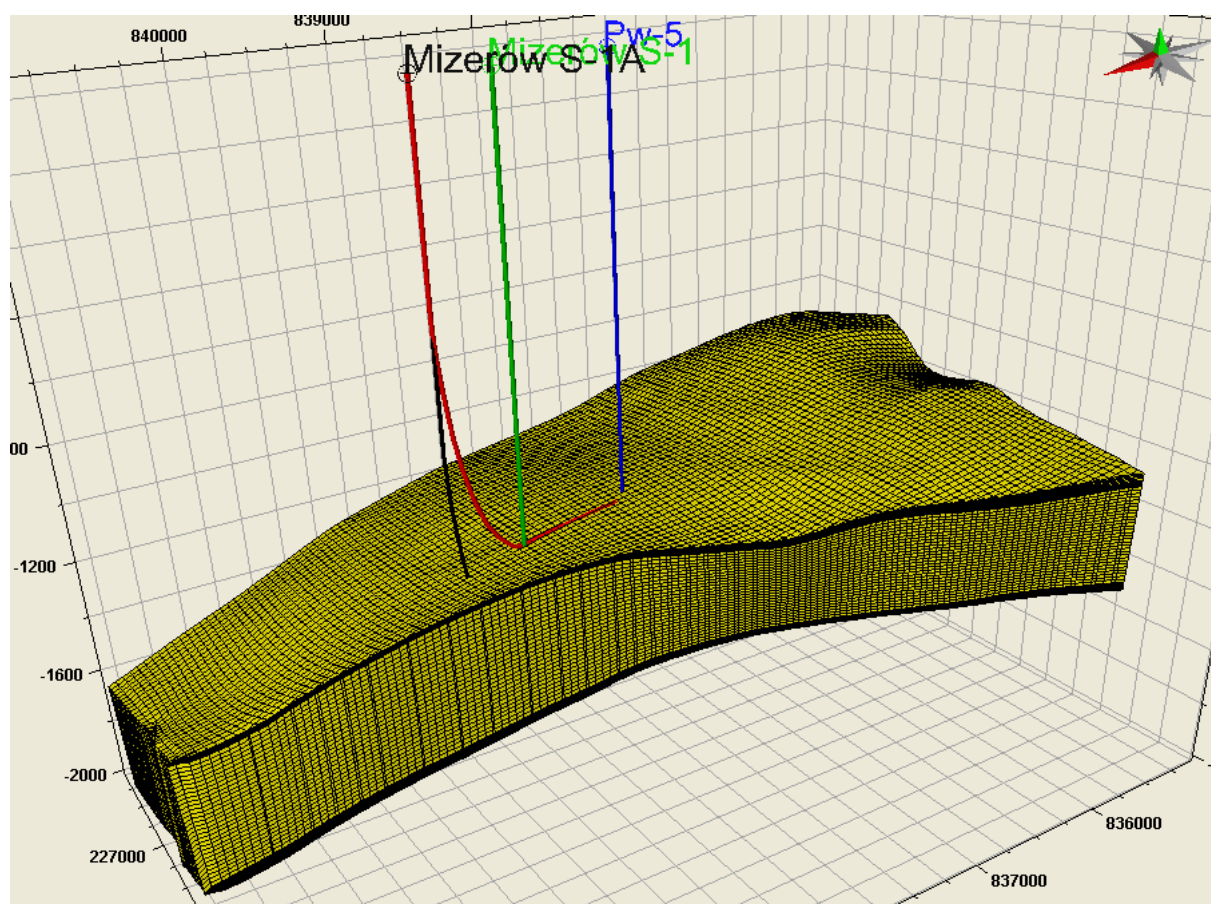


Fig. 1.1.16_363 Struktura modelu numerycznego.

Modelowanie uskokowe

W opracowanym modelu 3D twory 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 przebiegów 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 (Fig. 1.1.16_364).

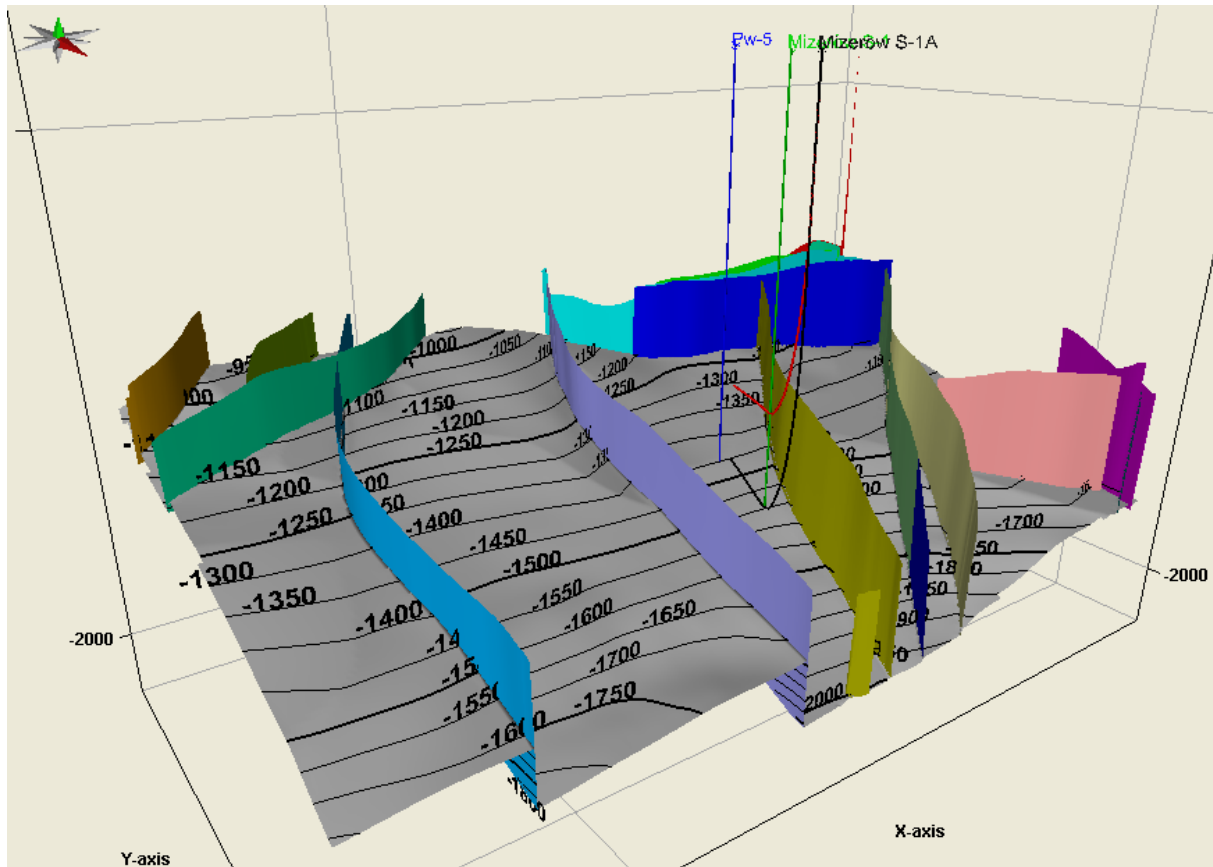
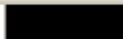









Fig. 1.1.16_364 Model uskokowy na tle mapy strukturalnej spągu pokładu 510

Model litologiczny

Do budowy modelu litologicznego wykorzystano informacje zawarte w kartach otworowych dotyczące typu litologicznego przewierconych skał poniżej głębokości 1000 m. Poszczególnym typom litologii, przed wprowadzeniem do modelu, zostały przyporządkowane odpowiednie kody liczbowe (Tab. 1.1.16_35).

Tab. 1.1.16_35 Zestawienie wydzielen litologicznych kodowanych do postaci liczbowej

Code	Name	Color
0	Węgiel kamienny	
1	łowiec	
2	Piaskowiec	
3	Łupek węglowy	
4	Łupek piaszczysty	
5	Mułowiec	
6	Zlepianiec	
7	Łupek ilasty	

Otrzymane w ten sposób wyniki interpretacji otworowych w postaci dyskretnej poddano procesowi uśredniania (*Scale up well logs*). Dla danych litologicznych zastosowano statystyczny algorytm *Most of*, który przypisuje danemu interwałowi najliczniej reprezentowany typ litologiczny w tym interwale uśredniania.

Podczas konstrukcji modelu litologicznego w rejonie Pawłowice - Mizerów zastosowano sekwencyjny algorytm wskaźnikowy o nazwie *Sequential Indicator Simulation* należący do grupy algorytmów stochastycznych. Zastosowanie tej metodyki wynikało głównie z ilości dostępnych danych.

W efekcie powstał model litologiczny w wybranym bloku tektonicznym, w którym udział węgla kamiennego wynosi 15,88 %. Ogólne wyniki modelowania litologii w rejonie Pawłowice - Mizerów przedstawiono w Tabeli 1.1.16_36 oraz na Fig. 1.1.16_365.

Tab. 1.1.16_36 Zestawienie wyników modelowania litologicznego

Typ litologii	Udział procentowy [%]
Węgiel kamienny	15.88
łowiec	44.31
Piaskowiec	27.40
Mułowiec	12.15
Zlepianiec	0.23
Łupek węglowy	0.02

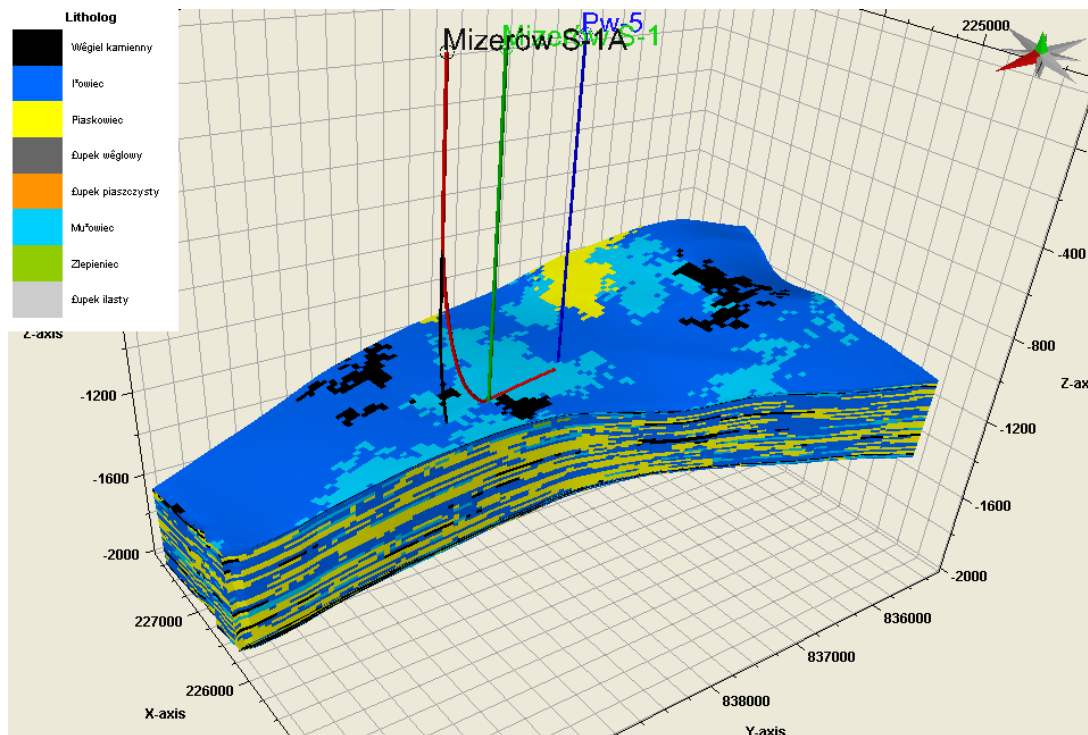


Fig. 1.1.16_365 Przestrzenny model litologiczny

Modelowanie parametrów jakościowych pokładów węgla

Na etapie modelowania parametrów jakościowych pokładów węgla analizowano zawartość i rozkład następujących parametrów węgla w pokładach 405 i 510:

- zawartość wilgoci,
- zawartość popiołu,
- zawartość części lotnych.

Podstawowy materiał wejściowy wykorzystany do budowy tych modeli obejmował laboratoryjne badania próbek z rdzeni otworów wiertniczych.

W procesie modelowania zmienności parametrów petrofizycznych zastosowano stochastyczny algorytm sekwencyjny *Sequential Gaussian Simulation*. Modelowanie przeprowadzono oddzielnie dla poszczególnych sekwencji tzn. osobno w pokładzie 405 i 510.

Poniżej przedstawiono wyniki modelowania zawartości wilgoci oraz popiołu w wytypowanych pokładach węgla.

Zawartość wilgoci

Istotnym czynnikiem wpływającym na efektywny przebieg procesu adsorpcji gazów na węglu jest zawartość wilgoci. Wielkość adsorpcji gazu jest odwrotnie proporcjonalna do zawartości wilgoci w węglu. Wiąże się to ściśle z ograniczeniem przestrzeni mikroporowej przez wodę lub też ze zjawiskiem pęcznienia węgla spowodowanego wilgocią. Według Mavora (Mavor i in.,1990) oraz Krossa (Kross i in., 2002) zawartość wilgoci w węglu ma tak znaczny wpływ na przebieg procesu adsorpcji, że nawet 1% wilgoci może zmniejszyć adsorpcję węgla aż do 65%. Wyniki analiz węgla holenderskich oraz polskich (kopalnie Silesia i Brzeszcze) stwierdzają, że obecność wilgoci znacznie zmniejsza adsorpcję CO₂, mając przy tym jednak mniejszy wpływ na adsorpcję metanu (Bush i in., 2006).

W opracowanym modelu zawartość wilgoci w węglu w pokładzie 405 zawiera się w przedziale od 0,3% do 2,0%. Natomiast pokład 510 charakteryzuje się w tym rejonie zmiennością zawartości wilgoci w przedziale od 0,25% do 1,02%. Powyższe parametry zebrano w Tabeli 1.1.16_37. Natomiast wyniki modelowania zawartości wilgoci w pokładach węgla przedstawiono na Fig. 1.1.16_366i 367.

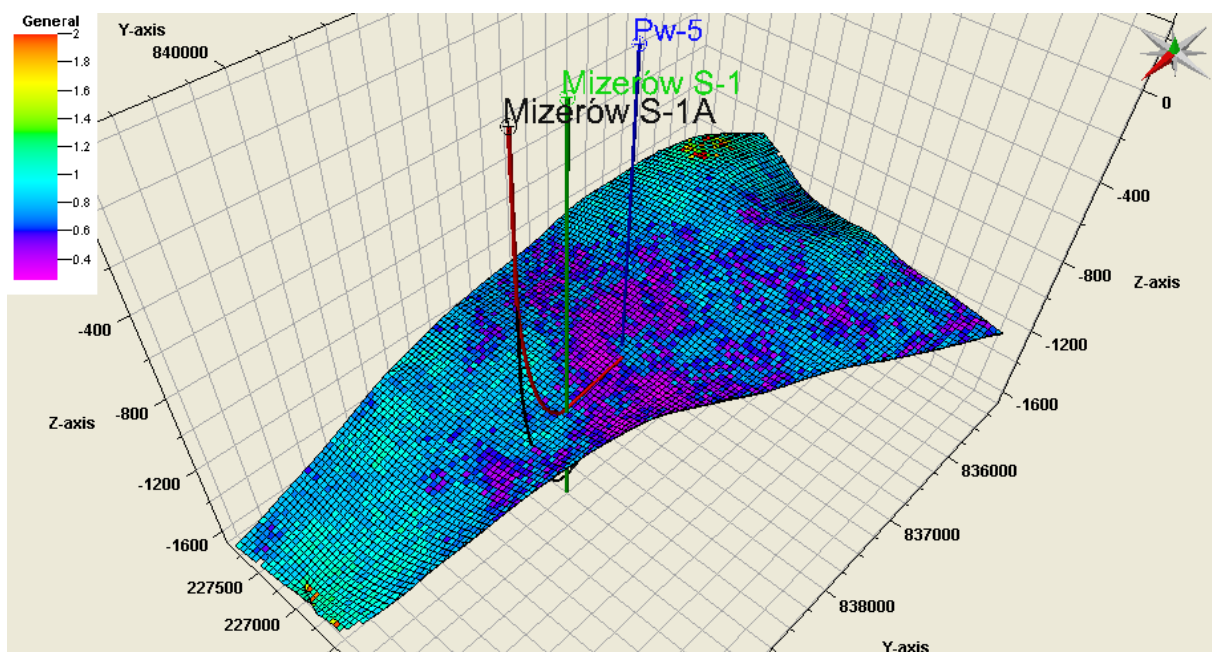


Fig. 1.1.16_366 Rozkład zawartości wilgoci w pokładzie 405

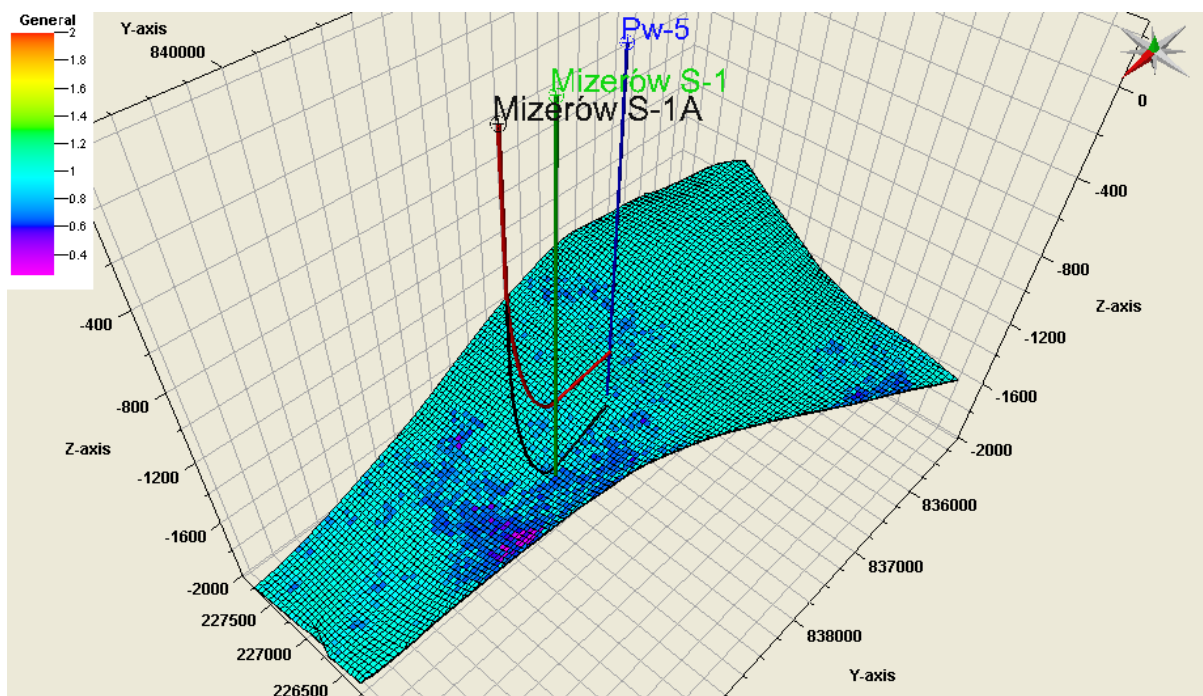


Fig. 1.1.16_367 Rozkład zawartości wilgoci w pokładzie 510

Tab. 1.1.16_37 Zawartość wilgoci w pokładach 405 i 510.

Pokład	Zawartość wilgoci [%]		
	min	max	średnia
405	0,3	2,0	0,78
510	0,25	1,02	0,77

Zawartość popiołu

Zawartość popiołu, która określa ilość substancji mineralnej w węglu, odpowiada w znacznym stopniu za właściwości sorpcyjne węgla. Im wyższa zawartość substancji mineralnej, tym mniejsza

sorpcyjność węgla. W związku z tym izotermi sorpcji dla węgla podawane są zazwyczaj dla stanu suchego i bezpopiołowego, a więc dla czystej substancji węglowej (Lutyński, 2008).

Wyniki modelowania zawartości popiołu w modelowanych pokładach zebrano w Tabeli 1.1.16_38. Rozkład przestrzenny tego parametru przedstawiono na Fig. 1.1.16_368i 369.

Tab.1.1.16_38 Zawartość popiołu w pokładach 405 i 510

Pokład	Zawartość popiołu [%]		
	min	max	średnia
405	2,63	33,68	8,82
510	3,49	13,76	7,06

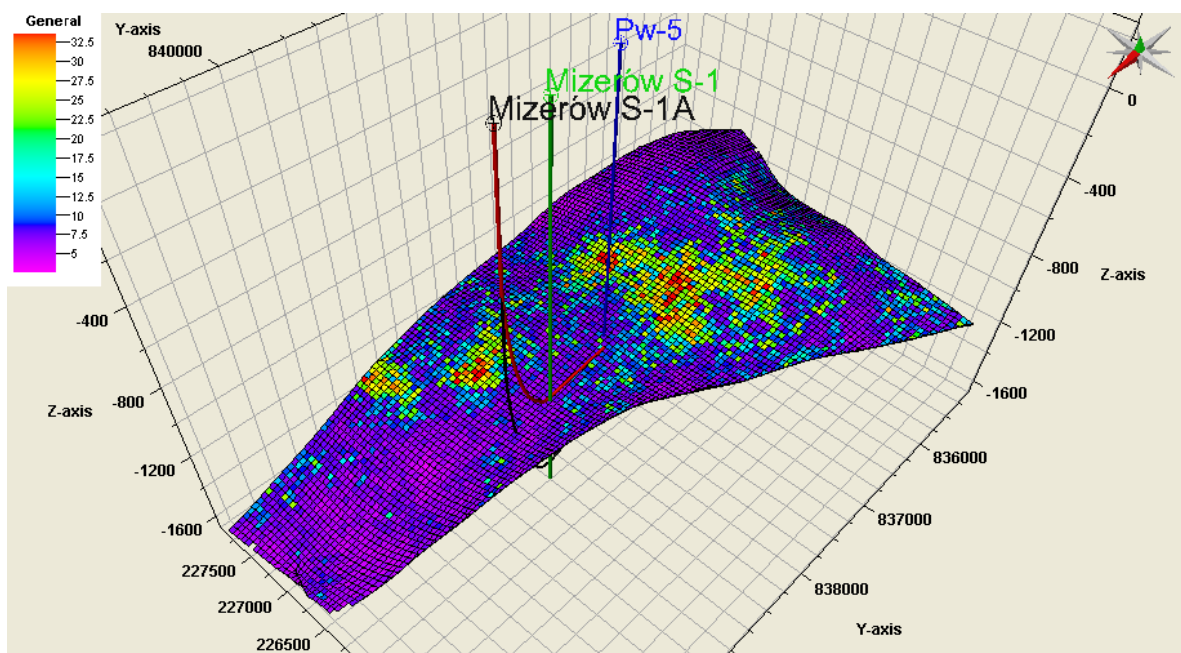


Fig. 1.1.16_368 Rozkład zawartości popiołu w pokładzie 405

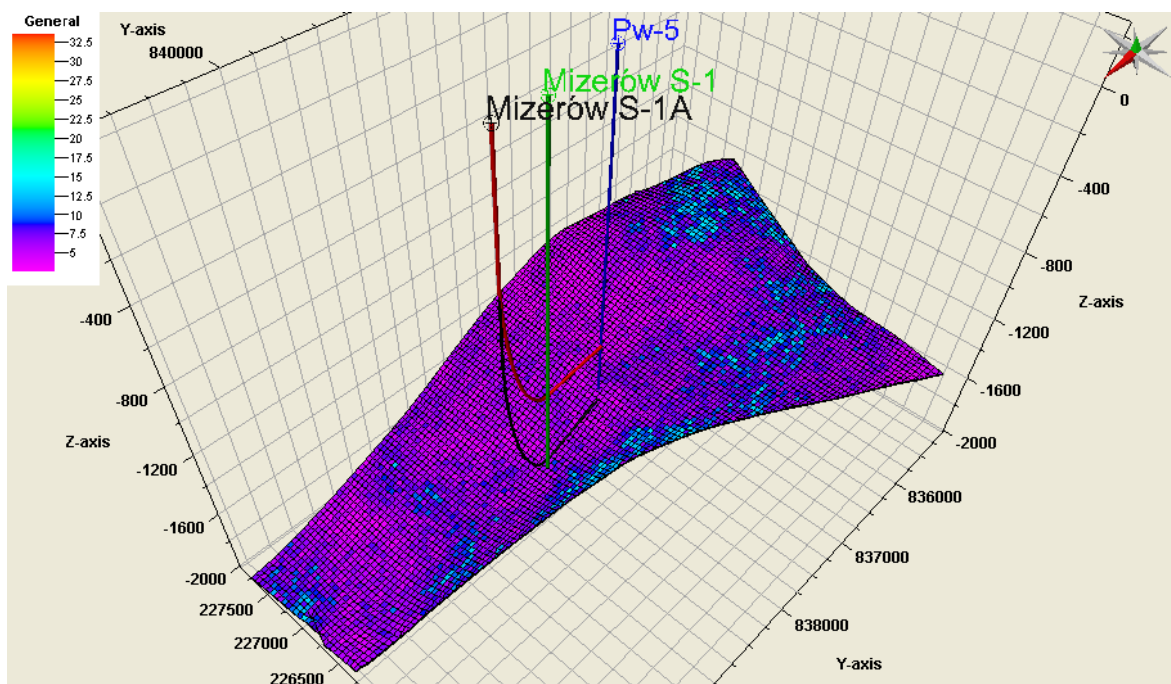


Fig. 1.1.16_369 Rozkład zawartości popiołu w pokładzie 510

Zawartość części lotnych

Zawartość części lotnych w modelowanych pokładach węgla zawiera się w przedziale wartości od 16,04 do 31,39% (pokład 405: od 21,21 do 31,39; pokład 510: od 16,04 do 30,25 %). Rozkład przestrzenny tego parametru przedstawiono na Fig. 1.1.16_370i Fig. 1.1.16_371. Wyniki modelowania zawartości części lotnych w modelowanych pokładach zebrano w Tabeli 1.1.16_39.

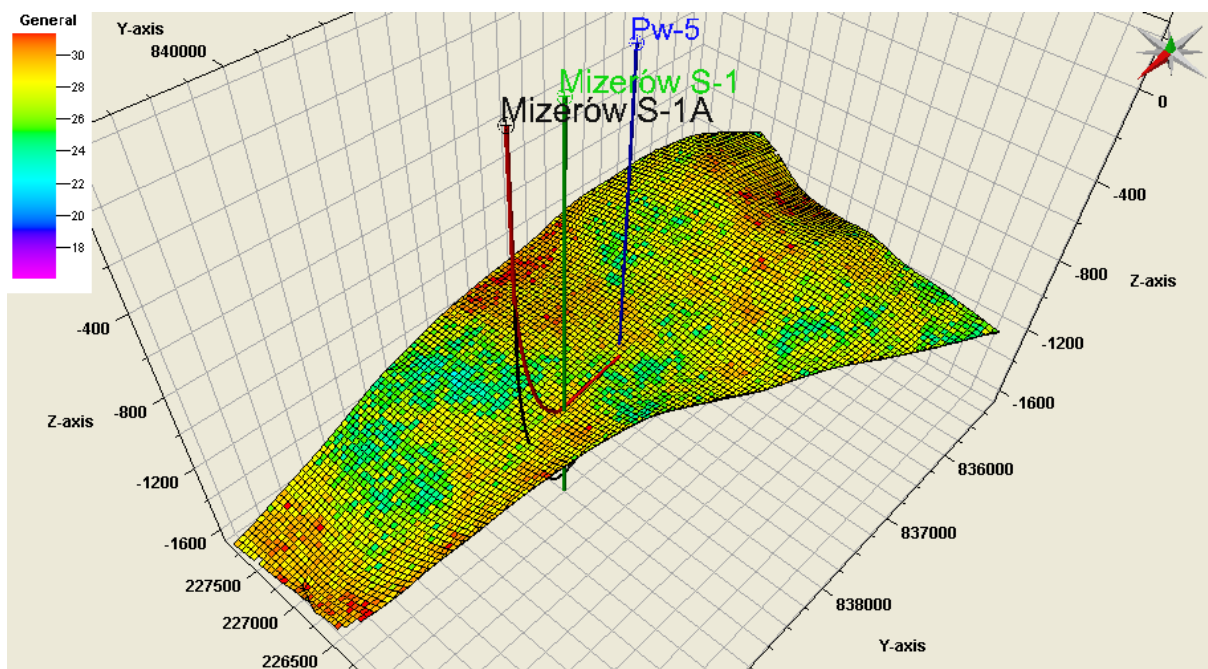


Fig. 1.1.16_370 Rozkład zawartości popiołu w pokładzie 405

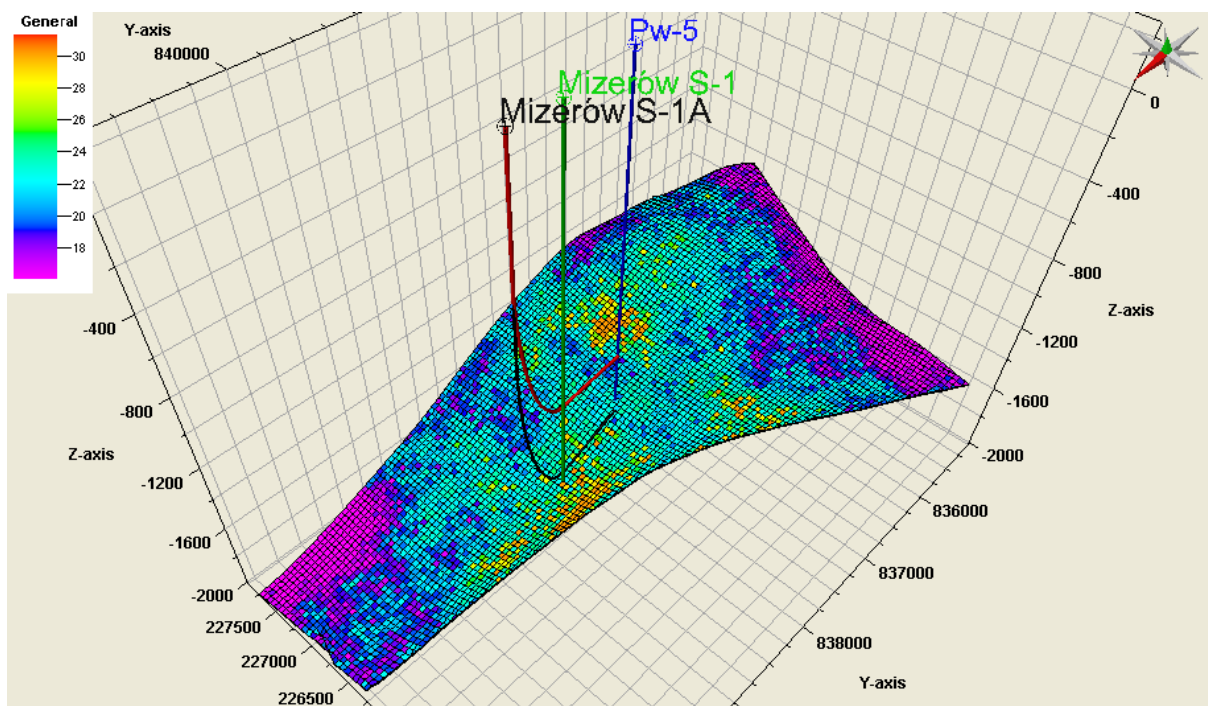


Fig. 1.1.16_371 Rozkład zawartości popiołu w pokładzie 510

Tab.1.1.16_39 Zawartość części lotnych w pokładach 405 i 510

Pokład	Zawartość części lotnych [%]		
	min	max	średnia
405	22,21	31,39	27,37
510	16,04	30,25	19,98

Zawartość metanu i rozkład metanonośności pokładów węgla

Metan występujący w obrębie górotworu górnokarbońskiego jest genetycznie związany z węglem. W złożach węgla kamiennego metan może występować w formie metanu sorbowanego (związanego fizyko-chemicznie z substancją węglową) lub też, jako metan wolny, który wypełnia pory i szczeliny w pokładzie węgla lub w skale płonej, szczeliny uskokowe itp.

Występowanie metanu wolnego w skałach płonych zależy od ich objętości, porowatości, stopnia nasycenia porów gazem i ciśnienia złożowego. Ilość metanu sorbowanego w węglu uzależniona jest głównie od własności sorpcyjnych węgla, a także od temperatury i ciśnienia złożowego. Akumulacji metanu w pokładzie sprzyja wzrost stopnia uwęglenia i wzrost ciśnienia, przy równoczesnym spadku wilgotności i temperatury węgla. Metan w złożach węgla kamiennego występuje głównie w jako metan sorbowany.

W opracowanym modelu zawartość metanu w wytypowanych pokładach węgla zawiera się w przedziale od 2,54 do 10,14 m³ CH₄/t csw. Szczegółowe dane dotyczące metanonośności pokładów 405 i 510, a więc objętościowej ilości metanu pochodzenia naturalnego zawartej w jednostce wagowej w głębi calizny węglowej, zebrano w **Tabeli 1.1.16_40**. Ponadto wyniki modelowania zawartości metanu i rozkładu metanonośności w pokładach węgla przedstawiono na **Fig. 1.1.16_372** i **Fig. 1.1.16_373**.

Tab.1.1.16_40 Zawartość metanu w pokładach 405 i 510

Pokład	Zawartość metanu [%]		
	min	max	średnia
405	2,54	10,05	4,20
510	2,98	6,76	3,80

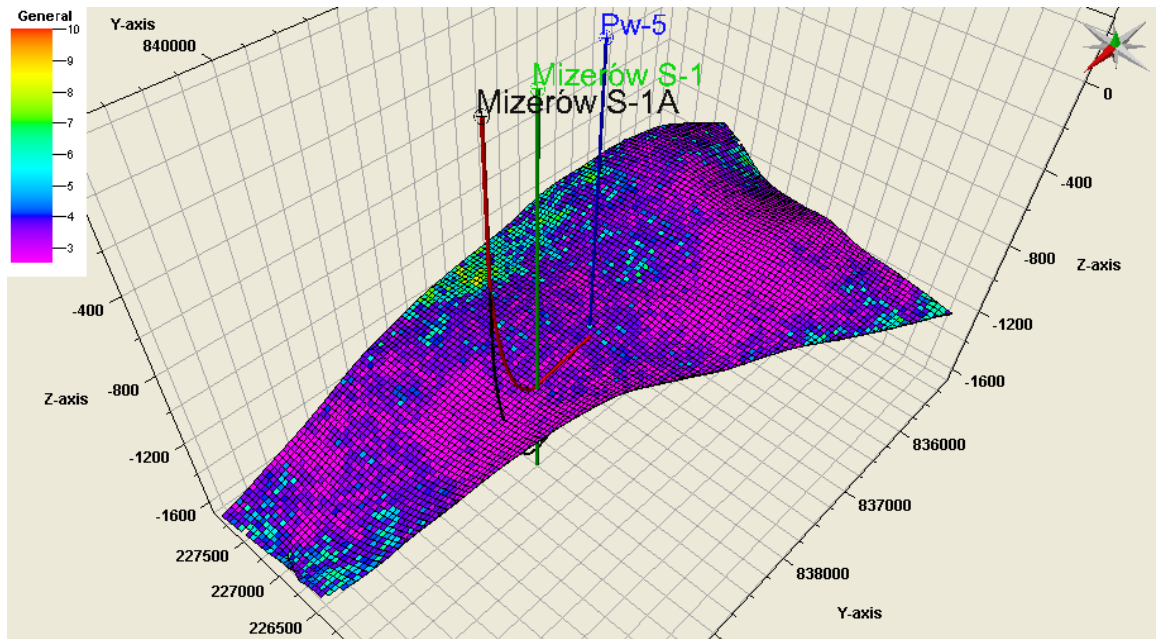


Fig. 1.1.16_372 Rozkład metanoności pokładu 405

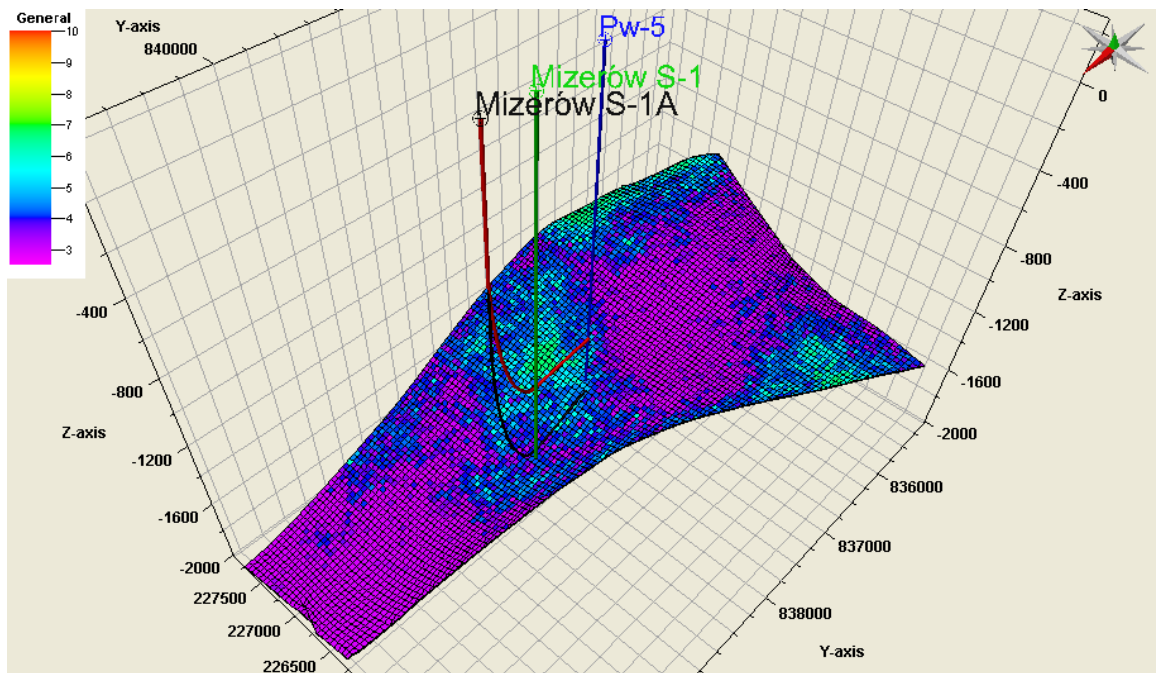


Fig. 1.1.16_373 Rozkład metanoności pokładu 510

Wykonanie alternatywnych wariantów modelowań dynamicznych zatłaczania CO₂ do pokładów węgla dla wspomagania wydobycia metanu, w wytypowanych lokalizacji w centralnej części GZW uwzględniając otwory poziome

(Jarosław Chećko, Janusz Jureczka)

Modelowanie dynamiczne

Budowa modeli symulacyjnych w pokładach węgla

W pierwszym etapie prac zbudowano statyczny model geologiczny pokładów 405 i 510 (Fig. 1.1.16_374). Następnie wykorzystano go do konstrukcji dynamicznych modeli symulacyjnych we wspomnianych pokładach węgla. W tym celu z opracowanego modelu numerycznego, obejmującego wybrany blok tektoniczny, wyodrębniono model o mniejszym zasięgu horyzontalnym (Fig. 1.1.16_374).

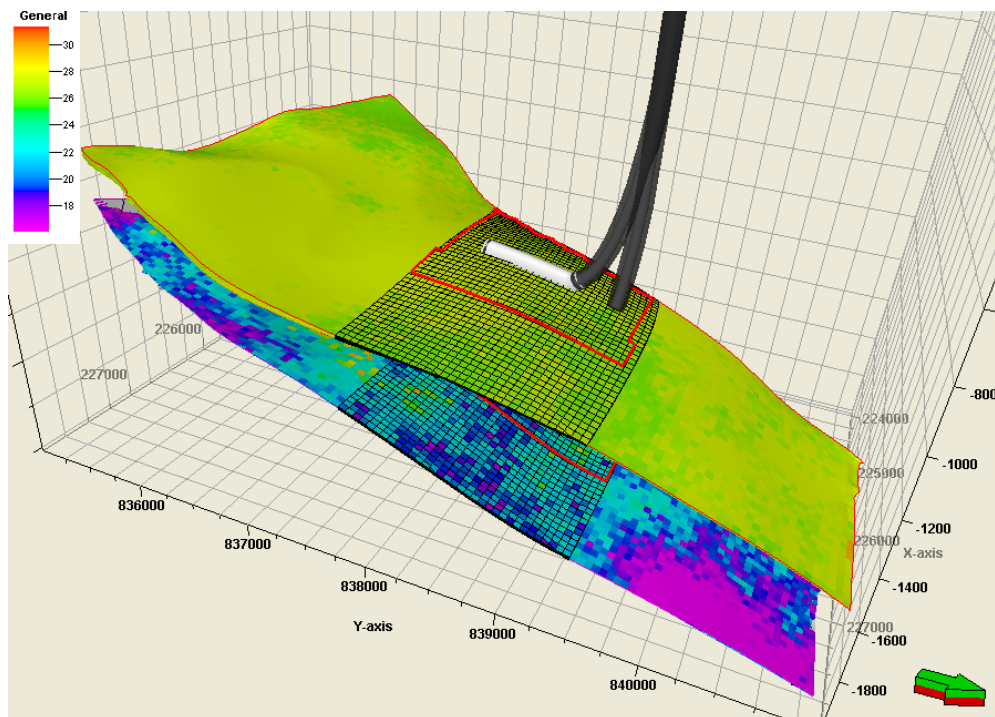


Fig. 1.1.16_374 Przestrzenny model pokładów 405 i 510

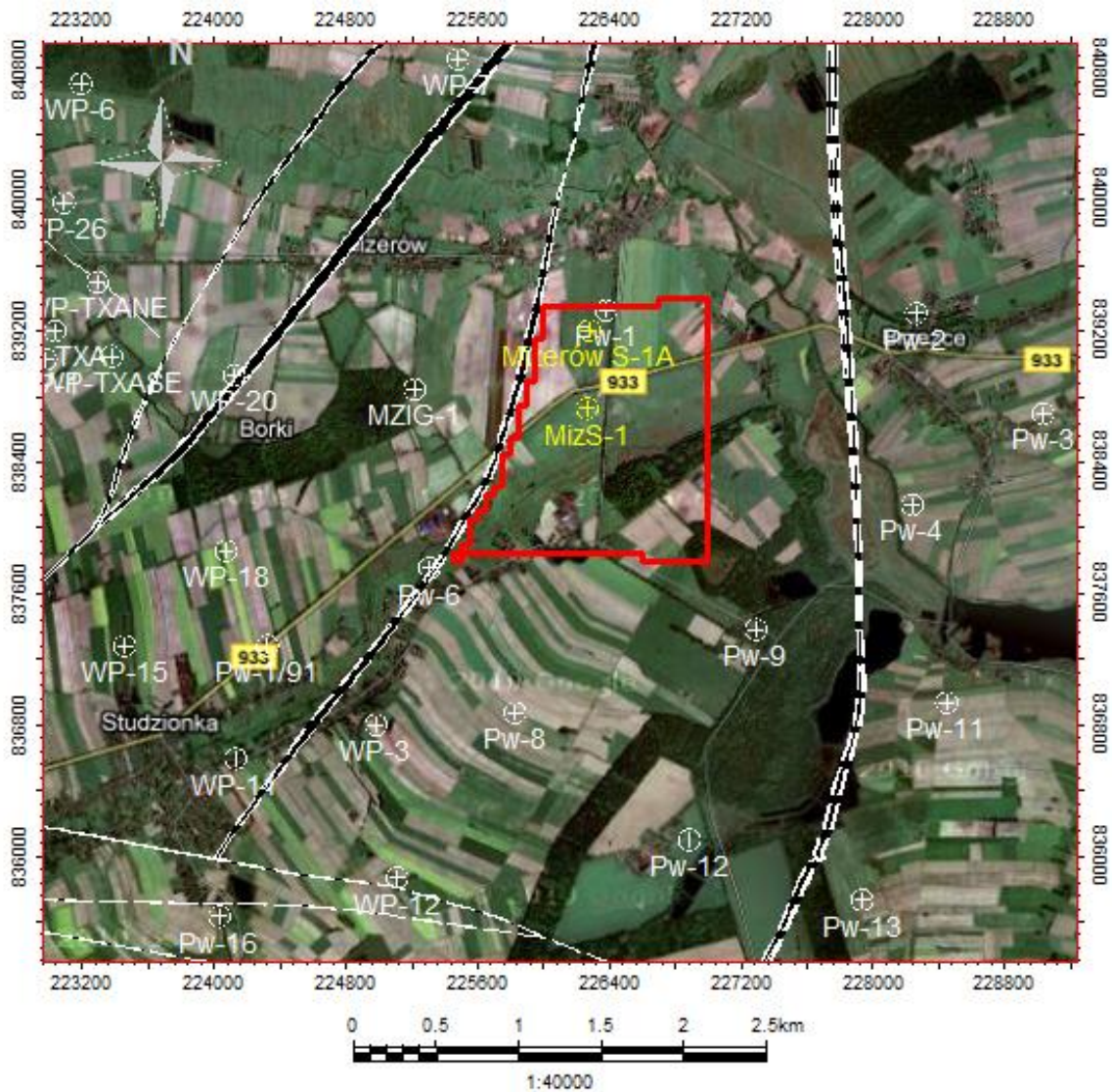


Fig. 1.1.16_375 Lokalizacja zasięgu modelu symulacyjnego

W wykonanym modelu numerycznym przeprowadzono szereg symulacji związanych z zatłaczaniem CO₂ do pokładu 405 i 510 przy wykorzystaniu horyzontalnego otworu iniekcyjnego Mizerów S-1A. Natomiast odwiert Pw-5 pełni w modelu funkcję otworu produkcyjnego (**Fig. 1.1.16_376**). Założona miąższość pokładu 405 wynosi 3 metry, a pokładu 510 – 8 metrów. Model skonstruowano na bazie regularnej siatki 50x50 bloków. Powierzchnia modelowanego obszaru wynosi 1,83679 km². Parametry konstrukcyjne modelu numerycznego do celów symulacji procesu zatłaczania CO₂ do pokładów węgla zebrano w **Tabelo1.1.16_41**.

Tab.1.1.16_41 Parametry konstrukcyjne modelu pokładów 405 i 510

Parametr	Pokład 405	Pokład 510
Miąższość [m]	3,0	8,0
Głębokość [m]	1333 - 1516	1640 - 1967
Powierzchnia modelu [m ²]	1 836 790	
Horyzontalna rozdzielczość siatki interpolacyjnej [m]	50x50	
Pionowa rozdzielczość modelu [m]	1,0	2,66
Porowatość szczelinowa [%]	0,5	
Przepuszczalność X,Y,Z [mD]	1,5	

Założenia do modelowania przy użyciu symulatora Eclipse

Do symulacji procesów zatłaczania CO₂ do pokładów węgla 405 i 510 wykorzystano kompozycyjną wersję symulatora ECLIPSE z opcją Coal Bed Methane, która uwzględnia zjawiska towarzyszące procesowi zatłaczania CO₂ do pokładów węgla. Obejmuje to główne mechanizmy odpowiadające za przepływ wody i gazu w pokładzie węgla (desorpcja gazu z matrycy węglowej do systemu szczelin, dyfuzja w matrycy zgodna z prawem Ficka, przepływ Darcy'ego w szczelinach), zjawisko kurczenia się i pęcznienia matrycy węglowej, proces wymiany chemicznej cząsteczek CO₂ w miejsce CH₄.

Podwójna porowatość

Symulator Eclipse uwzględnia w modelu podwójną porowatość. Model składa się z dwóch połączonych ze sobą systemów reprezentujących matrycę węglową oraz system szczelin. Metan magazynowany jest poprzez sorpcję w bardzo słabo przepuszczalnej matrycy węglowej charakteryzującej się odmienną porowatością w stosunku do szczelin, w których zachodzi zjawisko przepływu zdesorbowanego gazu. W związku z tym w modelach o podwójnej porowatości liczba warstw jest podwajana, a obliczenia w trakcie symulacji są prowadzone dla podwójnej ilości komórek.

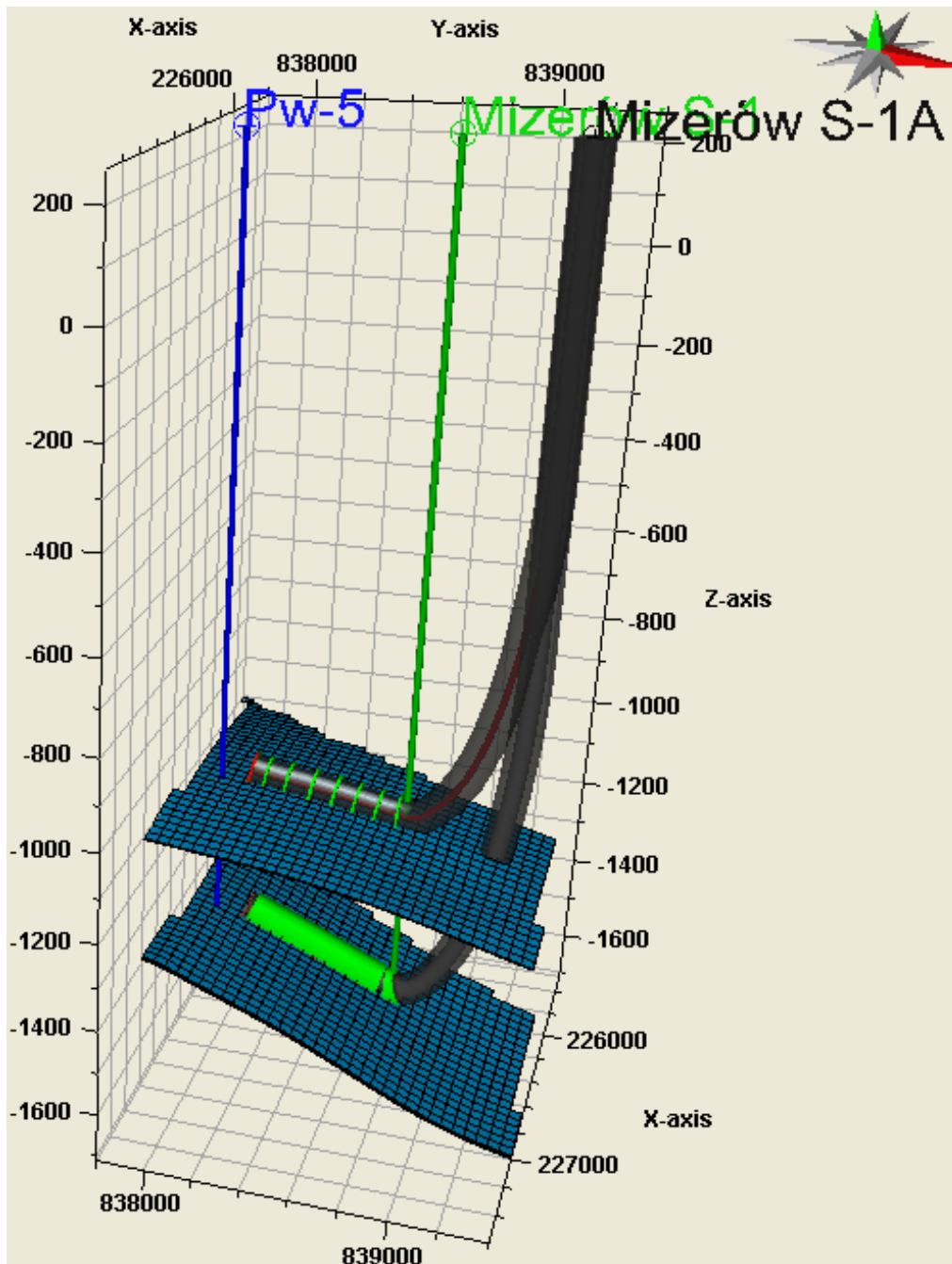


Fig. 1.1.16_376 Rozmieszczenie otworów w modelu pokładów 405 i 510

Izotermy adsorpcji

Model adsorpcji gazów na węglu jest opisany w Eclipse 300 za pomocą rozszerzonej izotermy Langmuira (Arri, 1992). Dla każdego z gazów (CO_2 i CH_4) wymagane jest wprowadzenie parametrów izotermy Langmuira, tzn. objętości i ciśnienia Langmuira. Symulator Eclipse 300 wymaga założenia początkowego stężenia gazu w węglu poprzez wprowadzenie objętości gazu w masie skały podstawowej (sm^3/kg). Oprogramowanie Eclipse definiuje jednostkę sm^3/kg jako metr sześcienny

gazu (przy ciśnieniu 1 atm=1013,25 hPa i temperaturze 15,56 °C) na kilogram węgla w warunkach *in situ*.

W opracowanym modelu wykorzystano dane wyznaczone laboratoryjnie w trakcie realizacji projektu RECOPOL (Wageningen, Maas, 2007). Szczegółowe parametry wykorzystane w symulacji zebrano w **Tabeli.1.1.16_42**.

Tab.1.1.16_42 Parametry wykorzystane w trakcie modelowania

Parametr	Pokład 405	Pokład 510	Jednostka
Ciśnienie początkowe w pokładzie w miejscu iniekcji	110.4 - 115.7	143.4 - 157.3	bar
Gęstość węgla	1330.0		kg/m ³
Współczynnik dyfuzji CH ₄	0.0000685		m ² /d
Współczynnik dyfuzji CO ₂	0.000139		m ² /d
Min. ciśnienie produkcji	5		bar
Max. ciśnienie zatłaczania	165	175	bar
Parametry rozszerzonej izotermy Langmuira			
CH ₄ , objętość V _L	0.0205		sm ³ /kg
CH ₄ , ciśnienie P _L	42.0		bar
CO ₂ , objętość V _L	0.0320		sm ³ /kg
CO ₂ , ciśnienie P _L	19.03		bar

Krzywa przepuszczalności względnych

W modelowaniu wykorzystano krzywe zależności przepuszczalności względnych od nasycenia wodą (**Fig. 1.1.16_377**) wyznaczone podczas realizacji projektu pilotażowego CBM prowadzonego na obszarze GZW przez firmę Texaco (Cants i In., 2001). Zależności te wykorzystano podczas modelowania dynamicznego w ramach realizacji projektu RECOPOL (Reeves, Taillefert, 2002).

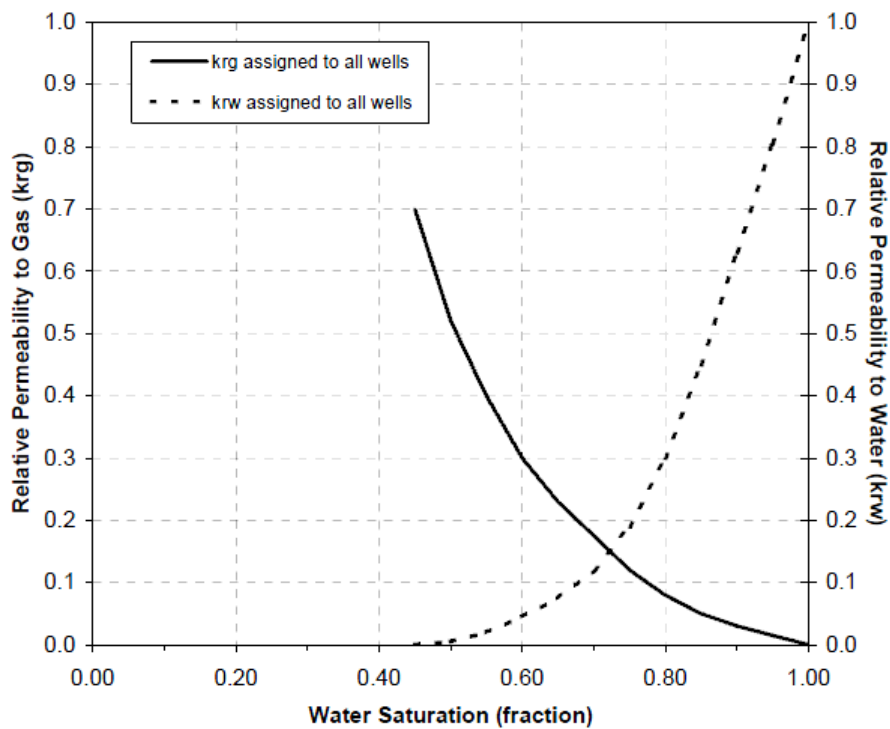


Fig. 1.1.16_377 Zależność przepuszczalności względnych od nasycenia wodą (Reeves, Taillefert, 2002).

Warianty zatłaczania

Symulacje procesu sekwestracji CO₂ w pokładach węgla przeprowadzono według trzech scenariuszy zatłaczania zróżnicowanych ze względu na zastosowaną metodykę procesu zatłaczania (Tab.1.1.16_43).

Tab.1.1.16_43 Zestawienie rozpatrywanych scenariuszy symulacji

Scenariusz	Zastosowana metodyka procesu zatłaczania CO ₂
1	Otwory kierunkowe z perforacją, brak procesu szczelinowania
2	Otwory kierunkowe z perforacją, jednokrotne szczelinowanie
3	Otwory kierunkowe z perforacją, dwukrotne szczelinowanie

We wszystkich scenariuszach symulacji zatłaczania zastosowano otwory kierunkowe z perforacją rur okładzinowych. Celem perforacji jest osiągnięcie maksymalnej produktywności otworu w optymalny sposób i ustanowienie dobrego połączenia pomiędzy otworem wiertniczym a formacją złożową (Frodyma 2011). Poszczególne scenariusze symulacji różniły się w kwestii zastosowania zabiegu szczelinowania. Szczelinowanie hydrauliczne stosowane w odwiertach kierunkowych jest jednym z podstawowych zabiegów mających na celu poprawę parametrów strefy przyodwiertowej. Głównym celem zabiegu szczelinowania jest zwiększenie przepuszczalności skał i poprawa wymiany gazu między odwiertem a górotworem.

W scenariuszu pierwszym analizowano zatłaczanie dwutlenku węgla bez zabiegu szczelinowania. W drugim ze scenariuszy symulacji przeprowadzono szczelinowanie w 20-tu interwałach głębokości po upływie 6 miesięcy od rozpoczęcia zatłaczania. Natomiast w scenariuszu numer 3 zabieg szczelinowania podzielono na dwa etapy. W pierwszej fazie szczelinowano w 12 interwałach głębokości po 1 miesiącu od rozpoczęcia szczelinowania w fazie symulacji, gdy zaobserwowano znaczny spadek wydajności zatłaczania. W drugim etapie zastosowano szczelinowanie w 8 kolejnych interwałach głębokości po upływie 6 miesięcy od rozpoczęcia zatłaczania. Rozmieszczenie interwałów szczelinowania w otworach iniekcyjnych przedstawiono schematycznie na Fig. 1.1.16_378.

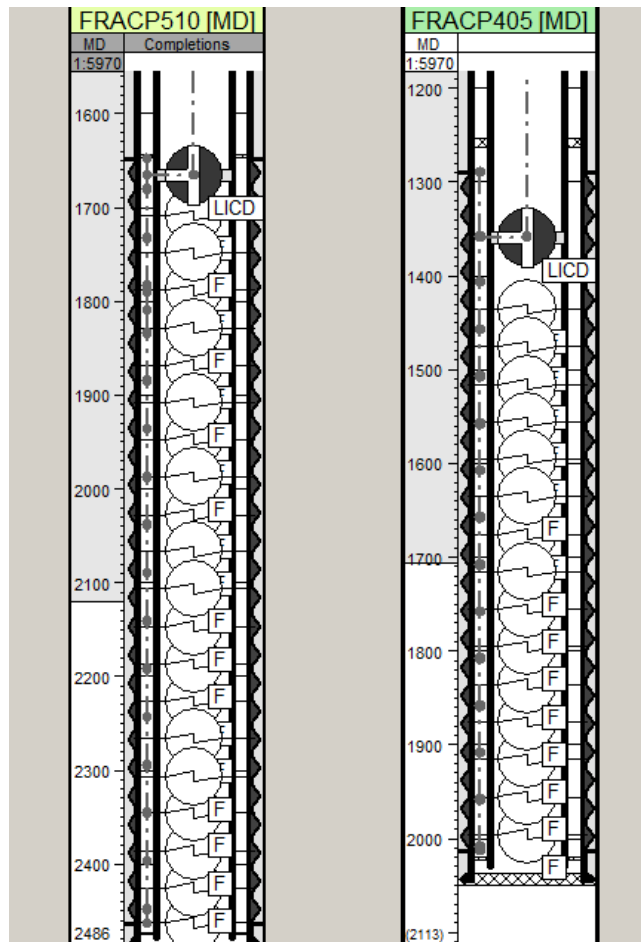


Fig. 1.1.16_378 Rozmieszczenie interwałów szczelinowania w otworach iniekcyjnych

Dodatkowo w każdym ze scenariuszy założono trzy warianty symulacji zróżnicowane pod względem wydajności oraz czasu trwania procesu zatłaczania (**Tab.1.1.16_44**).

Tab.1.1.16_44 Zestawienie rozpatrywanych wariantów symulacji

Wariant	Czas trwania początkowej fazy produkcji metanu i wody [w latach]	Czas trwania fazy zatłaczania CO ₂ [w latach]	Czas trwania fazy obserwacji modelu po zakończeniu zatłaczania CO ₂ [w latach]	Założona wydajność zatłaczania [sm ³ /d]
1	0,5	1	5	40 000

2	0,5	1	5	100 000
3	0,5	5	5	100 000

W każdym z trzech założonych wariantów zatłaczania przez pierwsze sześć miesięcy symulacji ma miejsce początkowa faza produkcji wody i metanu, jednak zaznacza się na tym etapie symulacji wyraźna dominacja produkcji wody względem produkcji metanu. Do wspomnianej produkcji wykorzystane są dwa otwory kierunkowe oraz jeden odwiert pionowy. Po upływie 6 miesięcy od rozpoczęcia symulacji rozpoczyna się zatłaczanie CO₂ do pokładu węgla, przy wykorzystaniu dwóch otworów kierunkowych pełniących poprzednio funkcję odwiertów produkcyjnych. Faza iniekcji dwutlenku węgla trwa nieprzerwanie przez 1 rok lub 5 lat w zależności od przyjętego wariantu symulacji. Natomiast symulacje procesu migracji CO₂ w analizowanej strukturze prowadzono we wszystkich wariantach dla 5-letniego interwału czasowego po zakończeniu zatłaczania.

Dla każdego z odwiertów założono wielkość iniekcji rzędu 40 000 sm³/d lub 100 000 sm³/d w zależności od przyjętego wariantu symulacji. Maksymalna założona wydajność zatłaczania na poziomie 100 000 sm³/d wynika z próby osiągnięcia maksymalnej produktywności otworów iniekcyjnych.

Wyniki symulacji

Przez pierwsze sześć miesięcy każdej z przeprowadzonych symulacji zaznacza się wyraźna dominacja produkcji wody z pokładu. W tym czasie obserwowane jest zmniejszanie ciśnienia w górotworze spowodowane rozpoczęciem produkcji wody z pokładu. Proces ten wywołuje desorpcję metanu z matrycy węglowej. Po upływie 6 miesięcy od rozpoczęcia symulacji rozpoczyna się zatłaczanie CO₂ do pokładu węgla, które trwa nieprzerwanie przez 1 rok (lub 5 lat dla wariantu nr 2). Symulacja procesu migracji gazów po zaprzestaniu iniekcji prowadzona jest przez 5 lat. Na **Fig. 1.1.16_379**. przedstawiono wydatki dobowe produkowanej wody oraz zatłaczanego dwutlenku węgla.

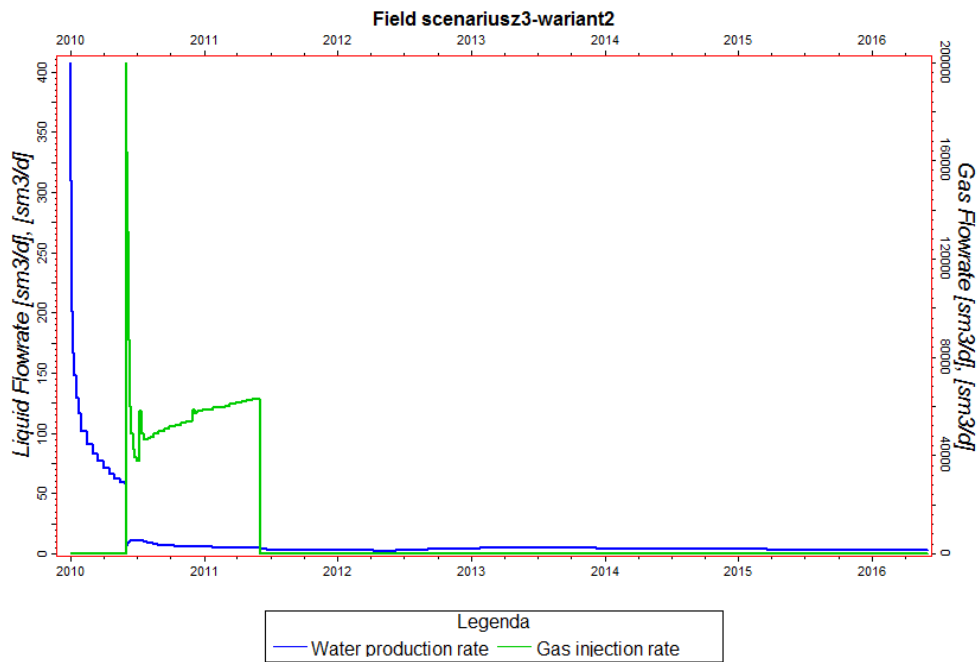


Fig. 1.1.16_379 Wydatki dobowe produkowanej wody oraz zatłaczanego dwutlenku węgla.

Na Fig. 1.1.16_380 przedstawiono porównanie zmian wydajności zatłaczania dla wariantów symulacji zróżnicowanych ze względu na wpływ zabiegu szczelinowania hydraulicznego.

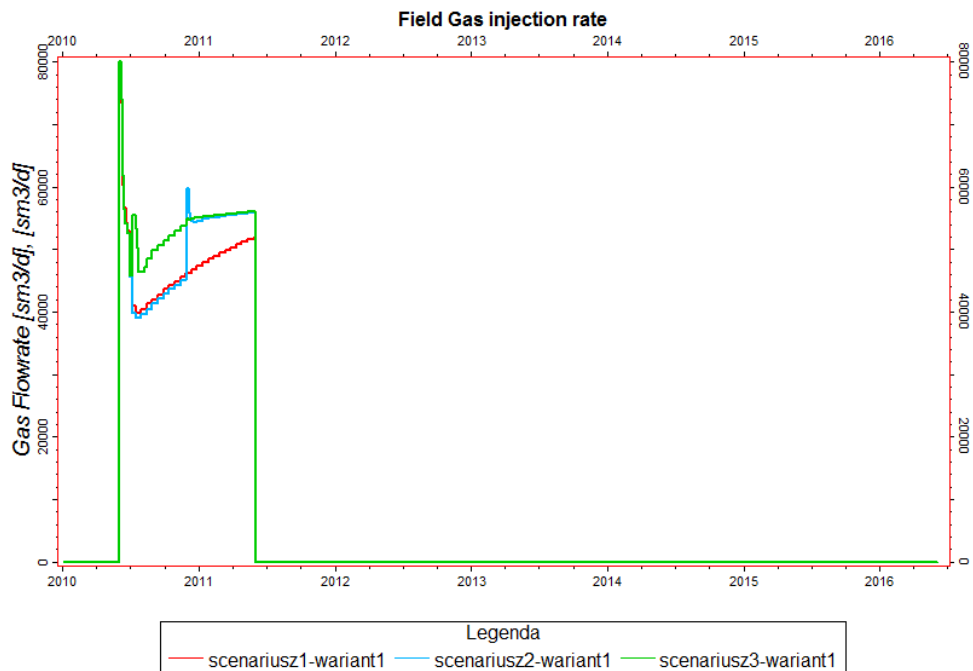


Fig. 1.1.16_380 Porównanie zmian wydajności zatłaczania dla poszczególnych wariantów symulacji (na czerwono - bez szczelinowania, na niebiesko - jednokrotne szczelinowanie, na zielono – dwukrotne szczelinowanie)

W Tabeli 1.1.16_45 zestawiono wyniki modelowania dotyczące sumarycznej ilości zatłoczonego CO₂ w poszczególnych wariantach symulacji. Z tego zestawienia wynika, że największe sumaryczne ilości dwutlenku węgla odpowiadają scenariuszowi symulacji obejmującemu zatłaczanie stymulowane poprzez zastosowanie dwukrotnego zabiegu szczelinowania.

W Tab.1.1.16_46 zestawiono wyniki modelowania dotyczące sumarycznych ilości gazów uzyskanych z otworów produkcyjnych w poszczególnych wariantach symulacji. Z uzyskanych wyników symulacji wynika, że najwięcej metanu otrzymano w trakcie symulacji procesu zatłaczania obejmującego jednokrotny zabieg szczelinowania. Największe ilości CH₄ produkowane są podczas zatłaczania CO₂ przez okres 5 lat, jednak wiąże się to ściśle ze wzrostem wstecznej produkcji zatłoczonego wcześniej dwutlenku węgla, która utrzymuje osiąga w tym wariantcie poziom 41-50% uzyskanej mieszaniny gazów. Wynika z tego, że bardziej korzystne wydaje się zatłaczanie zgodne z wariantem nr 2, w którym wsteczna produkcja CO₂ utrzymuje się na poziomie 16-20%. W tym wariantcie najefektywniejsze wydaje się być zatłaczanie według scenariusza nr 2 i 3 (zatłaczanie z zabiegiem szczelinowania przez okres 1 roku). Porównanie wyników wydajności zatłaczania dla tych scenariuszy symulacji przedstawiono w sposób graficzny na Fig. 1.1.16_381, a wyniki sumarycznej iniekcji CO₂ – na Fig. 1.1.16_382. Natomiast porównanie wyników produkcji CO₂ i CH₄ dla wspomnianych scenariuszy symulacji zilustrowano na Fig. 1.1.16_383. Z tego wykresu wynika, że przy porównywalnych ilościach uzyskanego metanu w obydwu scenariuszach symulacji wielkość wstecznej produkcji CO₂ jest nieco mniejsza dla scenariusza nr 2. Na Fig. 1.1.16_384 i 385 przedstawiono zmiany wydajności produkcji metanu i dwutlenku węgla podczas trwania obydwu symulacji.

W trakcie modelowania procesu zatłaczania dwutlenku węgla rejestrowano także zmiany średniego ciśnienia w strefie zatłaczania. Porównanie zmian ciśnienia dla dwóch najefektywniejszych scenariuszy symulacji przedstawiono na Fig. 1.1.16_386.

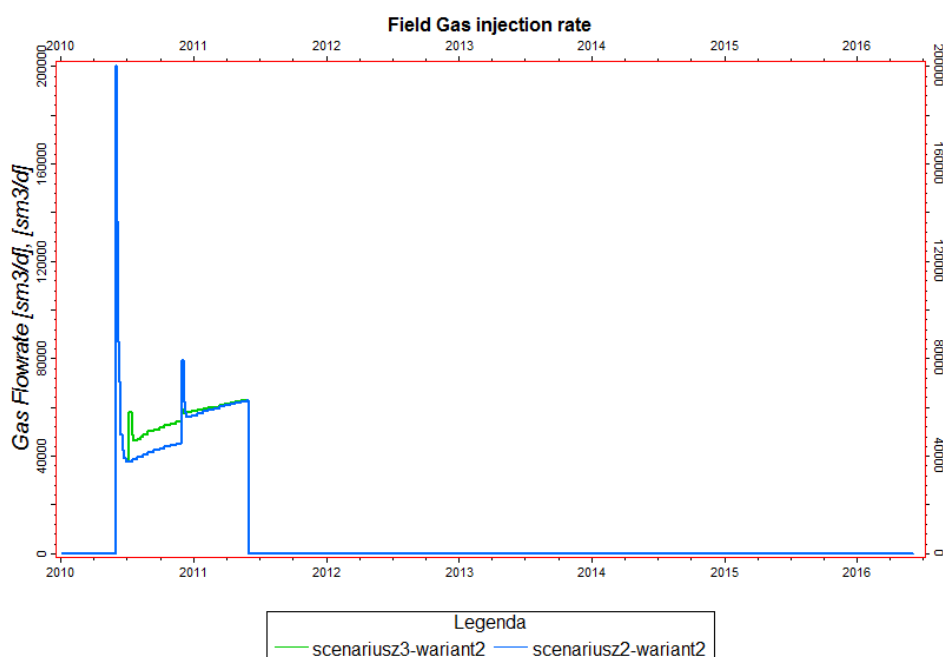


Fig. 1.1.16_381 Porównanie wydatku zatłaczania CO₂ dla dwóch najlepszych scenariuszy symulacji

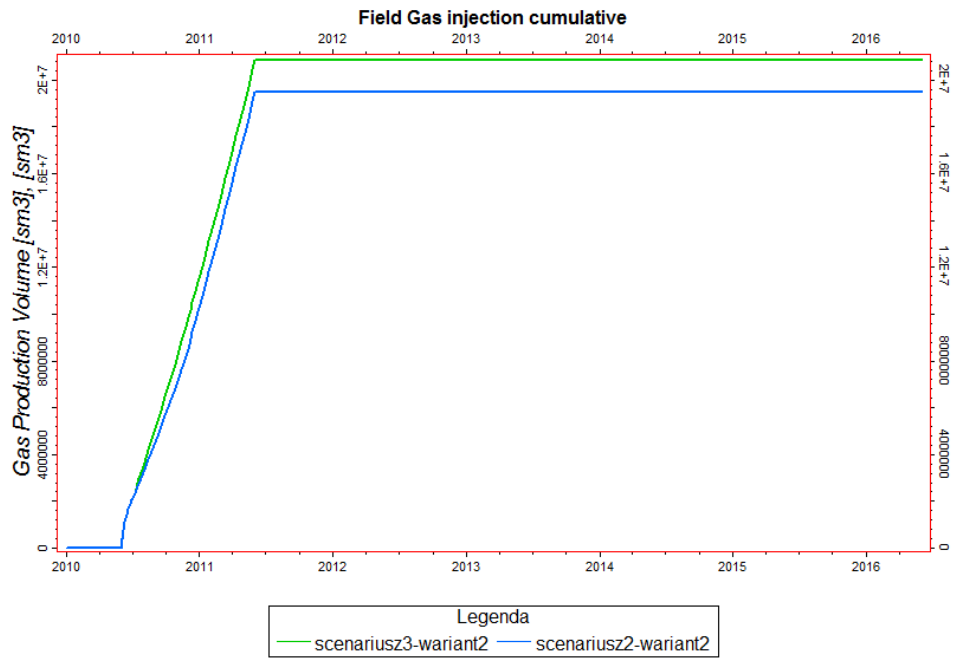


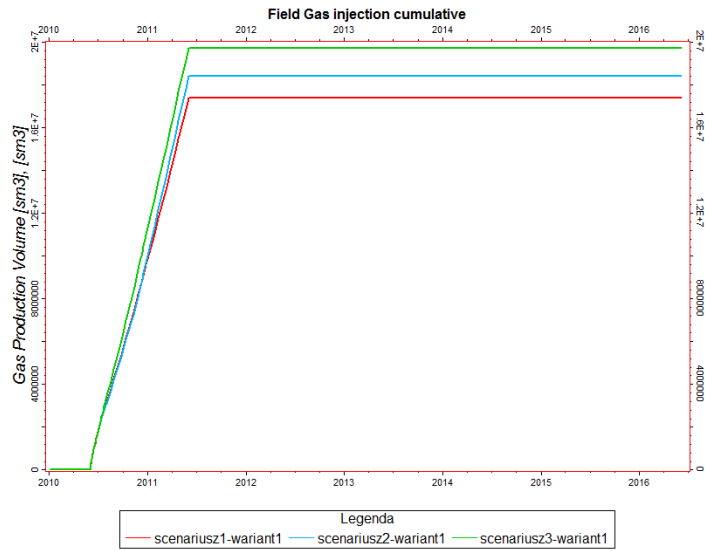
Fig. 1.1.16_382 Porównanie wyników sumarycznej iniekcji CO2 dla dwóch najkorzystniejszych scenariuszy symulacji

Tab.1.1.16_45 Zestawienie sumarycznych ilości zatłoczonego CO₂ w poszczególnych wariantach symulacji

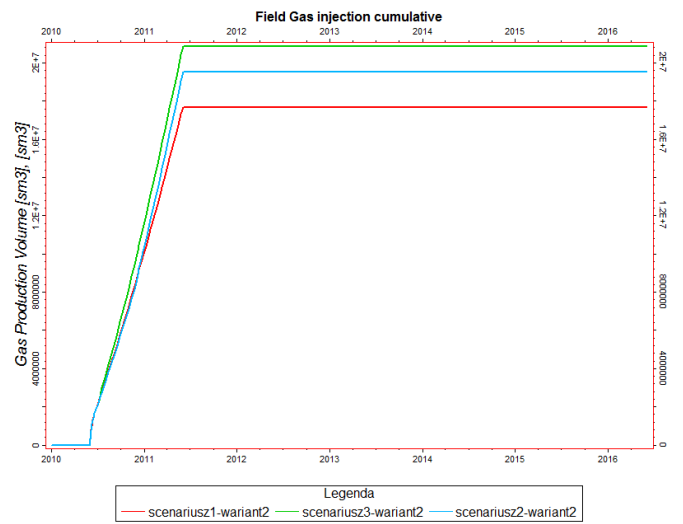
Wariant	<u>Scenariusz 1</u> Z PERFORACJĄ, BEZ SZCZELINOWANIA		<u>Scenariusz 2</u> Z PERFORACJĄ, JEDNOKROTNE SZCZELINOWANIE		<u>Scenariusz 3</u> Z PERFORACJĄ, DWUKROTNE SZCZELINOWANIE	
	Sumaryczna objętość zatłoczonego CO ₂	Sumaryczna masa zatłoczonego CO ₂	Sumaryczna ilość zatłoczonego CO ₂	Sumaryczna masa zatłoczonego CO ₂	Sumaryczna ilość zatłoczonego CO ₂	Sumaryczna masa zatłoczonego CO ₂
1	17 388 926 sm ³ = 49 984 rm ³	~ 34 989 t	18 389 246 sm ³ = 52 625 rm ³	~ 36 838 t	19 726 430 sm ³ = 55 898 rm ³	~ 39 129 t
2	17 670 352 sm ³ = 51 358 rm ³	~35 950 t	19 507 764 sm ³ = 55 728 rm ³	~ 39 009 t	20 866 990 sm ³ = 59 080 rm ³	~ 41 356 t
3	104 773 512 sm ³ = 289 409 rm ³	~202 586 t	122 261 368 sm ³ = 330 236 rm ³	~ 231 165 t	123 302 512 sm ³ = 332 847 rm ³	~ 232 993 t

Tab.1.1.16_46 Zestawienie sumarycznych ilości produkcji gazów w poszczególnych wariantach symulacji

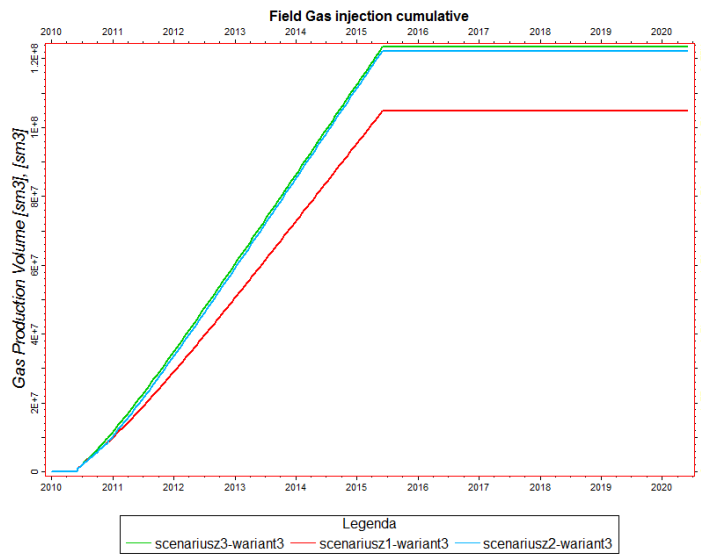
Wariant	Scenariusz 1 Z PERFORACJĄ, BEZ SZCZELINOWANIA			Scenariusz 2 Z PERFORACJĄ, JEDNOKROTNE SZCZELINOWANIE			Scenariusz 3 Z PERFORACJĄ, DWUKROTNE SZCZELINOWANIE		
	Sumaryczna ilość produkcji mieszanki gazów	Sumaryczna ilość produkcji metanu	Udział wstecznej produkcji CO2	Sumaryczna ilość produkcji mieszanki gazów	Sumaryczna ilość produkcji metanu	Udział wstecznej produkcji CO2	Sumaryczna ilość produkcji mieszanki gazów	Sumaryczna ilość produkcji metanu	Udział wstecznej produkcji CO2
1	42 842 216 sm ³	36 203 704 sm ³	6 691 152 sm ³ (15 %)	45 458 112 sm ³	37 448 560 sm ³	7 703 918 sm ³ (17%)	46 516 568 sm ³	37 754 192 sm ³	9 011 599 sm ³ (19%)
2	43 019 456 sm ³	36 275 956 sm ³	6 743 501 sm ³ (16 %)	46 181 608 sm ³	37 995 048 sm ³	8 186 559 sm ³ (18%)	47 251 828 sm ³	37 734 032 sm ³	9 517 795 sm ³ (20%)
3	106 653 776	62 416 424 sm ³	44 200 840 sm ³ (41%)	126 898 176 sm ³	64 309 684 sm ³	62 588 488 sm ³ (49%)	127 994 552 sm ³	63 927 492 sm ³	64 067 060 sm ³ (50%)



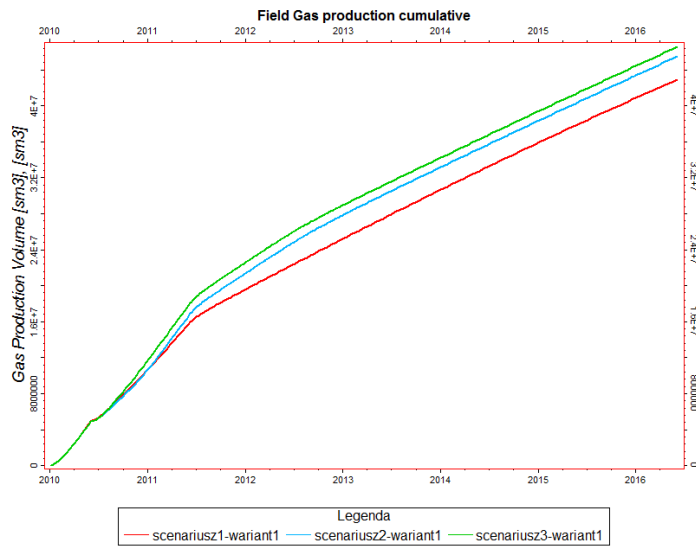
Iniekcja- wariant 1



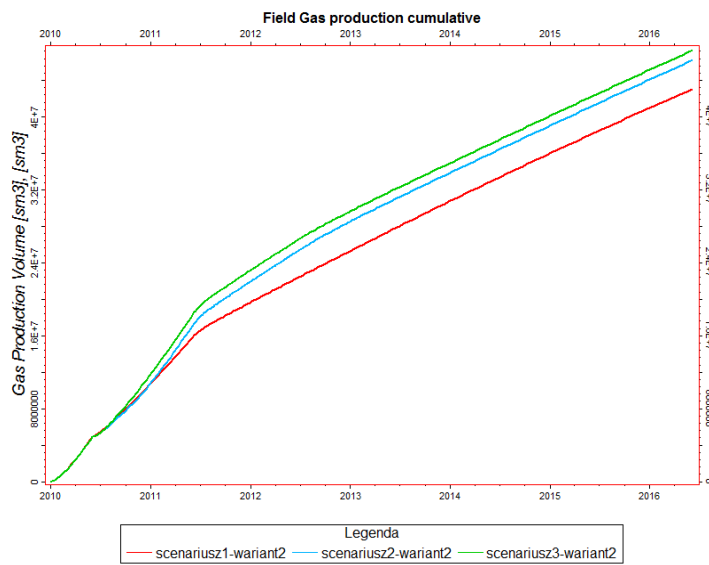
Iniekcja- wariant 2



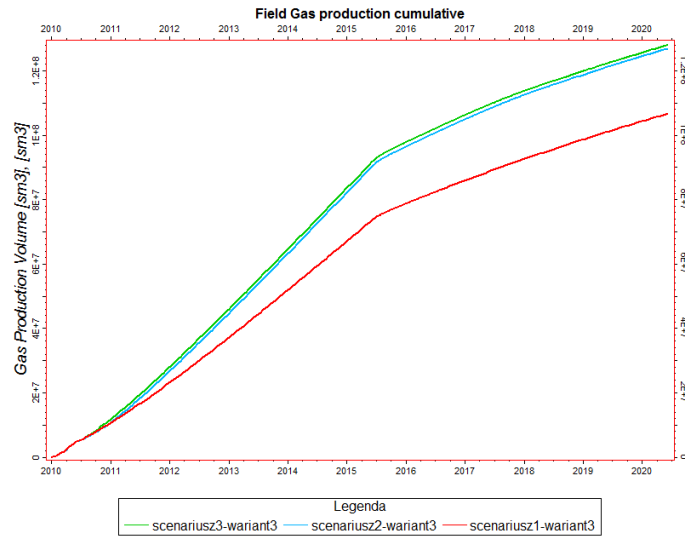
Iniekcja- wariant 3



Produkcja - wariant 1



Produkcja - wariant 2



Produkcja - wariant 3

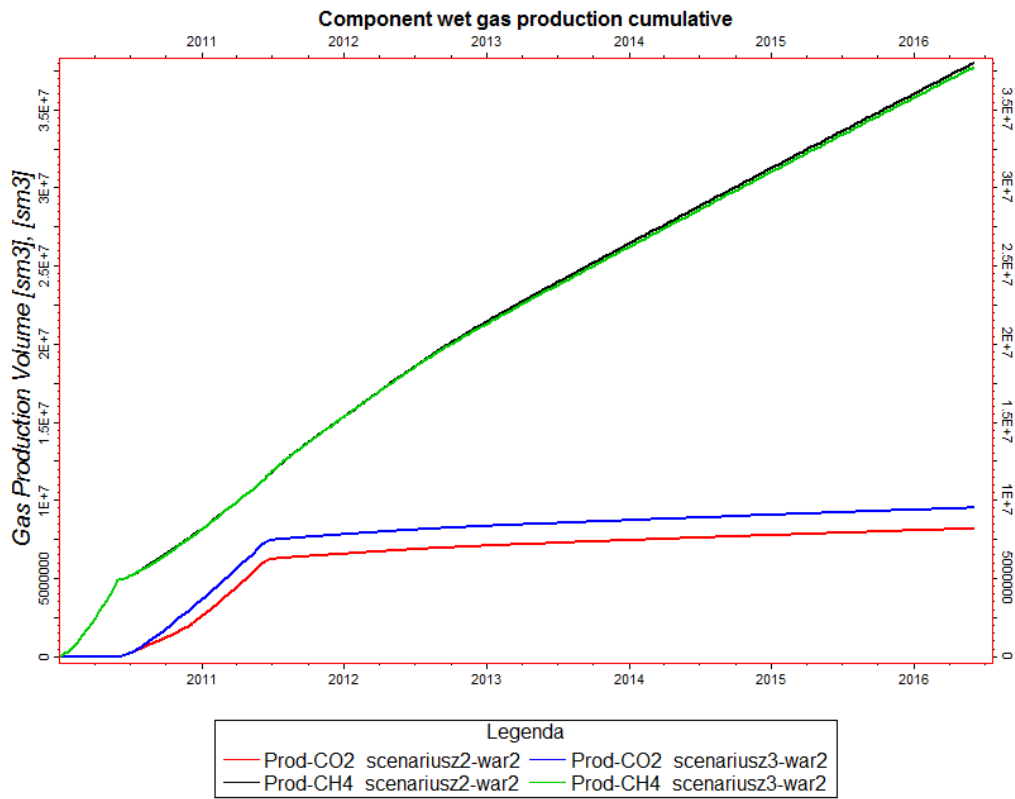


Fig. 1.1.16_383 Porównanie wyników produkcji CO2 I CH4 dla dwóch najkorzystniejszych scenariuszy symulacji

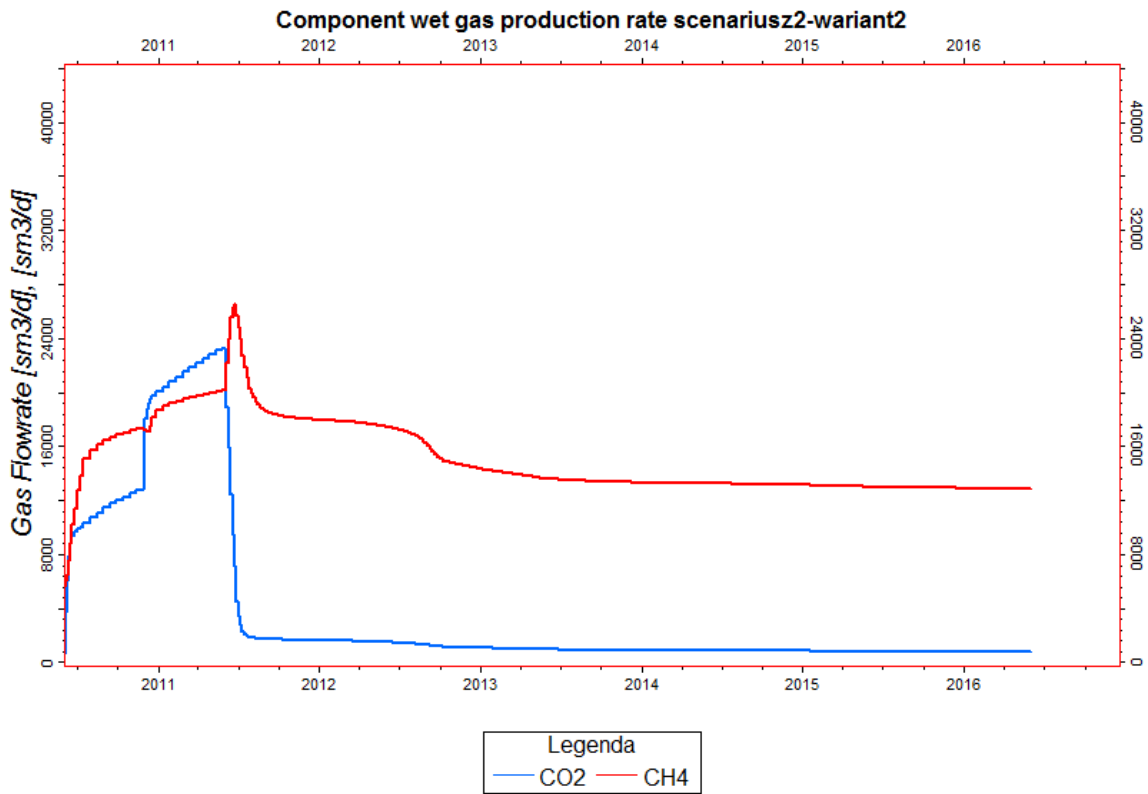


Fig. 1.1.16_384 Wydatek produkcji CO₂ i CH₄ (scenariusz 2 – wariant 2)

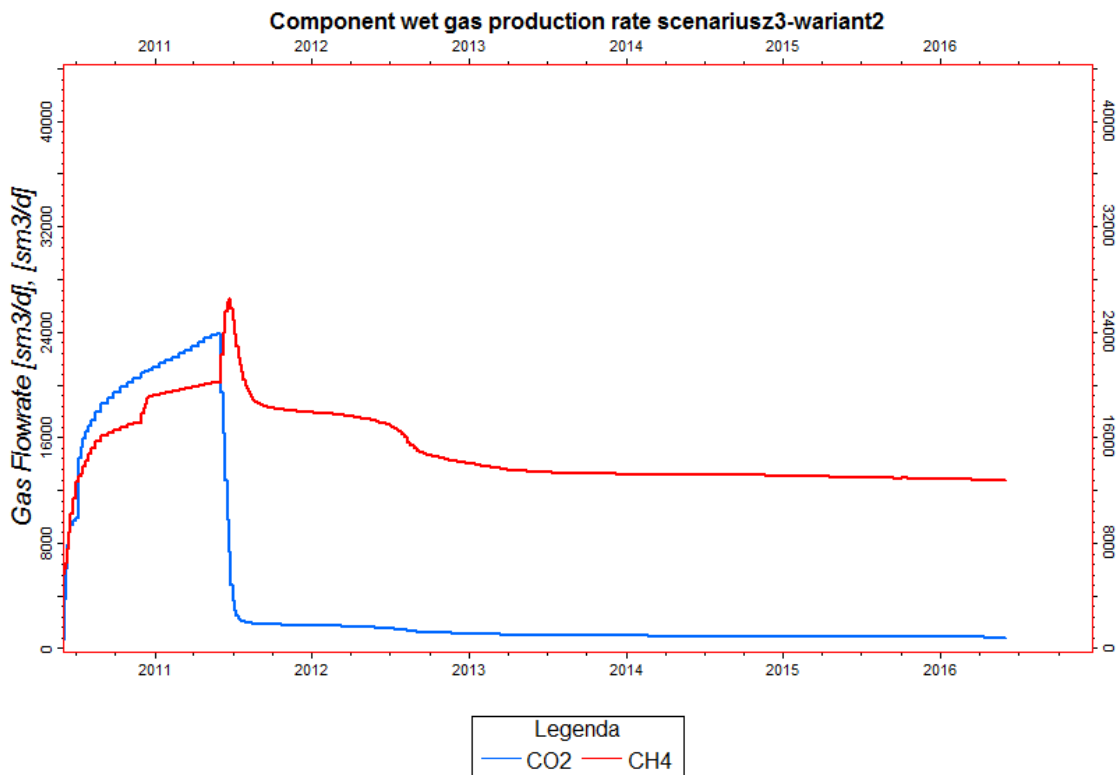


Fig. 1.1.16_385 Wydatek produkcji CO₂ i CH₄ (scenariusz 3 – wariant 2)

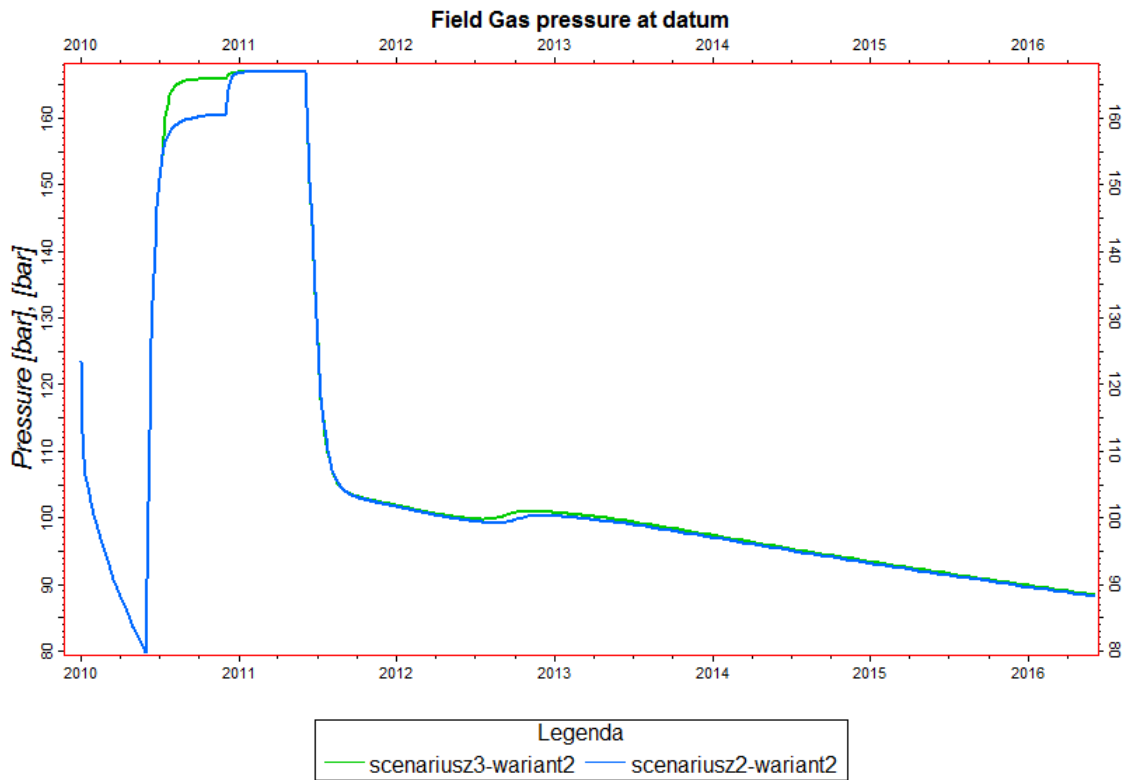
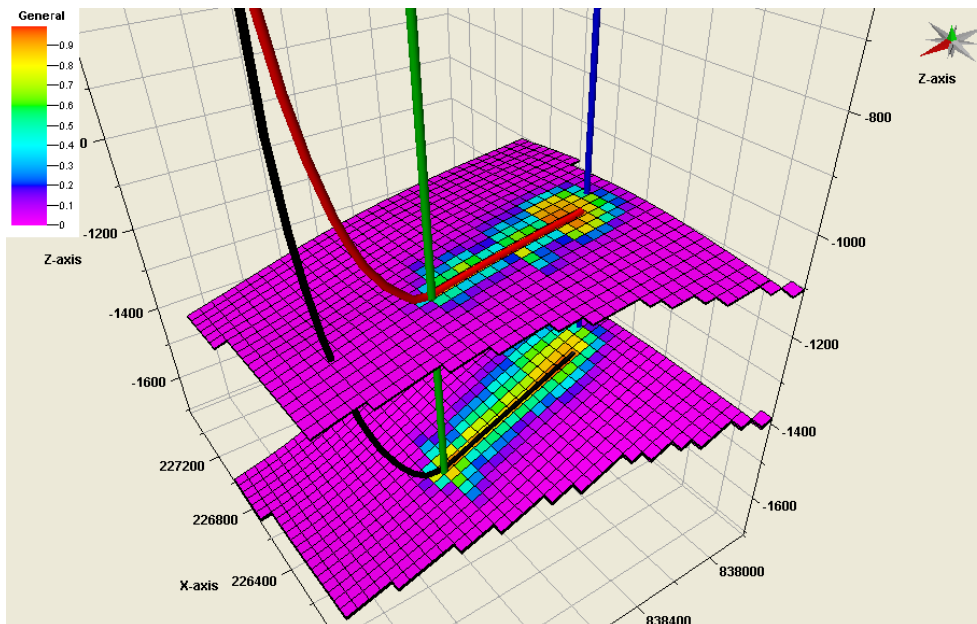


Fig. 1.1.16_386 Porównanie zmian ciśnienia w strefie zatłaczania

Część dwutlenku węgla zatłaczanego do pokładu węgla jest adsorbowana przez matrycę węglową, a pozostała część powoduje powstawanie i rozwój strefy CO₂ w systemie szczelin wokół otworu iniekcyjnego. Rozkład stężenia CO₂ i CH₄ w systemie szczelin po roku zatłaczania w postaci ułamków molowych dwóch komponentów mieszaniny gazów wypełniającej szczeliny zilustrowano na Fig. 1.1.16_387.

a) stężenie CO₂ w szczelinach



b) stężenie CH₄ w szczelinach

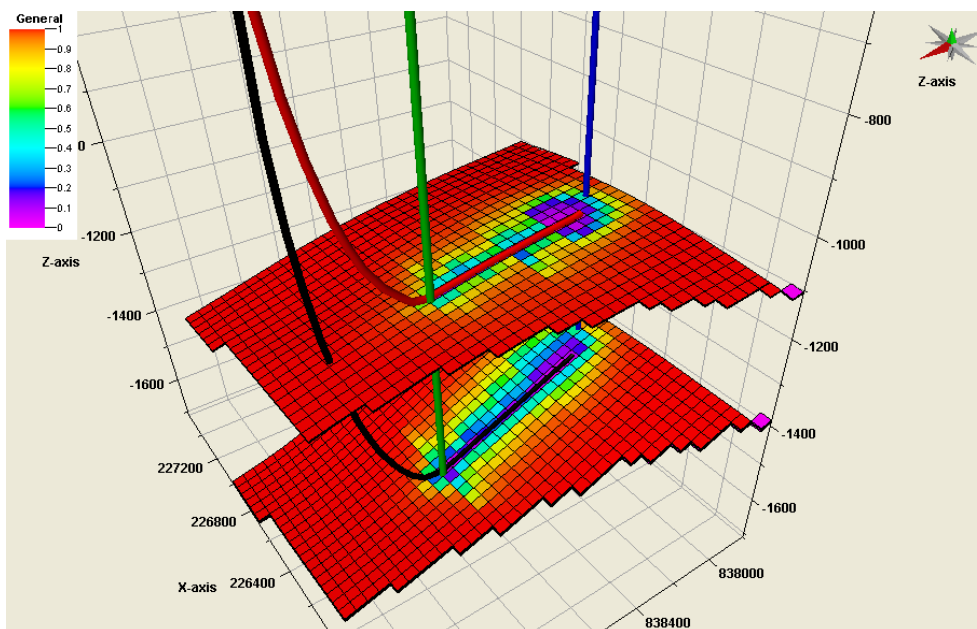
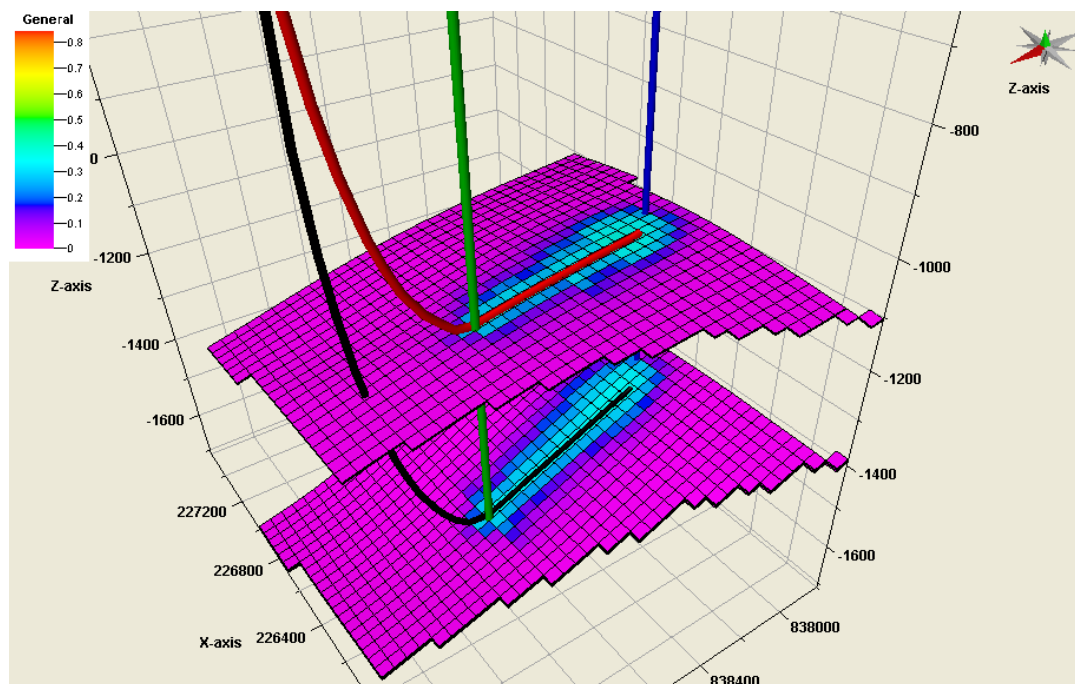


Fig. 1.1.16_387 Rozkład stężenia CO₂ i CH₄ w szczelinach po roku zatłaczania (ułamki molowe gazów w systemie szczelin). Rozkład stężenia CO₂ i CH₄ w matrycy węglowej po roku zatłaczania przedstawiono na Fig. 1.1.16_388

a) stężenie CO₂ w matrycy



b) stężenie CH₄ w matrycy

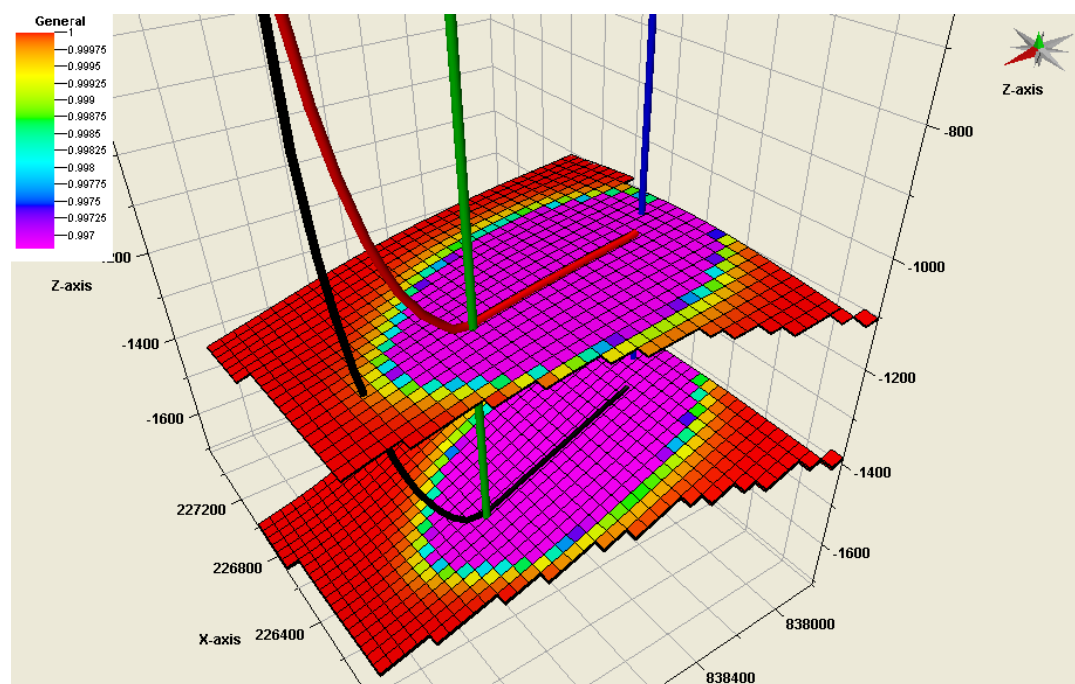
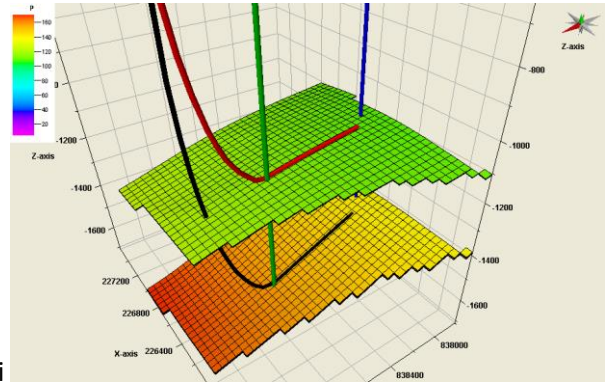
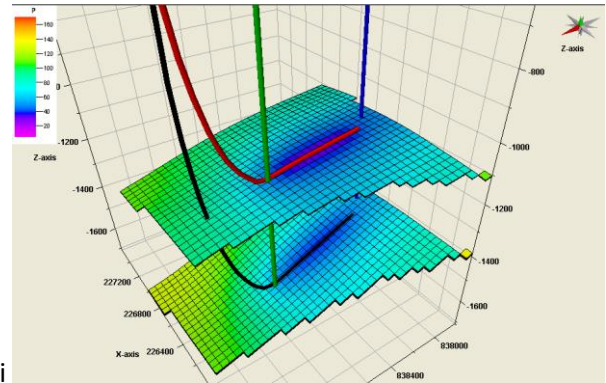


Fig. 1.1.16_388 Rozkład stężenia CO₂ i CH₄ w matrycy po roku zatłaczania (ułamki molowe gazów w matrycy węglowej)

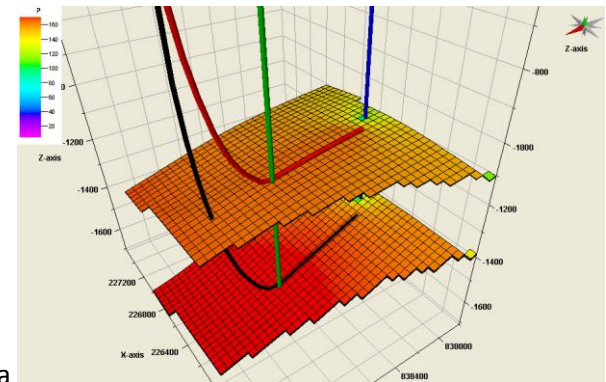
a) Początek symulacji



b) po 6 mies. Symulacji



c) po 1 roku zatłaczania



d) po 5 latach zatłaczania

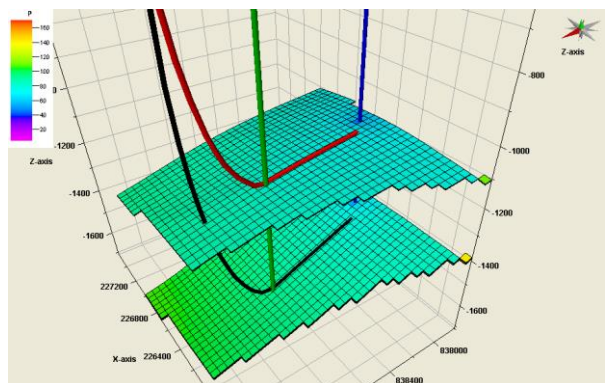


Fig. 1.1.16_389 Zmiany ciśnienia w pokładach węgla w trakcie symulacji

Nasylenie wodą systemu szczelin w węglu w strefie zatłaczania po roku iniekcji zawiera się w przedziale od około 45 do 100 % (Fig. 1.1.16_390). Natomiast nasycenie szczelin fazą gazową wynosi od 0 do około 55 % (Fig. 1.1.16_391). Analogiczne nasycenia systemu szczelin po 5 latach od zakończenia iniekcji zilustrowano na Fig. 1.1.16_392i Fig. 1.1.16_393.

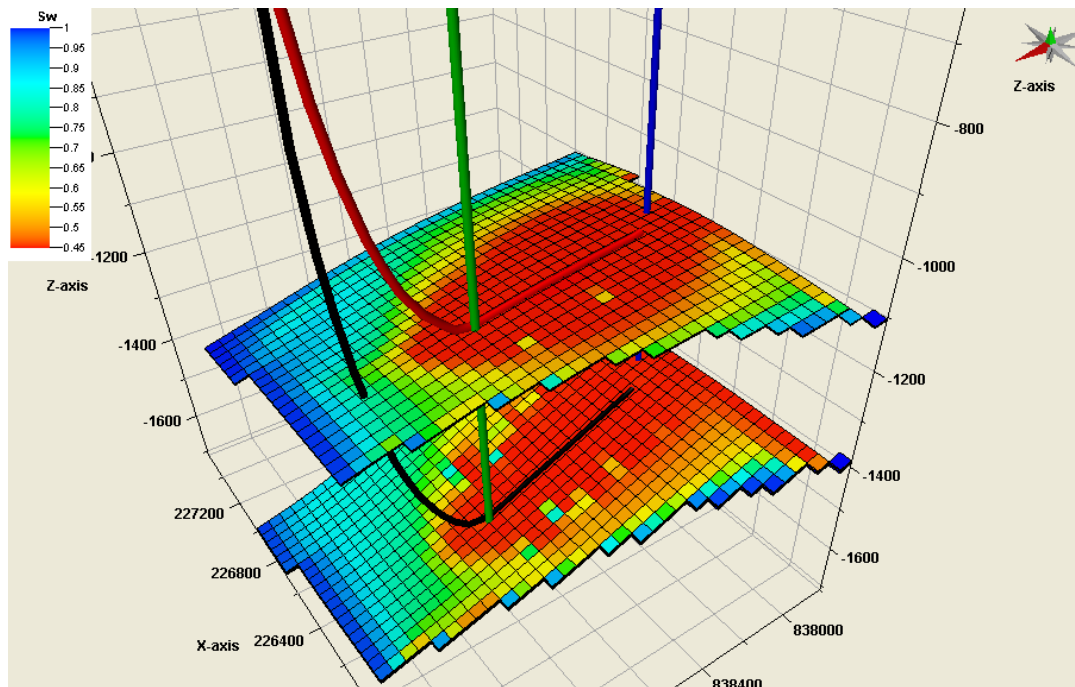


Fig. 1.1.16_390 Rozkład nasycenia wodą w szczelinach po roku iniekcji

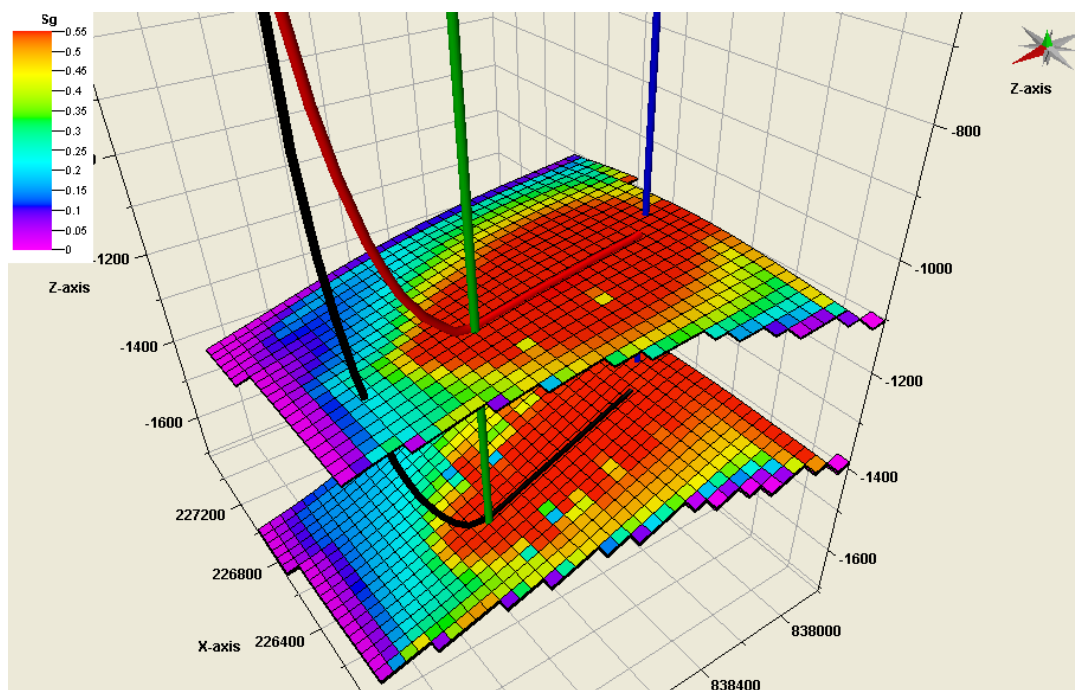


Fig. 1.1.16_390 Rozkład nasycenia fazą gazową w szczelinach po roku iniekcji

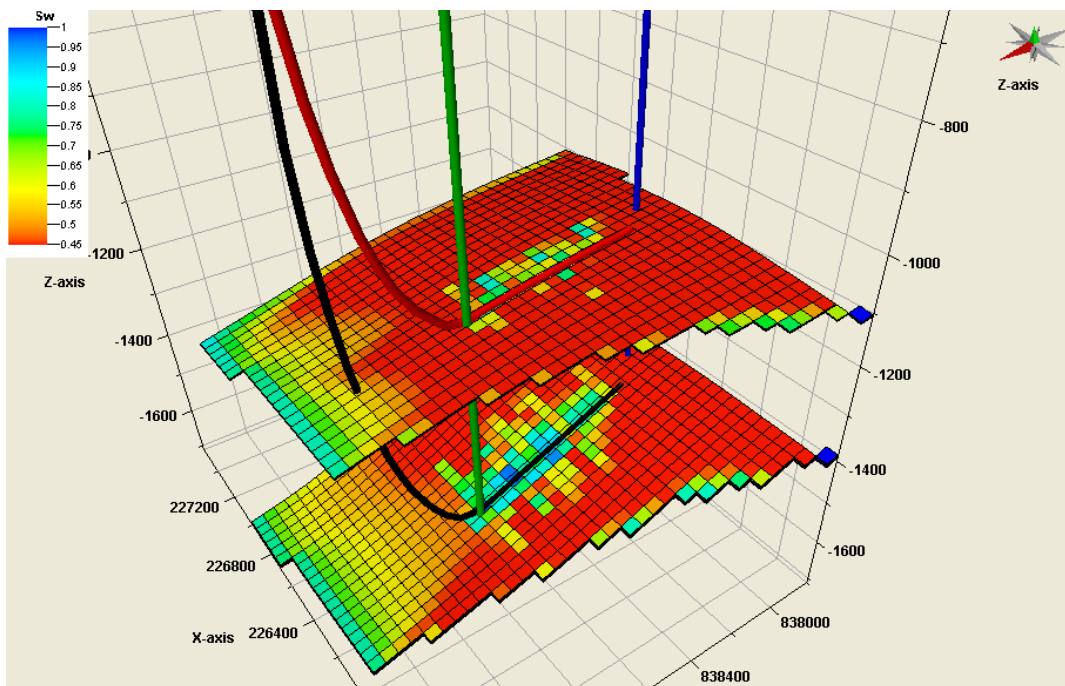


Fig. 1.1.16_392 Rozkład nasycenia wodą w szczelinach po 5 latach od zakończenia iniekcji

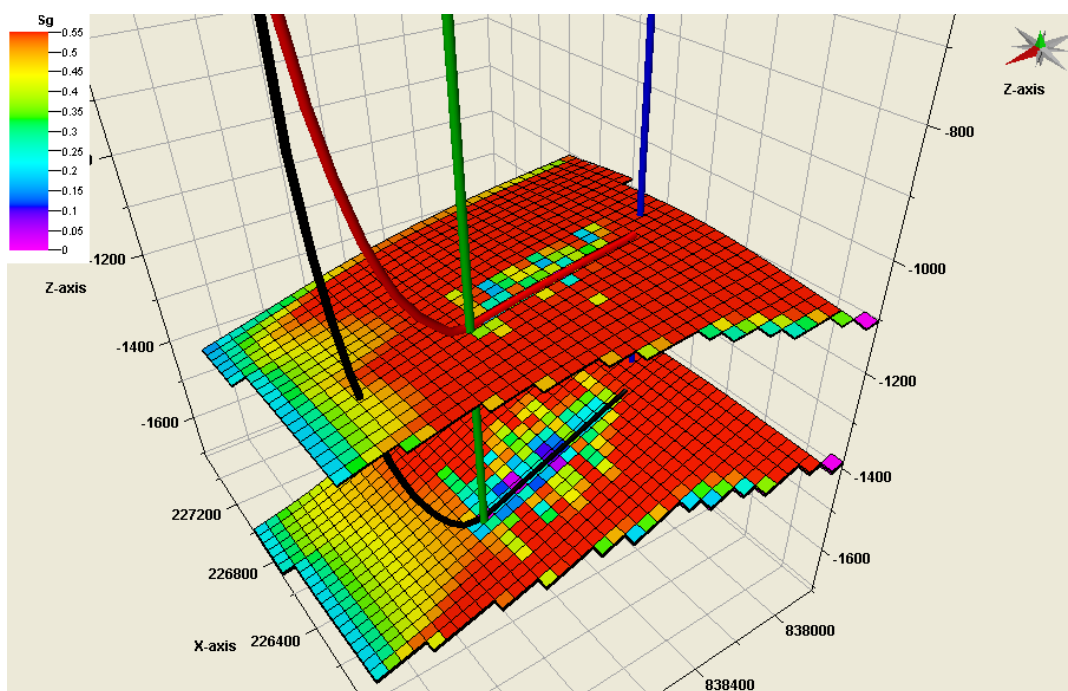


Fig. 1.1.16_393 Rozkład nasycenia fazą gazową w szczelinach po 5 latach od zakończenia iniekcji

Podsumowanie

W ramach niniejszego opracowania wykonano model strukturalno-parametryczny w utworach węglonośnych karbonu górnego. W strukturze modelu przedstawiono zaleganie pokładów 405 i 510 w rejonie projektowanych otworów kierunkowych. W wytypowanych pokładach oszacowano rozkład podstawowych parametrów jakościowych węgla, a także rozkład metanonośności. Na podstawie danych otworowych wykonano model litologiczny całej struktury zbiornikowej. Skonstruowany model statyczny wykorzystano do konstrukcji dynamicznych modeli symulacyjnych w pokładach węgla. Zaimplementowany model statyczny uzupełniono o szczegółowe parametry zbiornikowe oraz własności termodynamiczne płynów i gazów złożowych. Przeprowadzono szereg symulacji procesu intensyfikacji wydobywania metanu z pokładu węgla przy równoczesnym zatłaczaniu dwutlenku węgla. Wykorzystano do tych celów kompozycyjny symulator złożowy ECLIPSE 300 z opcją Coal Bed Methane. W trakcie modelowania uwzględniono złożoną strukturę węgla oraz szereg procesów towarzyszących technologii intensyfikacji wydobywania metanu z pokładu węgla (*Enhanced Coal Bed Methane*).

Symulacje procesu sekwestracji CO₂ w pokładach węgla przeprowadzono według odmiennych scenariuszy zróżnicowanych ze względu na zastosowaną metodykę procesu zatłaczania.

Zaprezentowane zostały wyniki symulacji dotyczące zmian ciśnień w poszczególnych odwiertach oraz zmian średniego ciśnienia w strefie zatłaczania dwutlenku węgla. Scharakteryzowano wyniki dotyczące wydajności produkcyjnych, jak również wydajności zatłaczania CO₂. Ponadto zaprezentowano wyniki modelowania w zakresie przestrzennych rozkładów fazy gazowej i wodnej w systemie szczelin przy założeniu równowagi fazowej. W sposób graficzny przedstawiono także rozkład nasycień CO₂ i CH₄ w pokładzie węgla oraz proces migracji tych gazów w poszczególnych etapach trwania symulacji.