INSTYTUT NAFTY I GAZU

PL 31 - 503 Kraków, ul. Lubicz 25a

Telefon: (012) 4210033 Fax: (012) 4210050

Zakład Symulacji Złóż Węglowodorów
i Podziemnych Magazynów Gazu

ODDZIAŁ WARSZAWA
PL 01-224 Warszawa
ul. Kasprzaka 25
Telefon: (022) 6321799
Fax: (022) 6326313

ODDZIAŁ KROSNO
PL 38-400 Krosno
ul. Armii Krajowej 3
Telefon: (013) 4368941
Fax: (013) 4367971

Nr arch.: **DK-4100-263/08**

Zlec. wew. INiG: **375/KZ**

Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO_2 wraz z programem ich monitorowania

Zadanie 1.1.16. Modelowanie dynamiczne procesów zatłaczania CO_2 do składowiska

Struktura złoża gazu ziemnego Łąkta

Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej

WYKONANO NA ZAMÓWIENIE MINISTRA ŚRODOWISKA ZA ŚRODKI FINANSOWE WYPŁACONE PRZEZ NARODOWY FUNDUSZ OCHRONY ŚRODOWISKA I GOSPODARKI WODNEJ

DYREKTOR INSTYTUTU

Krosno, czerwiec 2012

ZLECENIODAWCA: **Państwowy Instytut Geologiczny, Państwowy Instytut Badawczy**
00-975 Warszawa, ul. Rakowiecka 4

NR UMOWY: **1/2008/SEK**
NR ZLEC. WEW.: **375/KZ**
OKRES REALIZACJI: **01.2012– 06.2012**

KIEROWNIK ZESPOŁU:

Dr Wiesław Szott

KIEROWNIK ZAKŁADU:

Dr Wiesław Szott

ZESPÓŁ AUTORSKI:

Mgr inż. Andrzej Gołąbek
Dr Wiesław Szott
Dr inż. Piotr Łętkowski
Mgr inż. Krzysztof Miłek
Techn. Andrzej Rychlicki

OPRACOWANIE ZAWIERA:

Stron	Rysunków	Fotografii	Wykresów	Tablic	Pozycji bibliograf.	Załączników
63	42	-	-	4	4	-

Zadanie 1.1.16. Modelowanie dynamiczne procesów zatłaczania CO_2 do składowiska Struktura złoża gazu ziemnego Łąkta

Spis treści

1. WSTĘP **4**

2. BUDOWA MODELU SYMULACYJNEGO STRUKTURY ZŁOŻA ŁĄKTA **6**

2.1. TABELE I RYSUNKI DO ROZDZIAŁU 2 8

3. WERYFIKACJA MODELU SYMULACYJNEGO STRUKTURY ŁĄKTA W UTWORACH CENOMANU I MALMU **14**

3.1. RYSUNKI DO ROZDZIAŁU 3 15

4. SYMULACJE PROCESÓW SEKWESTRACJI CO_2 W ZŁOŻU ŁĄKTA **29**

4.1. RYSUNKI DO ROZDZIAŁU 4 34

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI **61**

6. LITERATURA **63**

Przedmiot dokumentacji technicznej stanowi własność intelektualną Instytutu

1. Wstęp

Niniejsza praca jest wynikiem realizacji Zadania 1.1.16 w ramach umowy wykonawczej nr 1/2008/SEK z dnia 29 grudnia 2008 zawartej pomiędzy Państwowym Instytutem Geologicznym a Instytutem Nafty i Gazu w związku z uzyskaniem zamówienia od Ministerstwa Środowiska na wykonanie pracy pod nazwą „Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO_2 wraz z ich programem monitorowania".

Tytuł Zadania to: „Modelowanie dynamiczne procesów zatłaczania CO_2 do składowiska". Odnosi się ono do struktury złoża gazu ziemnego Łąkta wybranej uprzednio przez Radę Programową Konsorcjum realizującego Zamówienia Ministerstwa Środowiska jako potencjalne składowisko w strukturach naftowych.

W ramach niniejszej pracy dokonano implementacji statycznego (geologicznego) modelu struktury złoża gazu ziemnego i konstrukcji pełnoskalowego (o wymiarach ok. 18.9 km × 41.3 km), trójwymiarowego modelu złożowego tej struktury (w utworach malmu i cenomanu). Wykorzystano model geologiczny skonstruowany i skalibrowany w pracy [1]. 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-płyny złożowe, termodynamiczne własności płynów złożowych i ich wzajemne oddziaływanie.

Celem pracy było zweryfikowanie możliwości wykorzystania struktury dla potrzeb sekwestracji dwutlenku węgla.

W pracy przedstawiono prognozy sekwestracji CO_2 dla 4 scenariuszy różniących się systemem odwiertów zatłaczających oraz kryteriami limitującymi proces sekwestracji.

We wszystkich przypadkach symulowano również zachowanie się płynów złożowych w okresie relaksacji tj. 1000 lat po zakończeniu zatłaczania.

W pracy przedstawiono również analizę wpływu zatłaczania CO_2 do struktury złoża na wielkość wydobycia gazu. Jednak podstawowym kryterium efektywności procesu

Przedmiot dokumentacji technicznej stanowi własność intelektualną Instytutu

była maksymalizacja pojemności sekwestracyjnej rozpatrywanej struktury. W pracy wykorzystano narzędzia programistyczne do modelowania i symulacji z pakietów Petrel i Eclipse 300 firmy GeoQuest Schlumberger [2].

Przedmiot dokumentacji technicznej stanowi własność intelektualną Instytutu

2. Budowa modelu symulacyjnego struktury złoża Łąkta

Model symulacyjny omawianej struktury skonstruowano w oparciu o model geologiczny zbudowany w pracy [1]. Model ten obejmuje horyzont zbiornikowy w utworach dolomitycznych i wapiennych malmu oraz piaskowcowych cenomanu. W modelu uwzględniono warstwy podścielające horyzont zbiornikowy celem poprawnego uwzględnienia napływu wody podścielającej złoże gazu. Model swoim zasięgiem obejmował również strefy wód okalających złoże. W efekcie otrzymano wielowarstwowy system bloków modelu o wymiarach 124×64×14 (Rys. 2.1).

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 złoża podano w Tabeli 2.1. Ze względu na kompozycyjny charakter użytego modelu symulacyjnego, przy pomocy programu PVTSim [3] wygenerowano parametry równania stanu Penga-Robinsona, które przedstawiono w Tabeli 2.2. W celu ograniczenia złożoności systemu płynów złożowych pogrupowano składniki węglowodorowe i zastąpiono je pseudo-składnikami $PC_1(C_1+N_2)$, $PC_2(C_2+C_3)$, $PC_3(C_4+C_5+C_6)$, i C_{7+}.

Własności wody złożowej przyjęto na podstawie danych pochodzących z próbek wydobytej wody. Własności te dla warunków złożowych, tj. $T_{zł}$ = 69.8°C, $P_{zł}$ = 238.5 bar to:

- gęstość: ρ_w = 1072.5 kg / Nm^3,
- współczynnik objętościowy: B_w = 1.01 m^3 / m^3,
- ściśliwość: $c_w = 4\times10^{-5}$1/bar,
- lepkość: 0.3 cP.

Przedmiot dokumentacji technicznej stanowi własność intelektualną Instytutu

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}.

Dla przepuszczalności względnych, wobec braku odpowiednich pomiarów, użyto typowych zależności i k_{rw}, k_{rg} od nasyceń zredukowanych, odpowiednio S_w* i S_g*, gdzie: zredukowane nasycenie wodą

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

S_w – nasycenie wodą,

$S_{w,min} = S_{wr}$ – nieredukowalne nasycenie wodą, $S_{wr} = 0.22$

oraz zredukowane nasycenie gazem:

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

gdzie: S_{gr} – rezydualne nasycenie gazem, $S_{gr} = 0.13$.

Użyte korelacje przedstawiono na Rys. 2.2.

Rozpuszczalność CO_2 w wodzie

Dla poprawnego modelowania procesów zachodzących podczas składowania CO_2 w modelu symulacyjnym omawianej struktury uwzględniono rozpuszczalność dwutlenku węgla w wodzie. Wartości rozpuszczalności określono jako typowe w oparciu o dane laboratoryjne wykonane w laboratorium PVT Instytutu Nafty i Gazu [4]. Dla ich odtworzenia przyjęto zasolenie wody złożowej wyrażone molalnością równą 1.72. Uzyskane wartości rozpuszczalności dwutlenku węgla w wodzie, $R_{s,CO2}$ podano w Tabeli 2.3 dla temperatury złożowej i zmiennych ciśnień złożowych.

Przedmiot dokumentacji technicznej stanowi własność intelektualną Instytutu

2.1. Tabele i rysunki do Rozdziału 2

Przedmiot dokumentacji technicznej stanowi własność intelektualną Instytutu

Tabela 2.1. Złoże Łąkta. Skład chemiczny gazu ziemnego

Składnik	% mol.
N_2	3.550
CO_2	0.000
C_1	92.355
C_2	1.480
C_3	0.562
iC_4	0.134
nC_4	0.257
iC_5	0.006
nC_5	0.006
C_6	0.183
C_7	0.500
C_8	0.329
C_9	0.217
C_{10}	0.143
C_{11}	0.094
C_{12}	0.062
C_{13}	0.041
C_{14}	0.027
C_{15}	0.018
C_{16}	0.012
C_{17}	0.008
C_{18}-C_{38}	0.015

Przedmiot dokumentacji technicznej stanowi własność intelektualną Instytutu

Tabela 2.2. Złoże Łąkta.
a) Parametry równania stanu PR, b) Współczynniki binarne

a)

Składnik	T_{kryt} [k]	P_{kryt} [bar]	ω	Mw	Z_{kryt}	V_{kryt}	T_{boil}	Ω_A	Ω_B	Parachora
PC_1	186.549	45.243	0.010	16.486	0.287	0.098	109.449	0.427	0.087	75.017
PC_2	328.445	46.554	0.117	33.932	0.286	0.168	201.240	0.427	0.087	124.287
PC_3	455.662	34.272	0.232	67.185	0.275	0.304	298.929	0.427	0.087	222.315
CO_2	304.200	73.765	0.225	44.010	0.274	0.094	194.650	0.427	0.087	78.000
C_{7+}	590.234	24.404	0.561	120.717	0.278	0.559	423.681	0.427	0.087	362.051

b)

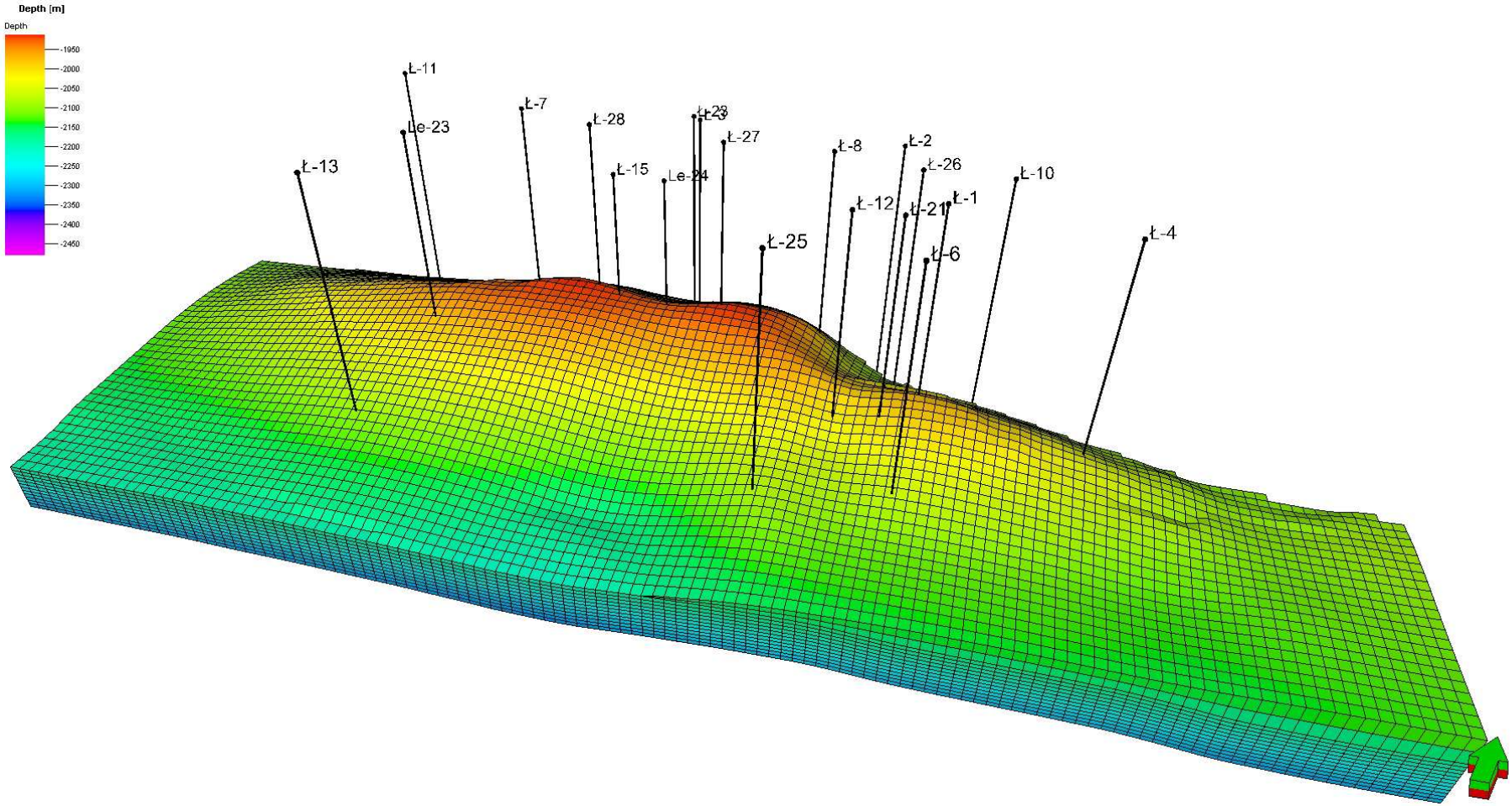
Składnik	PC_1	PC_2	PC_3	CO_2	C_{7+}
PC_1	-	-	-	-	-
PC_2	0.0019	-	-	-	-
PC_3	0.0029	0	-	-	-
CO_2	0.1144	0.12	0.12	-	-
C_{7+}	0.003	0	0	0.1	-

Przedmiot dokumentacji technicznej stanowi własność intelektualną Instytutu

Tabela 2.3. Złoże Łąkta. Rozpuszczalność CO_2 w wodzie złożowej dla temperatury złożowej.

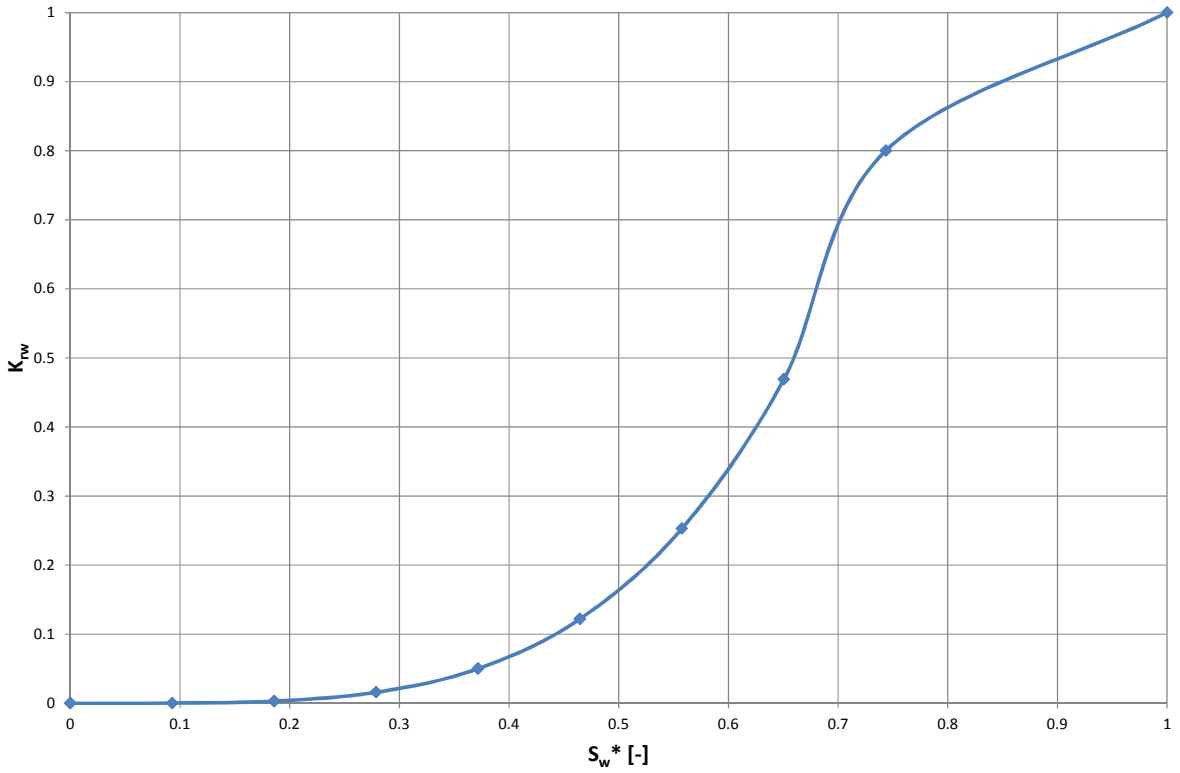
P [bar]	$R_{s,CO2}$ [Nm^3/Nm^3]
1.013	0.282
54.29	10.96
107.6	16.54
160.8	19.63
214.1	21.47
267.4	22.66
320.7	23.52

Przedmiot dokumentacji technicznej stanowi własność intelektualną Instytutu

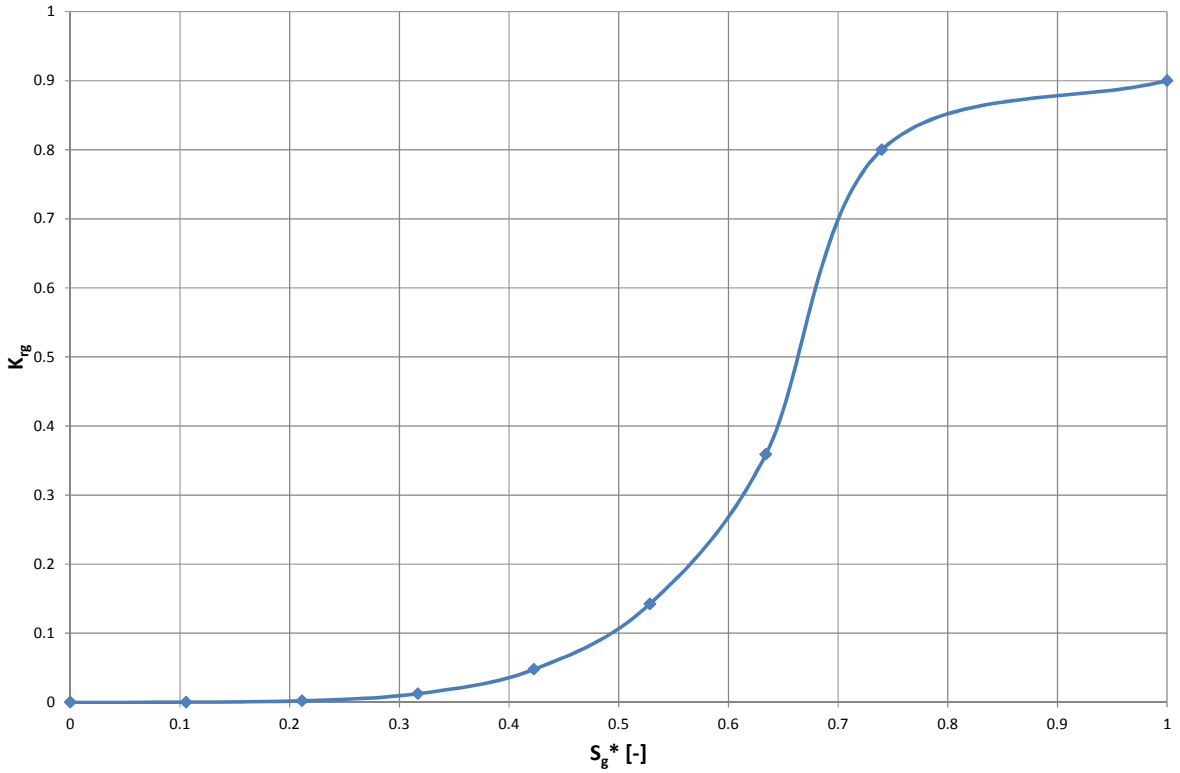


Rys. 2.1. Widok przestrzenny modelu symulacyjnego struktury złoża Łąkta.

Przedmiot dokumentacji technicznej stanowi własność intelektualną Instytutu



Rys. 2.2a. Złoże Łąkta. Przepuszczalność względna wody, k_{rw}.



Rys. 2.2b. Złoże Łąkta. Przepuszczalność względna gazu, k_{rg}.

Przedmiot dokumentacji technicznej stanowi własność intelektualną Instytutu

3. Weryfikacja modelu symulacyjnego struktury Łąkta w utworach cenomanu i malmu

Do weryfikacji omawianego modelu symulacyjnego użyto danych eksploatacyjnych z dotychczasowej pracy złoża w okresie: II.1972 – VI.2003. Wykorzystano dane w postaci miesięcznego wydobycia gazu, wody i kondensatu, czasu pracy odwiertów oraz ciśnień dennych statycznych (zmierzonych lub obliczonych z ciśnień głowicowych). W pierwszym kroku kalibracji zbudowanego modelu symulacyjnego odtworzono pierwotne zasoby geologiczne złoża oraz ciśnienie początkowe. W kolejnym dopasowano ciśnienie denne panujące na spodzie odwiertów eksploatujących.

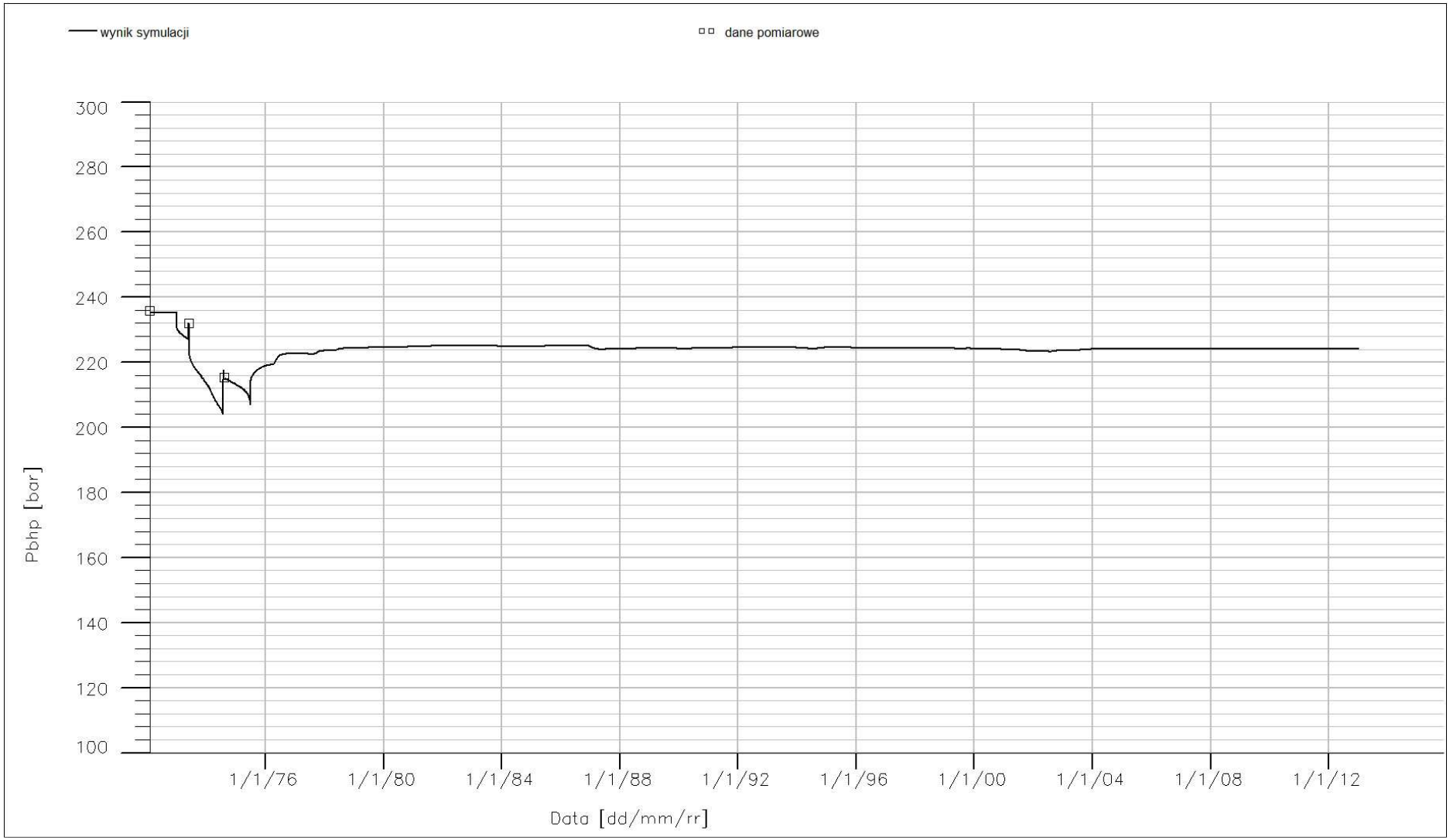
Uzyskano bardzo dobrą zgodność ciśnień obliczonych ze zmierzonymi: (Rys. 3.1 – 3.8). Odtworzono również wykładniki kondensatowe (Rys. 3.9 – 3.13). W zakresie przepływów wody złożowej odtworzono momenty zawadniania się odwiertów oraz przemieszczanie się konturu gaz-woda na stropie złoża.

Uzyskane efekty kalibracji potwierdzają wiarygodność skonstruowanego modelu symulacyjnego złoża gazu ziemnego Łąkta i gwarantują poprawność wyników prognoz jego funkcjonowania przedstawionych w kolejnych rozdziałach.

Przedmiot dokumentacji technicznej stanowi własność intelektualną Instytutu

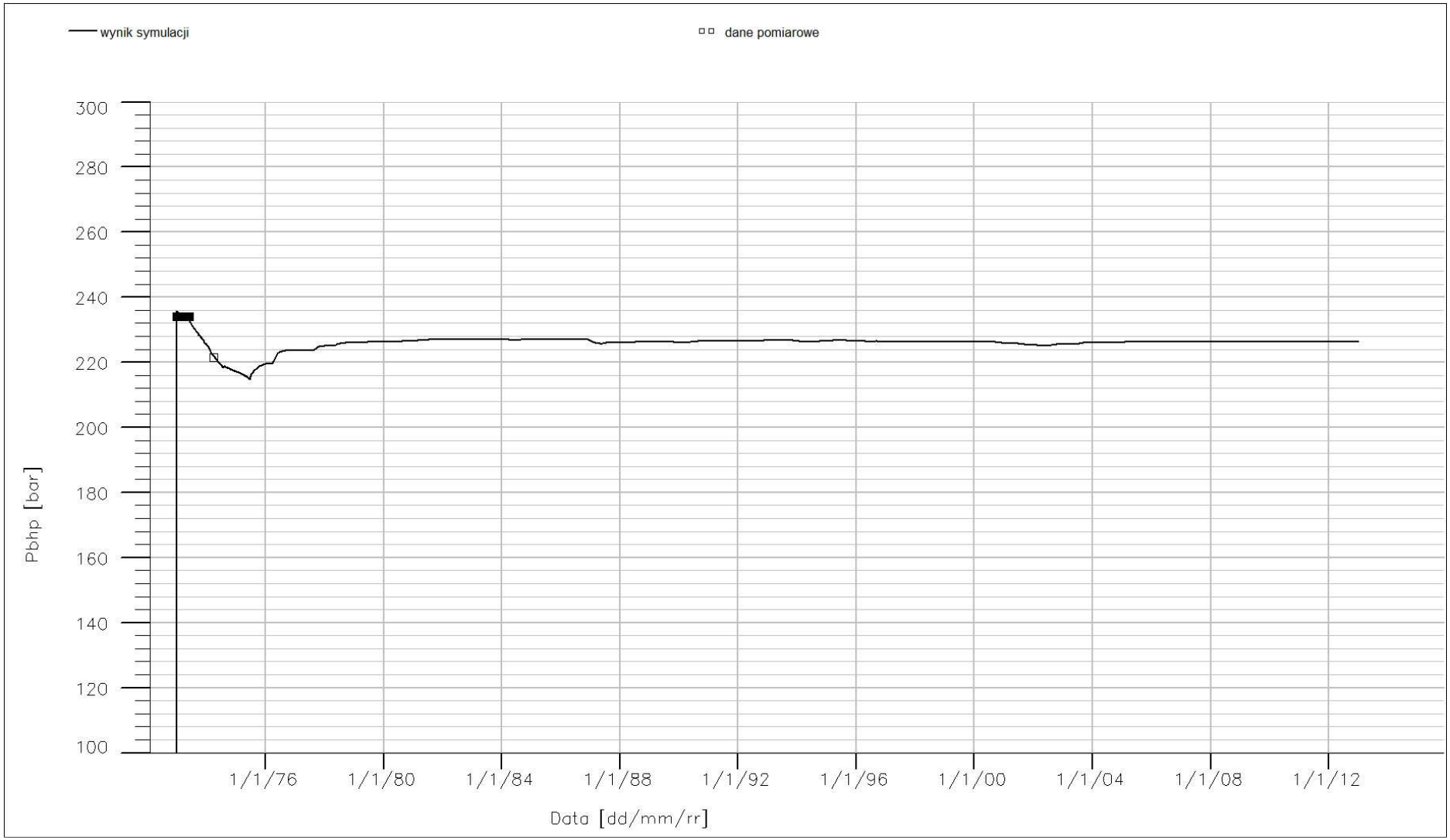
3.1. Rysunki do Rozdziału 3

Przedmiot dokumentacji technicznej stanowi własność intelektualną Instytutu



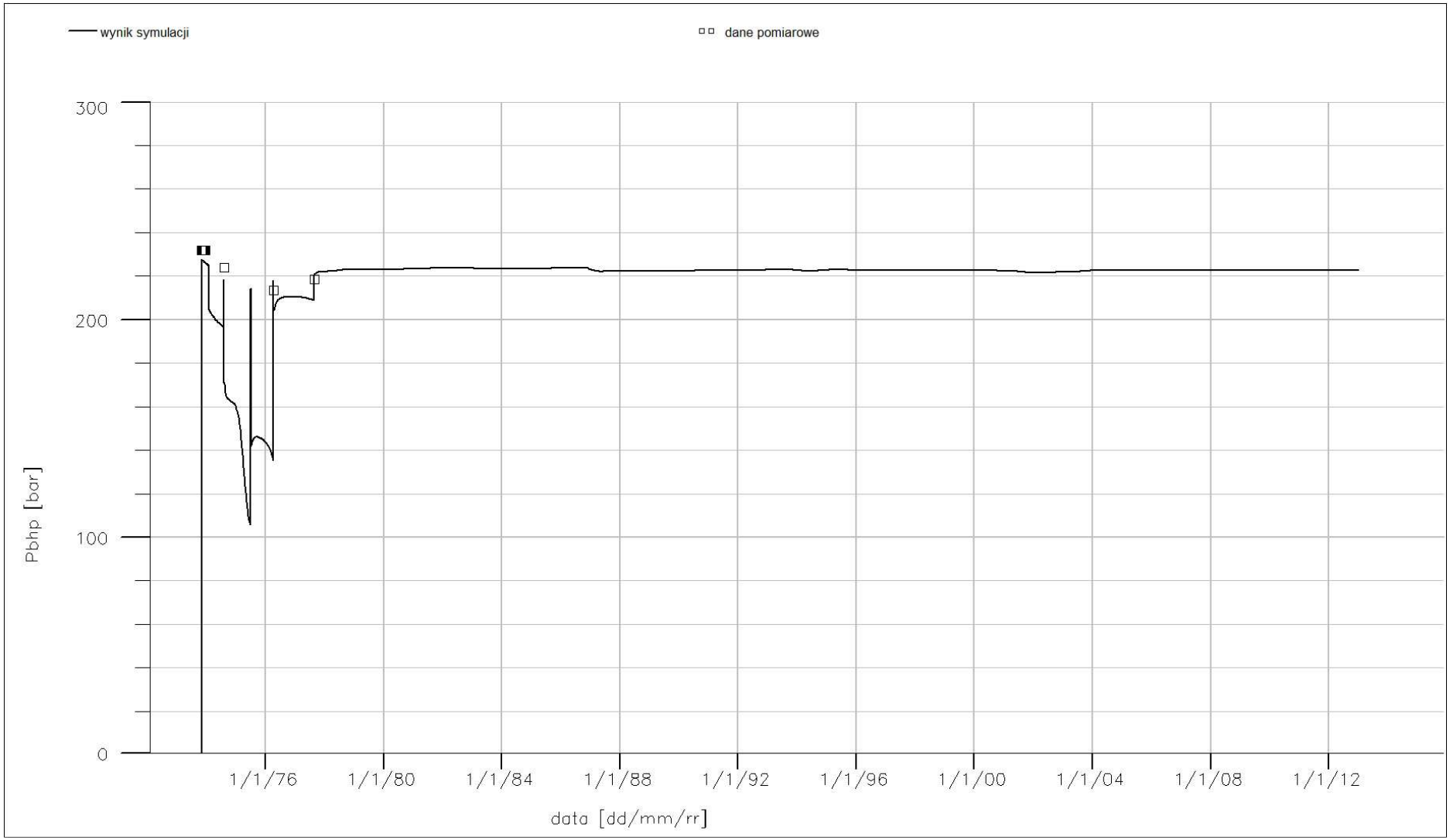
Rys. 3.1. Złoże Łąkta. Odwiert Łąkta-1. Ciśnienie na spodzie odwiertu, P_{BHP}.

Przedmiot dokumentacji technicznej stanowi własność intelektualną Instytutu



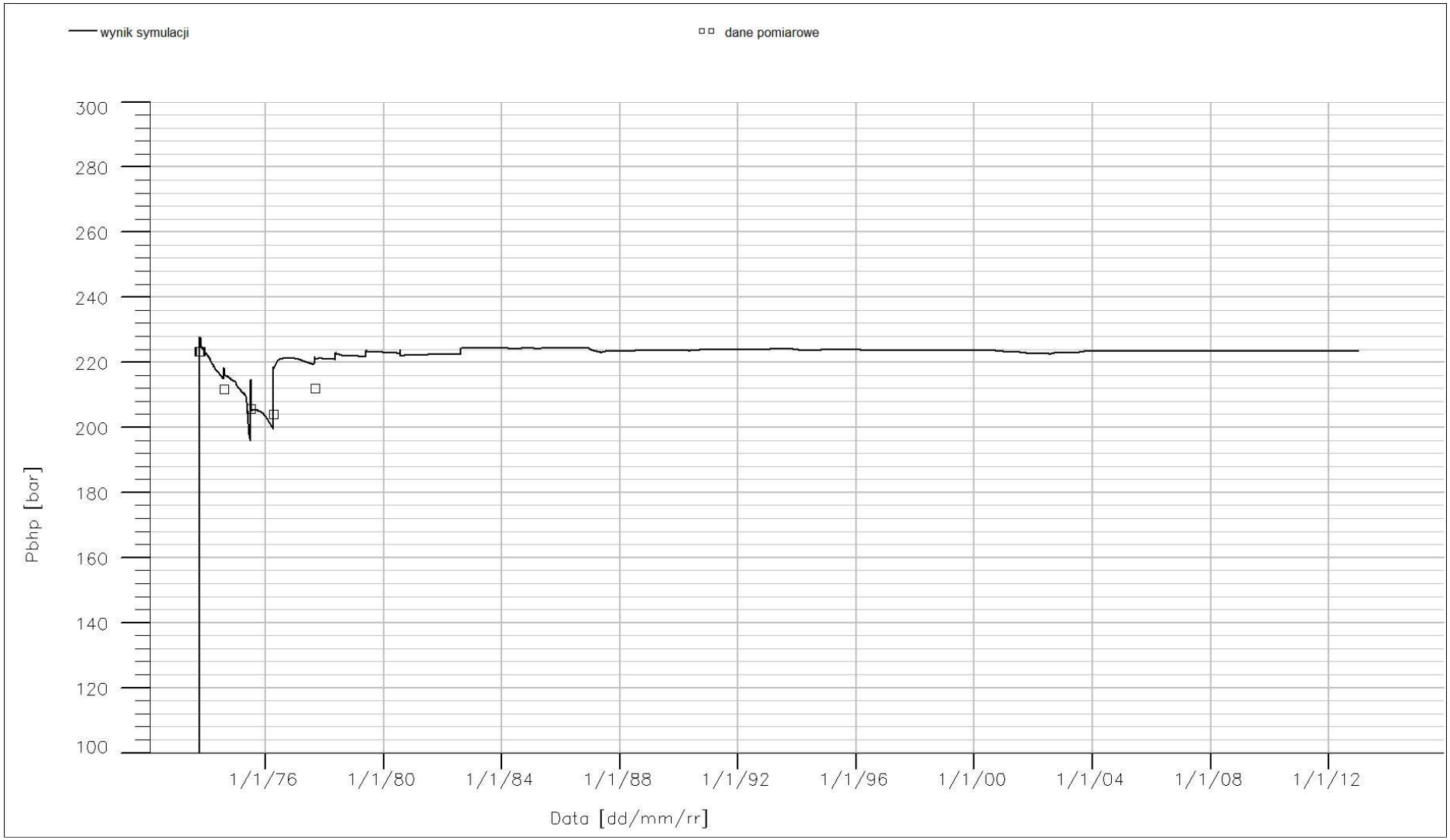
Rys. 3.2. Złoże Łąkta. Odwiert Łąkta-3. Ciśnienie na spodzie odwiertu, P_{BHP}.

Przedmiot dokumentacji technicznej stanowi własność intelektualną Instytutu



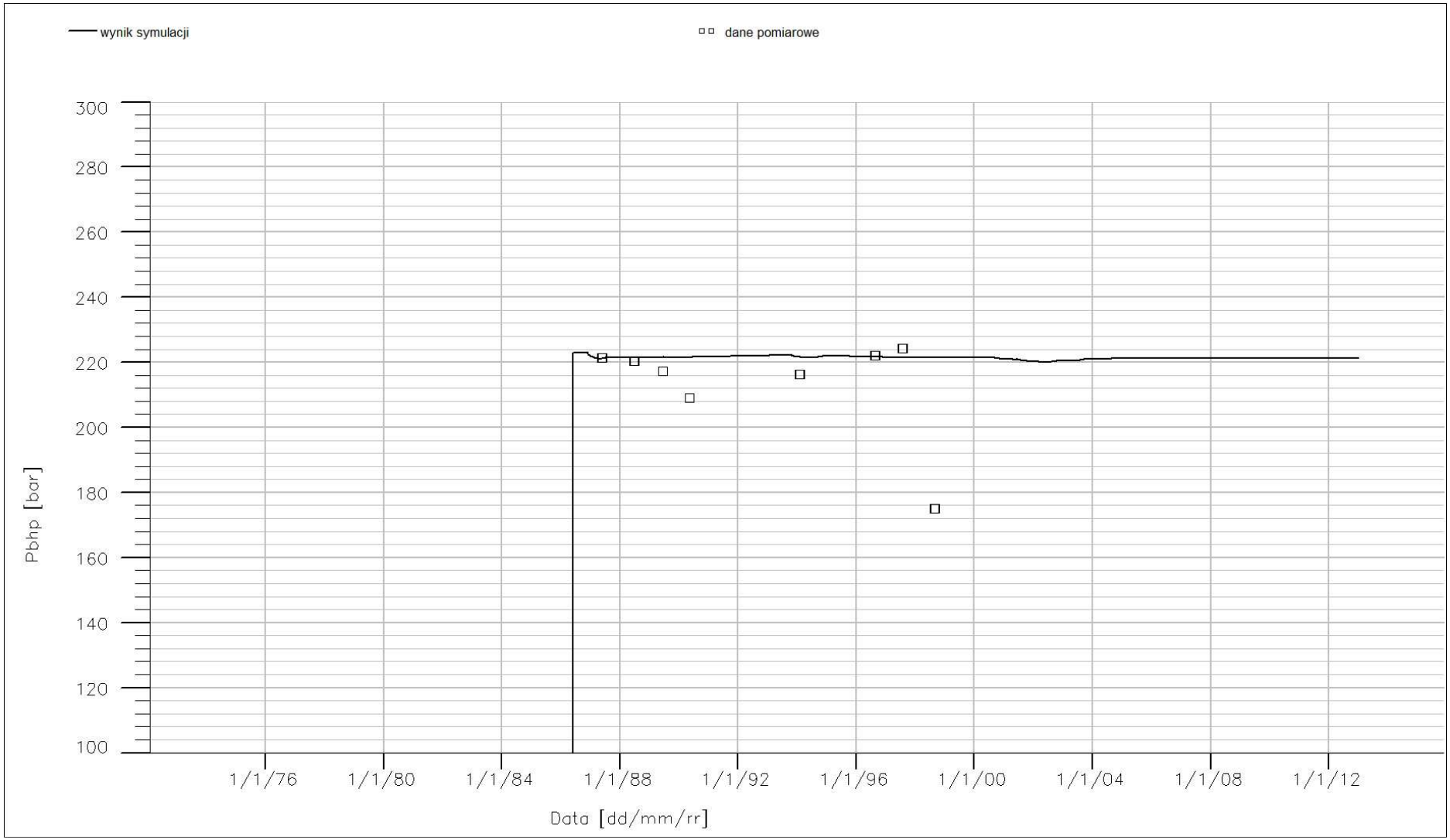
Rys. 3.3. Złoże Łąkta. Odwiert Łąkta-7. Ciśnienie na spodzie odwiertu, P_{BHP}.

Przedmiot dokumentacji technicznej stanowi własność intelektualną Instytutu



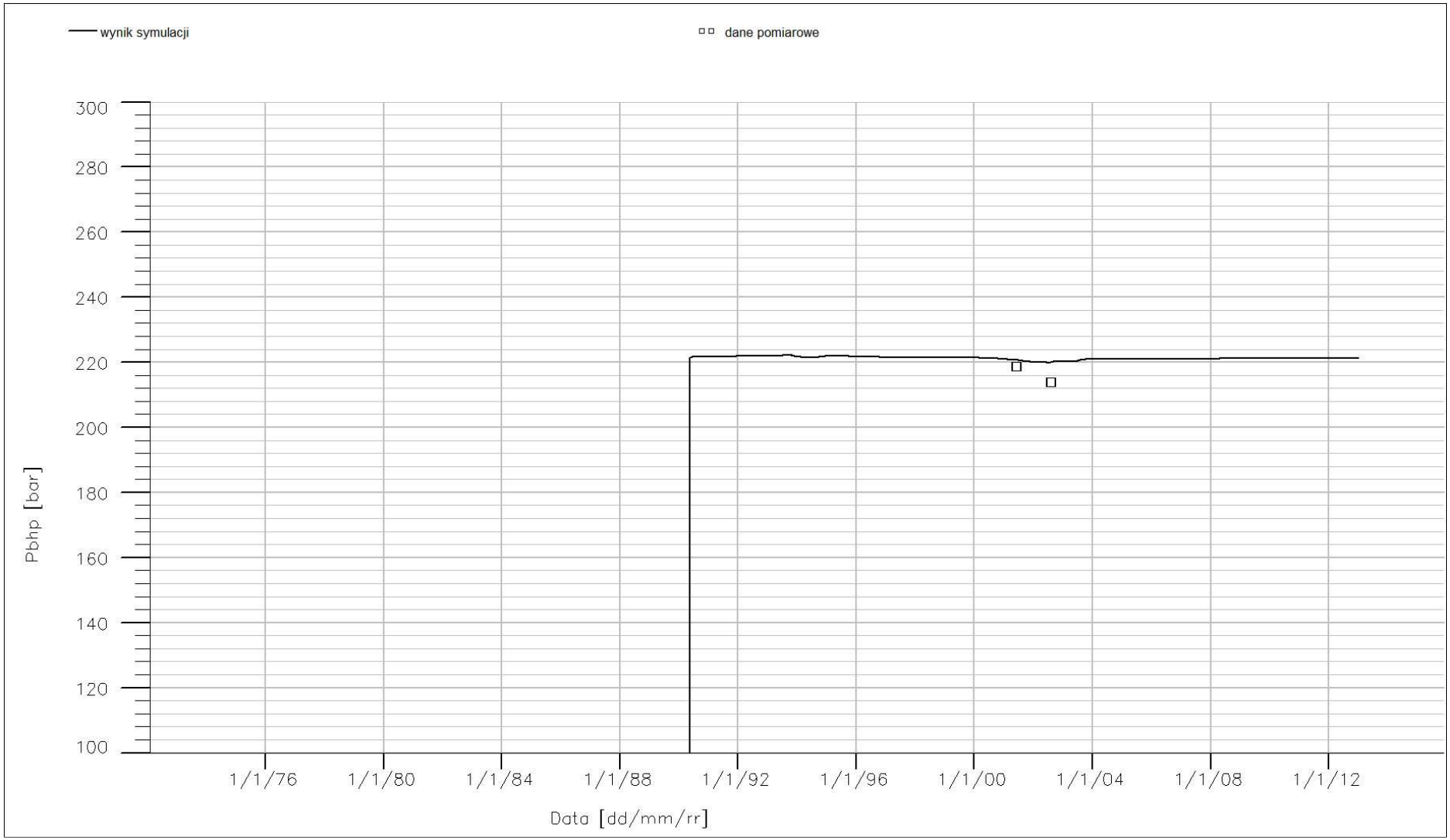
Rys. 3.4. Złoże Łąkta. Odwiert Łąkta-8. Ciśnienie na spodzie odwiertu, P_{BHP}.

Przedmiot dokumentacji technicznej stanowi własność intelektualną Instytutu



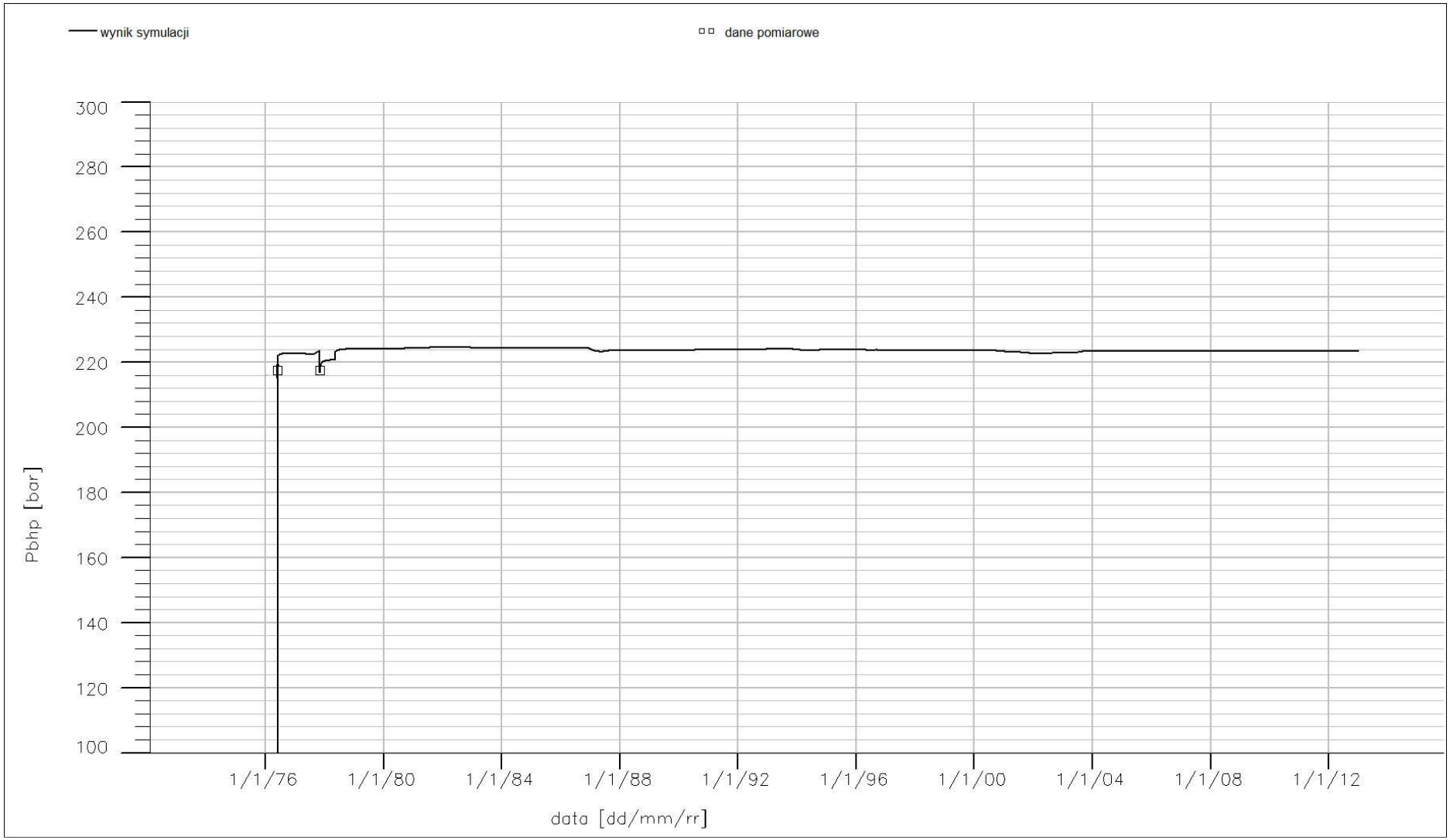
Rys. 3.5. Złoże Łąkta. Odwiert Łąkta-27. Ciśnienie na spodzie odwiertu, P_{BHP}.

Przedmiot dokumentacji technicznej stanowi własność intelektualną Instytutu



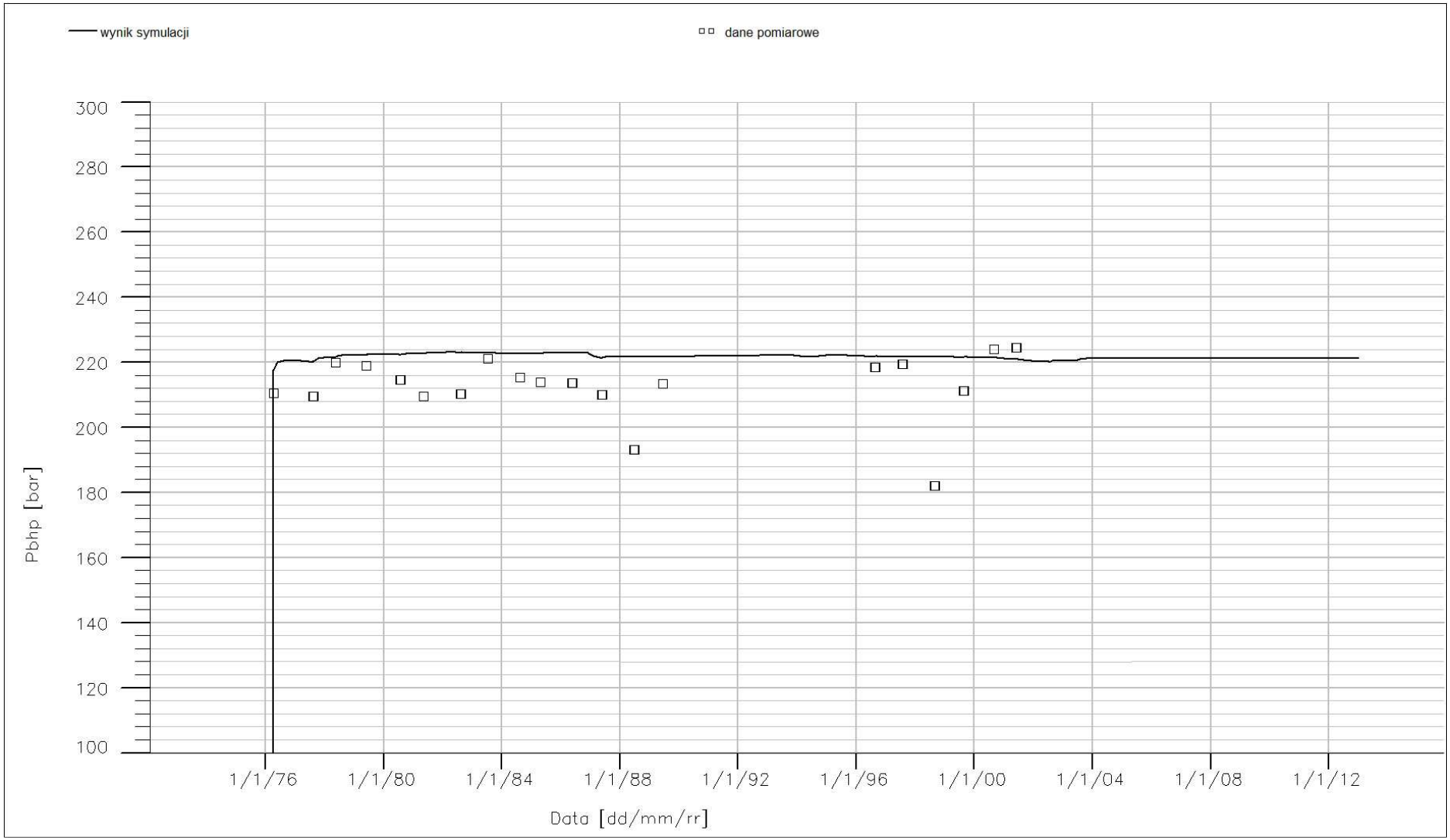
Rys. 3.6. Złoże Łąkta. Odwiert Łąkta-28. Ciśnienie na spodzie odwiertu, P_{BHP}.

Przedmiot dokumentacji technicznej stanowi własność intelektualną Instytutu



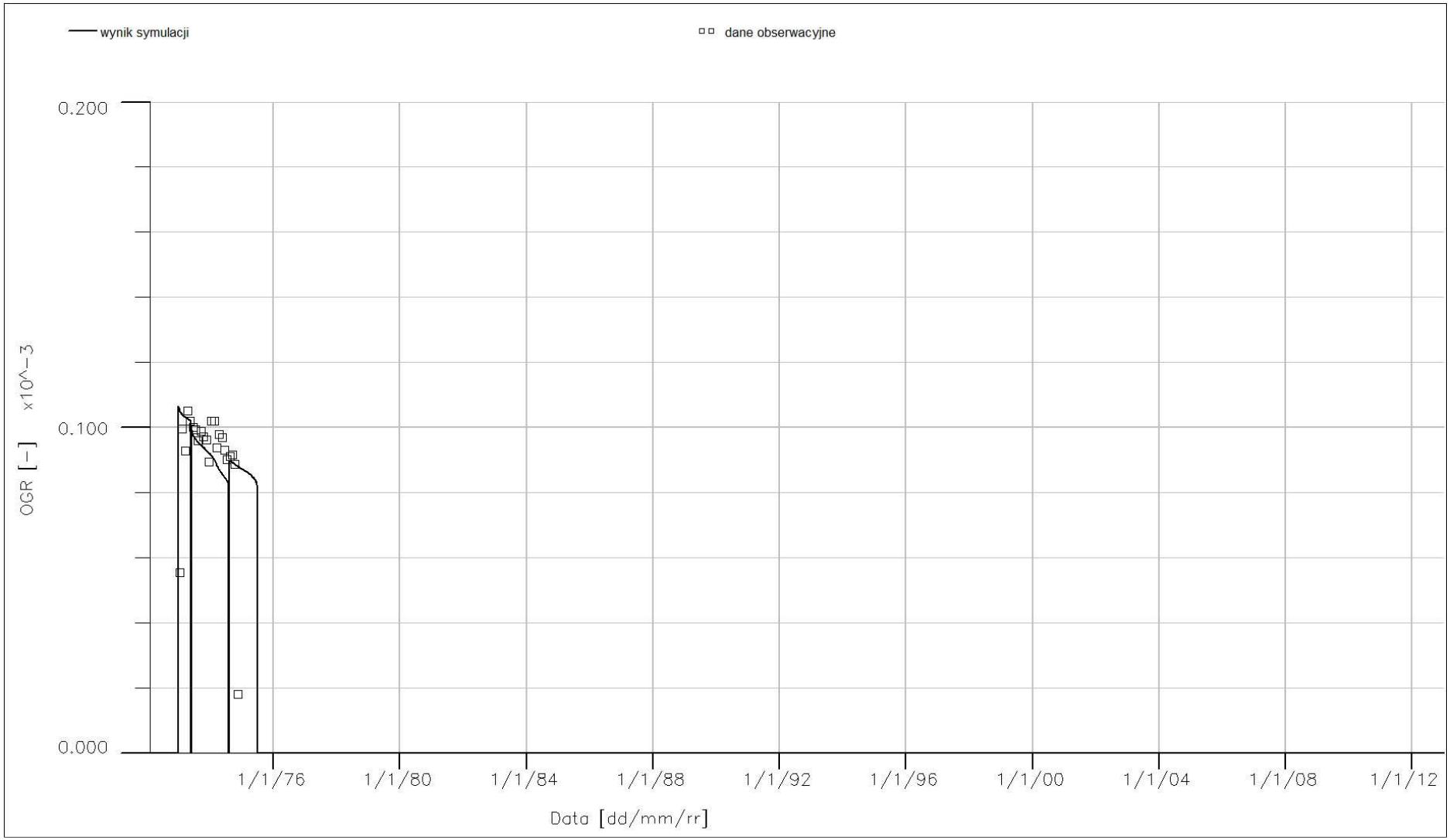
Rys. 3.7. Złoże Łąkta. Odwiert Leszczyna-23. Ciśnienie na spodzie odwiertu, P_{BHP}.

Przedmiot dokumentacji technicznej stanowi własność intelektualną Instytutu



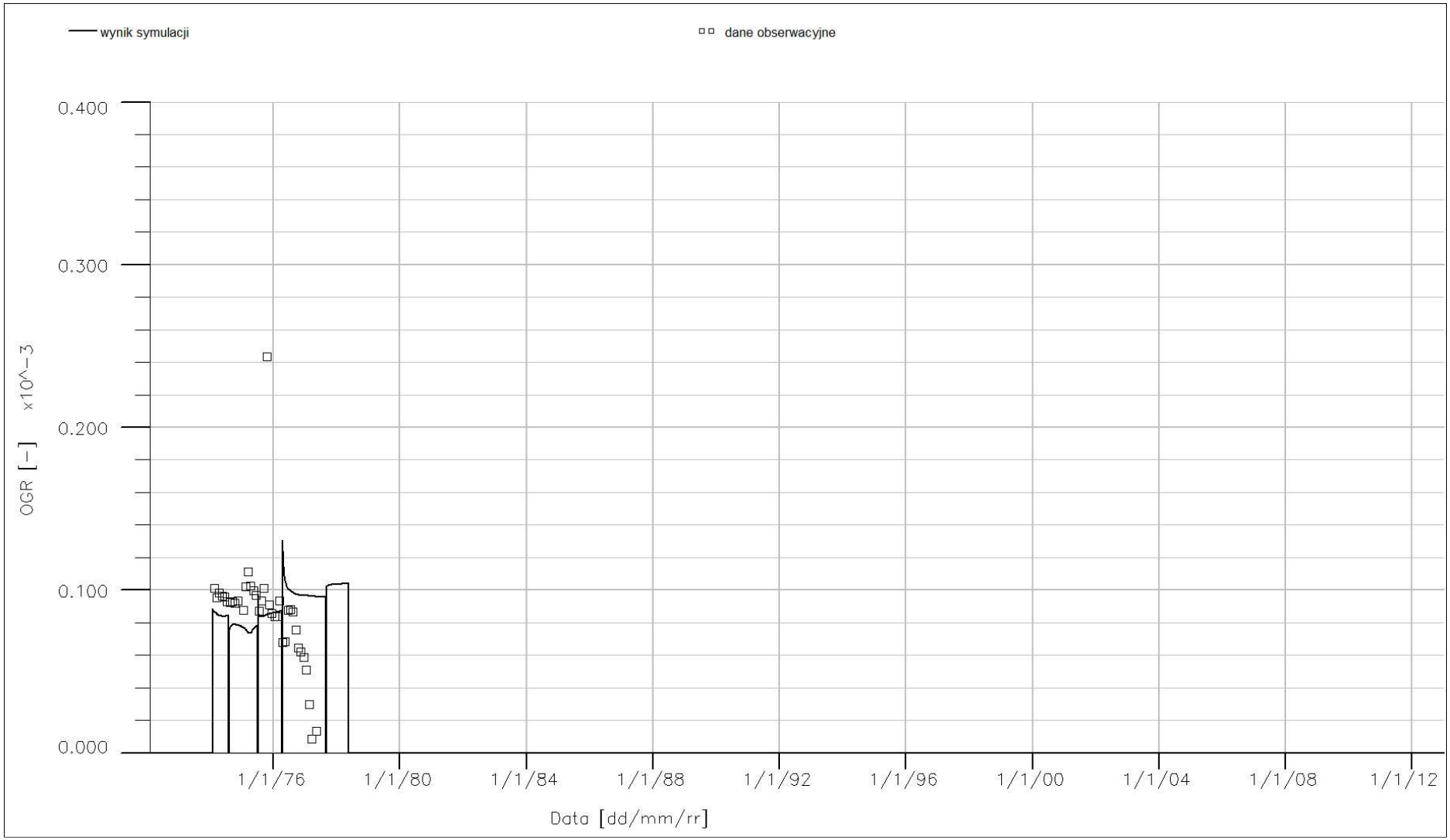
Rys. 3.8. Złoże Łąkta. Odwiert Leszczyna-24. Ciśnienie na spodzie odwiertu, P_{BHP}.

Przedmiot dokumentacji technicznej stanowi własność intelektualną Instytutu



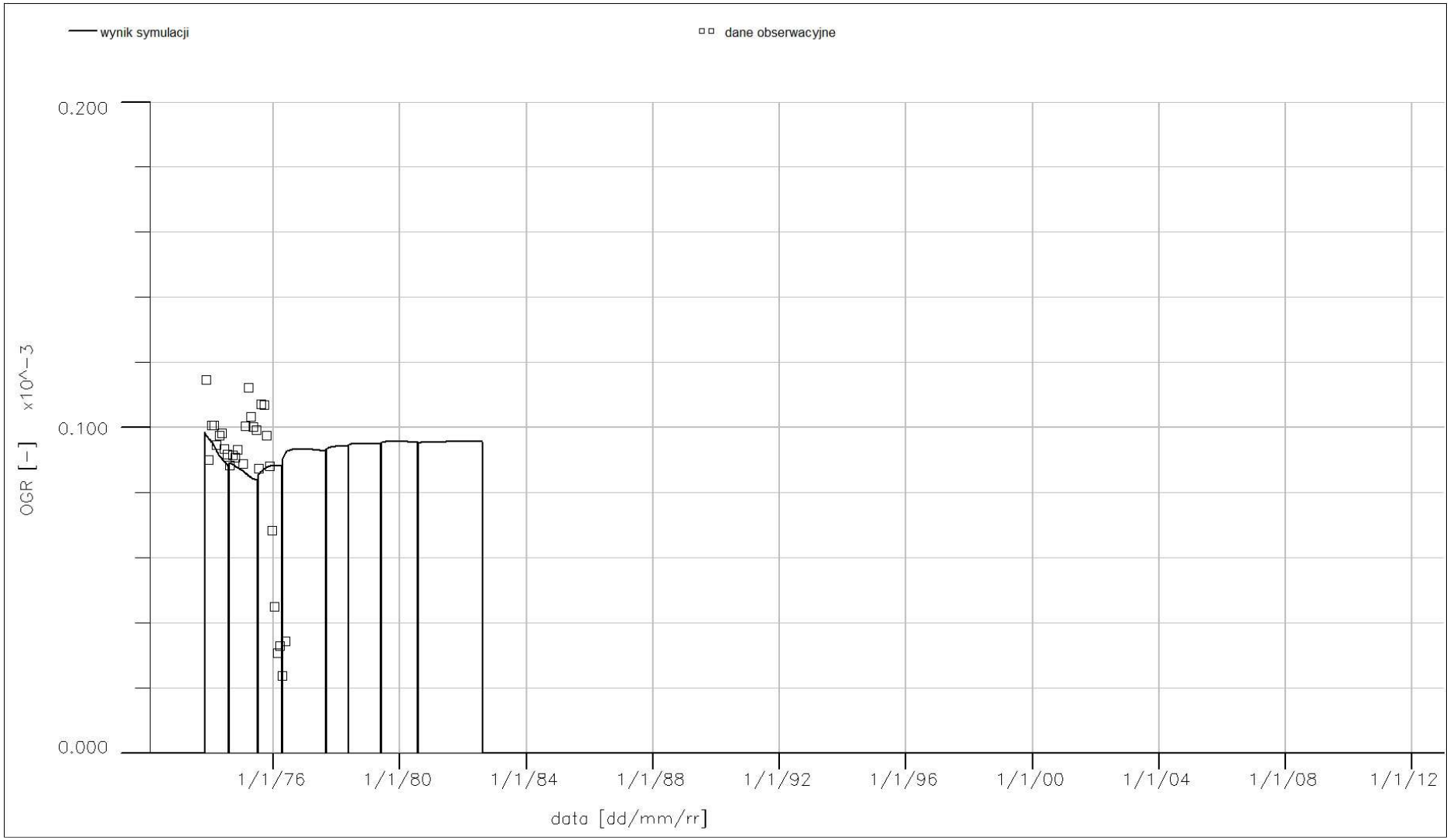
Rys. 3.9. Złoże Łąkta. Odwiert Łąkta-1. Wykładnik kondensatowy, OGR.

Przedmiot dokumentacji technicznej stanowi własność intelektualną Instytutu



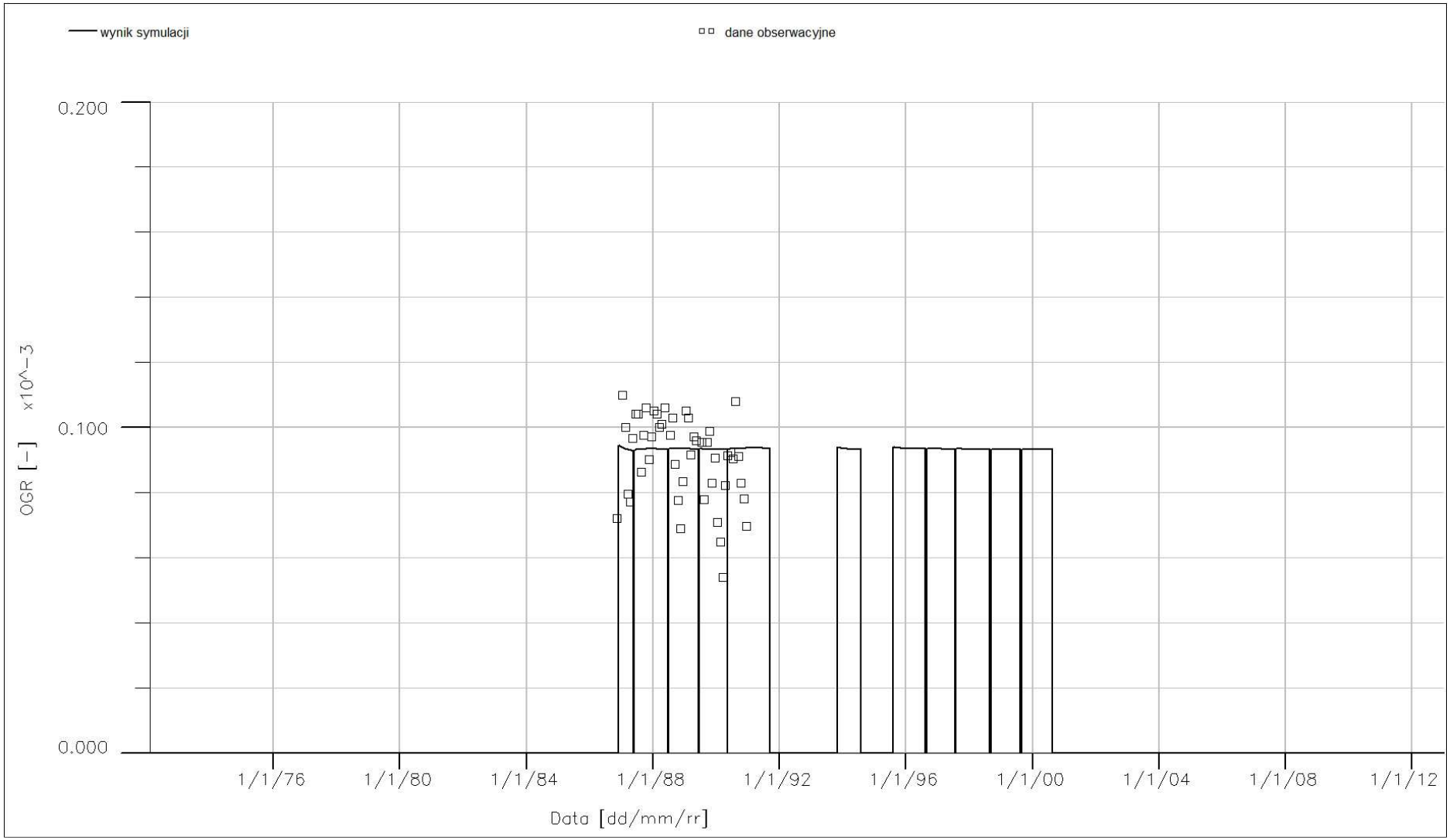
Rys. 3.10. Złoże Łąkta. Odwiert Łąkta-7. Wykładnik kondensatowy, OGR.

Przedmiot dokumentacji technicznej stanowi własność intelektualną Instytutu



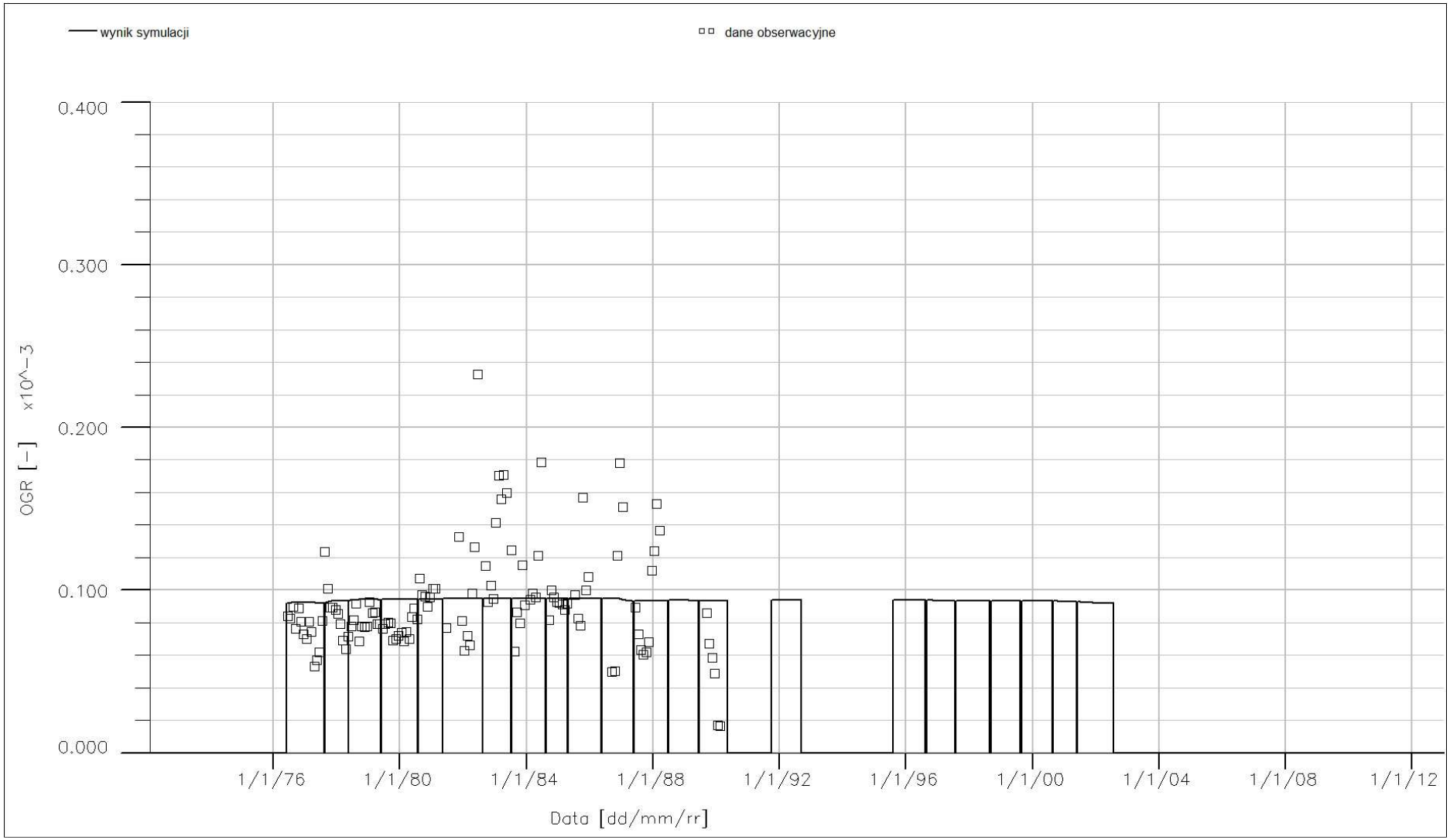
Rys. 3.11. Złoże Łąkta. Odwiert Łąkta-8. Wykładnik kondensatowy, OGR.

Przedmiot dokumentacji technicznej stanowi własność intelektualną Instytutu



Rys. 3.12. Złoże Łąkta. Odwiert Łąkta-27. Wykładnik kondensatowy, OGR.

Przedmiot dokumentacji technicznej stanowi własność intelektualną Instytutu



Rys. 3.13. Złoże Łąkta. Odwiert Leszczyna-24. Wykładnik kondensatowy, OGR.

Przedmiot dokumentacji technicznej stanowi własność intelektualną Instytutu

4. Symulacje procesów sekwestracji CO_2 w złożu Łąkta

Ze względu na pozostałe w złożu zasoby gazu ziemnego oraz wysoką aktywność wód złożowych przejawiającą się zawodnieniem znacznej części pierwotnej czapy gazowej proces sekwestracji symulowano równocześnie z kontynuowanym wydobyciem gazu ziemnego. Taka strategia pozwoliła na efektywne zwiększenie objętości złoża dostępnej dla sekwestrowanego CO_2. W celu jej realizacji założono funkcjonowanie 3 odwiertów położonych w szczycie struktury (Ł-27, Ł-28, Le-24) jako odwiertów wydobywczych (Rys. 4.1). Ich udostępnienia warstw gazonośnych zostały skorygowane tak, aby ograniczyć wydobycie wody podścielającej. Pozostałe odwierty, pracujące we wcześniejszych fazach jako wydobywcze a w fazie końcowej zawodnione, wykorzystano do zatłaczania CO_2.

W wariantach I.1 i I.2 do zatłaczania CO_2 zastosowano 4 odwierty: Ł-4, Ł-6, Ł-13 i Ł-25 (Rys. 4.2). Dla zbadania wpływu liczby i położenia odwiertów zatłaczających na efekty sekwestracji w wariancie II.1 i II.2 CO_2 tłoczono 9 odwiertami pokrywającym większy obszar złoża. Były to odwierty: Ł-1, Ł-3, Ł-4, Ł-6, Ł-7, Ł-8, Ł-12, Le-23 i Le-25 (Rys. 4.3).

Dla obydwu grup wariantów przyjęto wydajność wydobycia gazu ze złoża odpowiadającą maksymalnym dozwolonym wydajnościom 3 w/w odwiertów, co odpowiadało 207 000 Nm^3/d.

<u>Warianty I.1 i I.2</u>

Warianty te różnią się kryterium limitującym proces sekwestracji. W wariancie I.1 zatłaczanie CO_2 i wydobycie gazu ze złoża, (będącego w ogólności mieszaniną gazu ziemnego i zatłaczanego CO_2) prowadzono utrzymując ciśnienie złożowe nie przekraczające pierwotnego ciśnienia złożowego.

Natomiast w wariancie I.2 dopuszczono maksymalne ciśnienie złożowe o 5% powyżej pierwotnego ciśnienia złożowego.

Przedmiot dokumentacji technicznej stanowi własność intelektualną Instytutu

Wariant I.1

Proces sekwestracji składał się z 3 faz:

faza 1: zatłaczanie CO_2 ze stałą wydajnością do momentu wzrostu ciśnienia złożowego do poziomu ciśnienia limitującego, tj. pierwotnego ciśnienia złożowego,

faza 2: zatłaczanie CO_2 w ilości rekompensującej wydobycie gazu przy warunku utrzymania ciśnienia na stałym poziomie limitującym. W tej fazie procesu odwierty wydobywcze osiągały coraz wyższe zawartości CO_2 w wydobywanym gazie i w efekcie ograniczały wydobycie z chwilą osiągniecia maksymalnej dopuszczalnej koncentracji CO_2 w zbiorczym gazie (wynoszącej 80% Rys. 4.4) poprzez zmniejszenie wydobycia w odwiercie o największym zanieczyszczeniu dwutlenkiem węgla,

faza 3: po zakończeniu wydobycia gazu ze złoża kontynuowano zatłaczanie CO_2 w stopniu odpowiadającym propagacji ciśnienia na okalającą strefę zawodnioną przy jednoczesnym utrzymaniu ciśnienia limitującego w złożu. Proces sekwestracji zakończono 31 XII 2040 r.

Przebieg wydajności wydobycia ze złoża, zatłaczania CO_2 do złoża oraz zmiany ciśnienia złożowego przedstawiono dla wariantu I.1 na Rys. 4.5.

W efekcie zrealizowanego procesu sekwestracji do złoża zatłoczono 2.55×10^9 Nm^3 CO_2 i wydobyto 1.55×10^9 Nm^3 gazu będącego mieszaniną gazu rodzimego i zatłaczanego (Rys. 4.6) CO_2. Proces ten pozwolił zmagazynować w strukturze złoża Łąkta 2.24×10^9 Nm^3 CO_2 (Rys. 4.6).

Migrację zatłaczanego CO_2 w złożu przedstawiono w postaci map rozkładu tego gazu w fazie swobodnej w warstwie stropowej i na przekroju pionowym. Odpowiednio na:

Rys. 4.7 – po zakończeniu fazy 1 zatłaczania, XII 2013,

Rys. 4.8 – po zakończeniu fazy 2 zatłaczania, XII 2034,

Rys. 4.9 – po zakończeniu fazy 3 zatłaczania, XII 2040,

Przedmiot dokumentacji technicznej stanowi własność intelektualną Instytutu

Rys. 4.10 – po okresie relaksacji (1000 lat).

Zatłaczany CO_2 pozostał również w fazie wodnej jako gaz rozpuszczony co przedstawiono Rys. 4.11.

Powyższe rozkłady pokazują, że zatłaczany CO_2 wypełnia pierwotny obszar pułapki gazowej i nie stwarza ryzyka jego ucieczki w kierunkach lateralnych.

Wariant I.2

W wariancie tym podniesiono maksymalne dopuszczalne ciśnienie złożowe o 5% w stosunku do wariantu I.1.

Proces sekwestracji przebiegał analogicznie do Wariantu I.1 – składał się również z 3 faz – Rys. 4.12. Z powodu podwyższenia ciśnienia limitującego, faza 1 trwała znacznie dłużej. Pozostałe fazy przebiegały podobnie.

W efekcie procesu sekwestracji zrealizowanego w omawianym wariancie do złoża zatłoczono 4.69×10^9 Nm^3 CO_2 a wydobyto 1.73×10^9 Nm^3 gazu (Rys. 4.13). Proces ten pozwolił zmagazynować w omawianej strukturze 4.24×10^9 Nm^3 CO_2.

W omawianym wariancie I.2 zatłaczany CO_2 wypełnia w większym stopniu analizowaną strukturę, chociaż schemat migracji tego gazu w ogólnych zarysach przypomina analogiczne wielkości dla wariantu I.1.

Odpowiednie rozkłady koncentracji swobodnego CO_2 w strukturze złoża przedstawiono na Rys. 4.14 (po fazie 1). Rys. 4.15 (po fazie 2) Rys. 4.16 (po fazie 3) i Rys. 4.17 (po relaksacji). Na Rys. 4.18 przedstawiono stężenie CO_2 rozpuszczonego w wodzie złożowej. Widać na nim zwiększony obszar (w porównaniu do Wariantu I.1) rozpuszczonego CO_2.

Pomimo wyraźnie zwiększonej objętości zatłoczonego CO_2, obszar zajęty przez ten gaz zawiera się wewnątrz pułapki złożowej i nie grozi ucieczką poza strefę sekwestracji. Jednocześnie należy podkreślić, że próby dalszego zwiększenia ilości zatłaczanego CO_2 (poprzez zwiększenie ciśnienia limitującego) wskazują

Przedmiot dokumentacji technicznej stanowi własność intelektualną Instytutu

jednoznacznie na możliwość ucieczki gazu poprzez „siodło” zlokalizowane na południowo-wschodnich peryferiach struktury.

Warianty II.1 i II.2

W celu zbadania możliwości dalszego zwiększenia pojemności sekwestracyjnej struktury złoża Łąkta w kolejnych wariantach rozpatrzono efekt zmiany liczby i położenia odwiertów zatłaczających zapewniającej potencjalnie bardziej jednorodne wypełnienie struktury zatłaczanym gazem.

Pod względem ciśnienia limitującego zatłaczanie, Warianty II.1 i II.2 są analogiczne do Wariantów I.1 i I.2, tzn. II.1 przewiduje maksymalne ciśnienie równe ciśnieniu pierwotnemu a II.2 ciśnieniu podwyższonemu o 5%.

Wariant II.1

W omawianym wariancie proces sekwestracji składał się z dwu faz, tj.:

faza 1: zatłaczanie CO_2 ze stałą wydajnością do momentu wzrostu ciśnienia złożowego do poziomu ciśnienia limitującego, tj. pierwotnego ciśnienia złożowego,

faza 2: zatłaczanie CO_2 w ilości rekompensującej wydobycie gazu przy warunku utrzymania ciśnienia na stałym poziomie limitującym. W tej fazie procesu odwierty wydobywcze osiągały coraz wyższe zawartości CO_2 w wydobywanym gazie i w efekcie ograniczały wydobycie z chwilą osiągniecia maksymalnej dopuszczalnej koncentracji CO_2 w zbiorczym gazie (wynoszącej 80% Rys. 4.19) poprzez zmniejszenie wydobycia w odwiercie o największym zanieczyszczeniu dwutlenkiem węgla.

Faza 2 trwała do końca przyjętego okresu zatłaczania, tj. do 31. XII 2040 r. czyli do końca pracował przynajmniej jeden odwiert wydobywczy.

Przebieg wydajności wydobycia ze złoża, zatłaczanie CO_2 do złoża oraz zmiany ciśnienia złożowego dla niniejszego wariantu przedstawiono na Rys. 4.20. W efekcie

Przedmiot dokumentacji technicznej stanowi własność intelektualną Instytutu

omawianego procesu sekwestracji do złoża zatłoczono 2.53×10^9 Nm^3 CO_2 a wydobyto 1.57×10^9 Nm^3 gazu (Rys. 4.21). Proces pozwolił zmagazynować 2.18×10^9 Nm^3 CO_2.

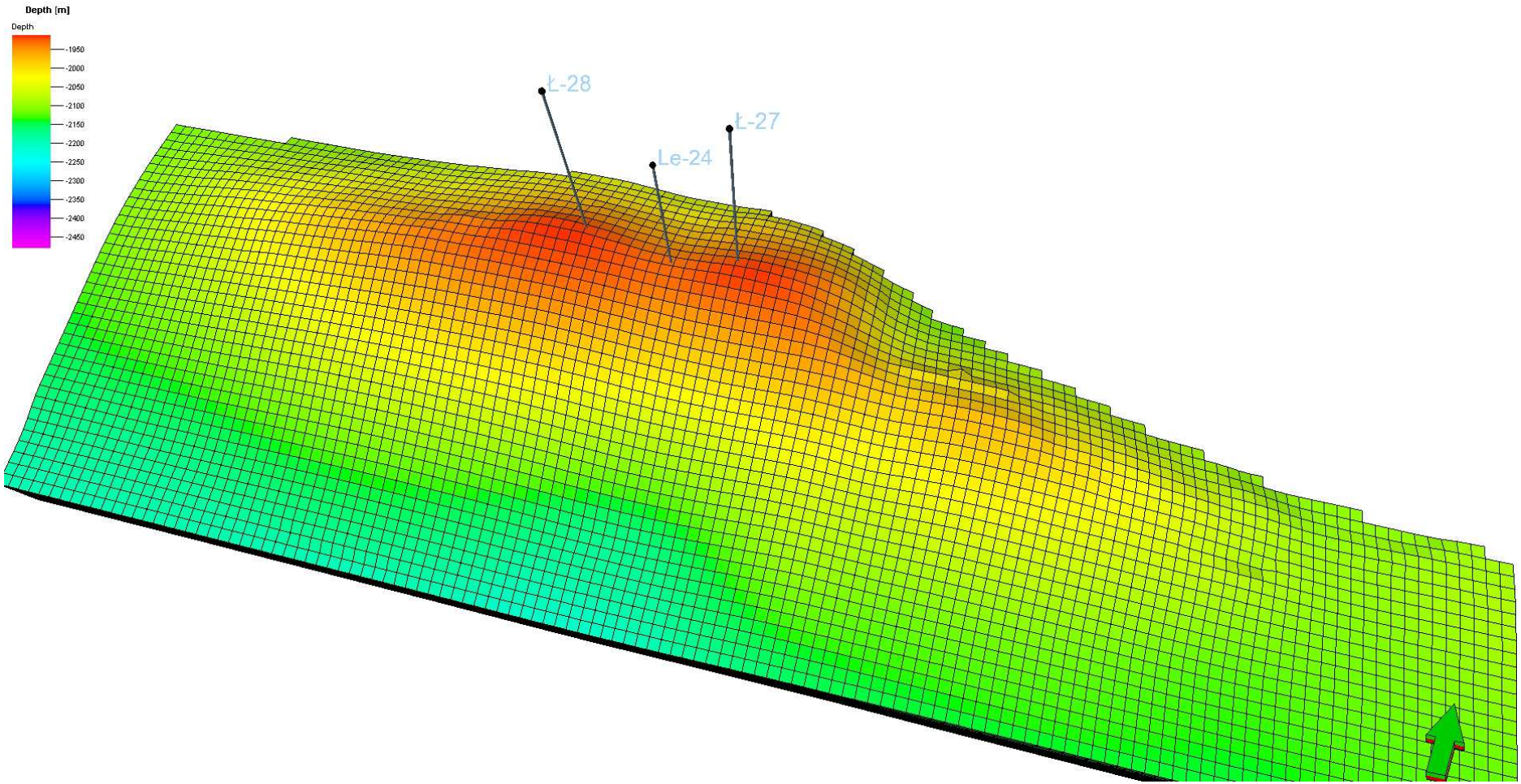
Wariant II.2

W wariancie tym użyto 9 odwiertów zatłaczających jak w Wariancie II.1, a jako maksymalne ciśnienie złożowe przyjęto zwiększone (105%) ciśnienie pierwotne jak w Wariancie I.2. W tych warunkach proces sekwestracji składał się z 2 faz (jak Wariant I.2) a jego przebieg przedstawiono na Rys. 4.24 w postaci zmian wydajności zatłaczania CO_2, wydajności wydobycia gazu ze złoża i ciśnienia złożowego. W rezultacie procesu sekwestracji zrealizowanego wg Wariantu II.2 do złoża zatłoczono 4.63×10^9 Nm^3 CO_2 a wydobyto 1.73×10^9 Nm^3 gazu (Rys. 2.45). W strukturze złoża zmagazynowano 4.13×10^9 Nm^3 CO_2. Uzyskane wyniki odpowiadają w przybliżeniu rezultatom wariantu I.2. Nieco mniejsza ilość zmagazynowanego CO_2 (4.13 vs. 4.24×10^9 Nm^3) wynika z większej koncentracji CO_2 w wydobywanym gazie (Rys. 4.26), co z kolei jest konsekwencją nieznacznie szybszej migracji zatłaczanego CO_2 do odwiertów wydobywczych wynikającą z innego, wzajemnego usytuowania tych odwiertów.

Przedmiot dokumentacji technicznej stanowi własność intelektualną Instytutu

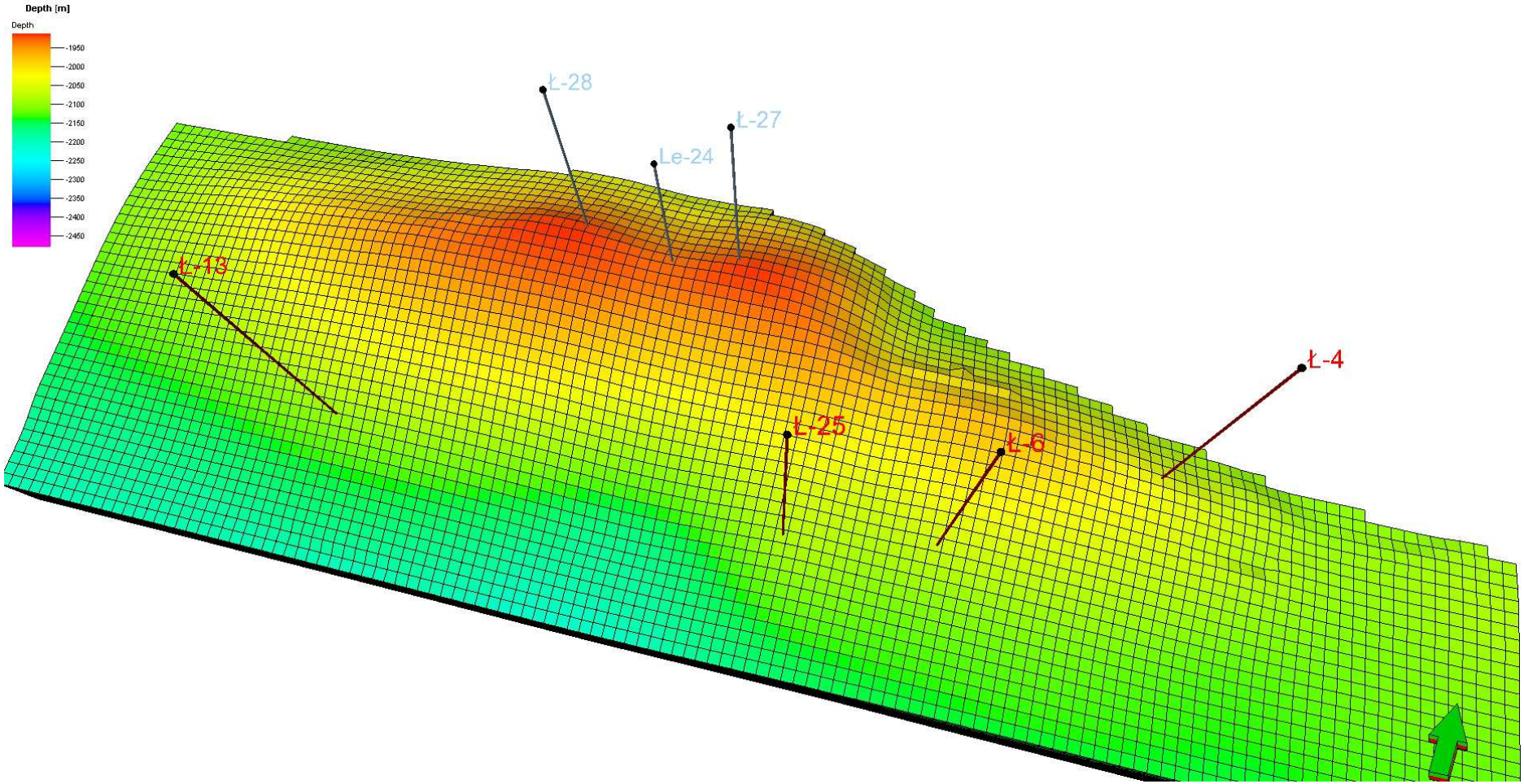
4.1. Rysunki do Rozdziału 4

Przedmiot dokumentacji technicznej stanowi własność intelektualną Instytutu



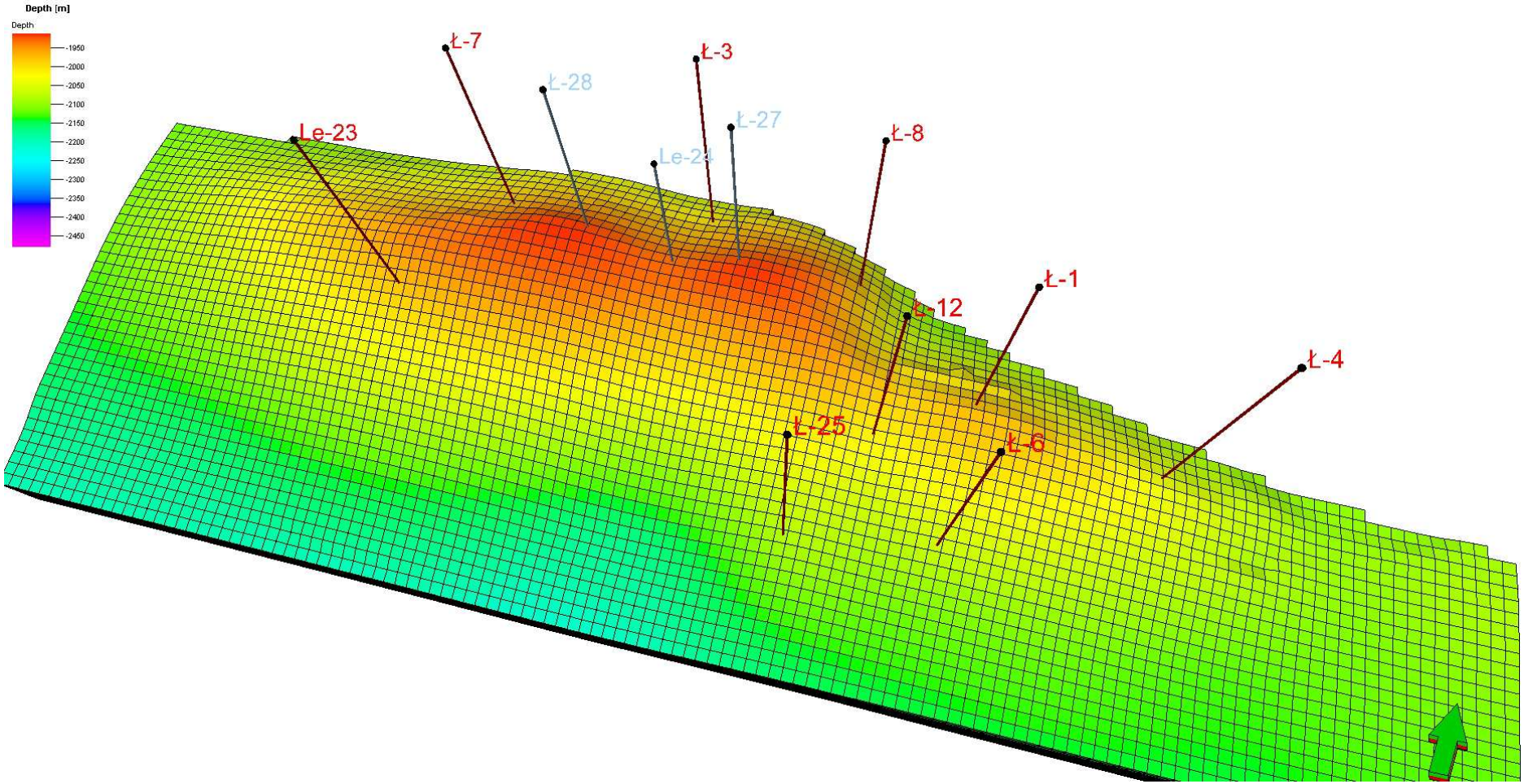
Rys. 4.1. Złoże Łąkta. Prognozy procesu sekwestracji z wydobyciem gazu. Położenie odwiertów wydobywczych.

Przedmiot dokumentacji technicznej stanowi własność intelektualną Instytutu



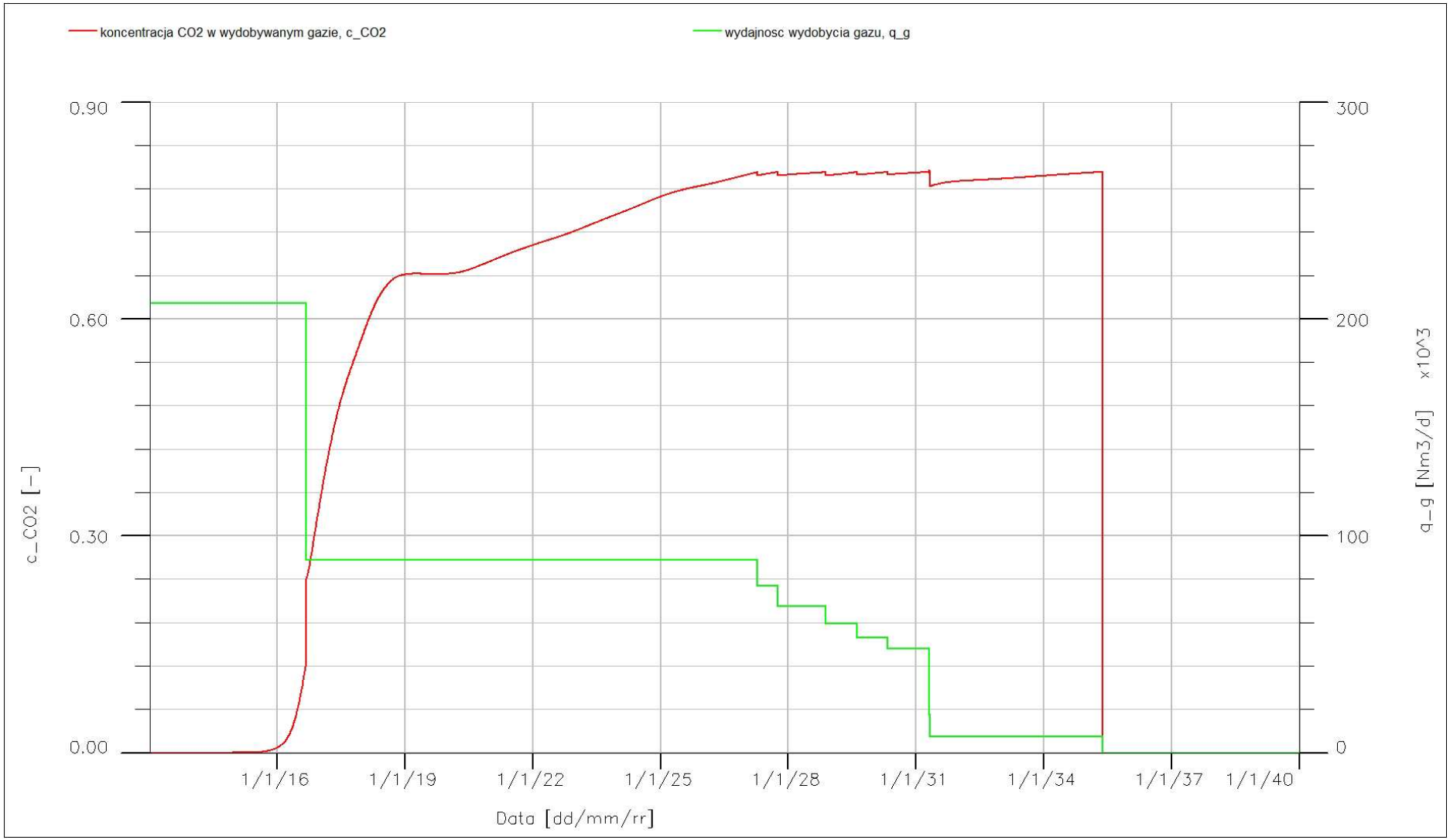
Rys. 4.2. Złoże Łąkta. Wariant I.1 i I.2. Położenie odwiertów wydobywczych (niebieskie) i zatłaczających (czerwone).

Przedmiot dokumentacji technicznej stanowi własność intelektualną Instytutu



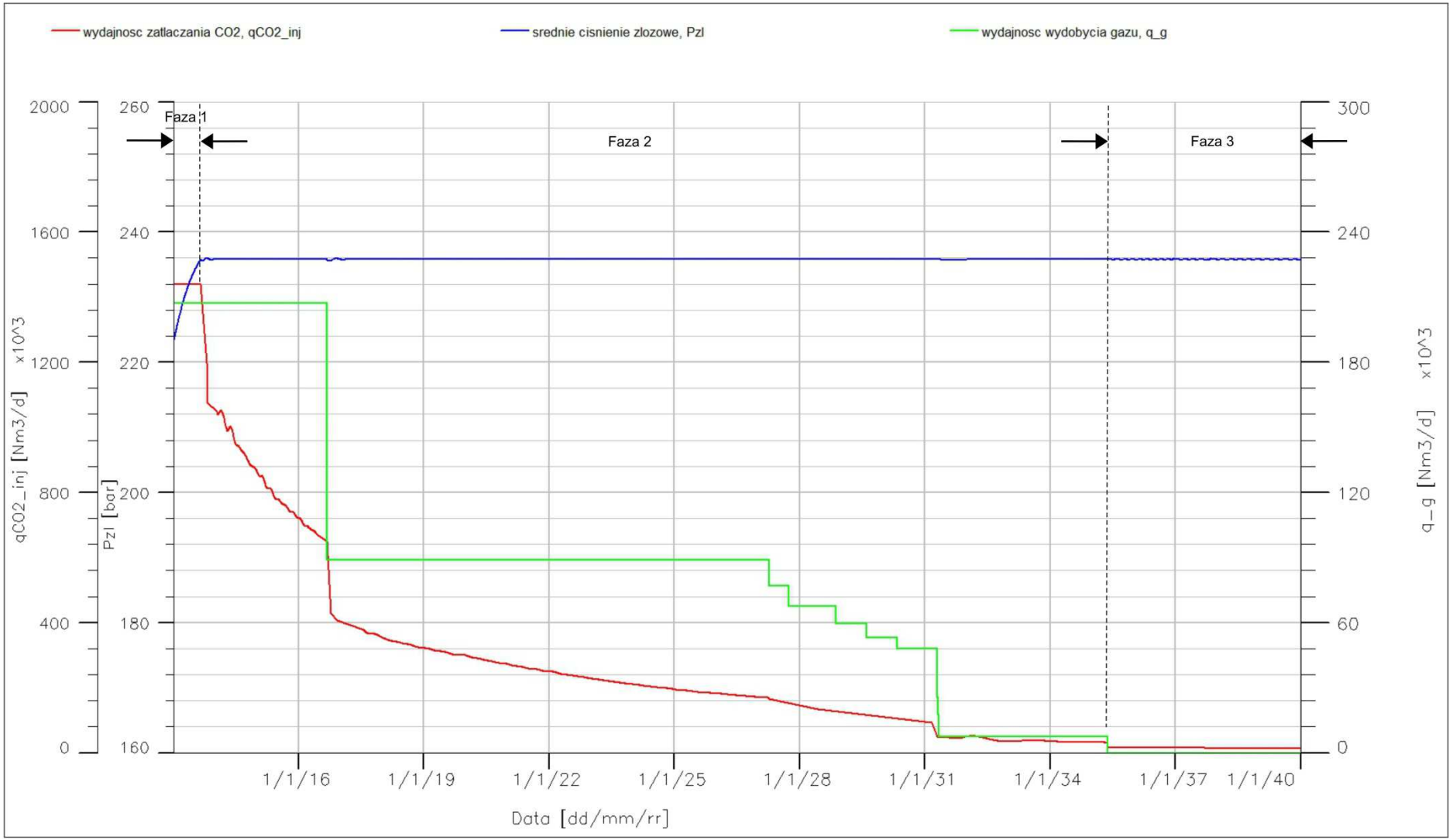
Rys. 4.3. Złoże Łąkta. Wariant II.1 i II.2. Położenie odwiertów wydobywczych (niebieskie) i zatłaczających (czerwone).

Przedmiot dokumentacji technicznej stanowi własność intelektualną Instytutu



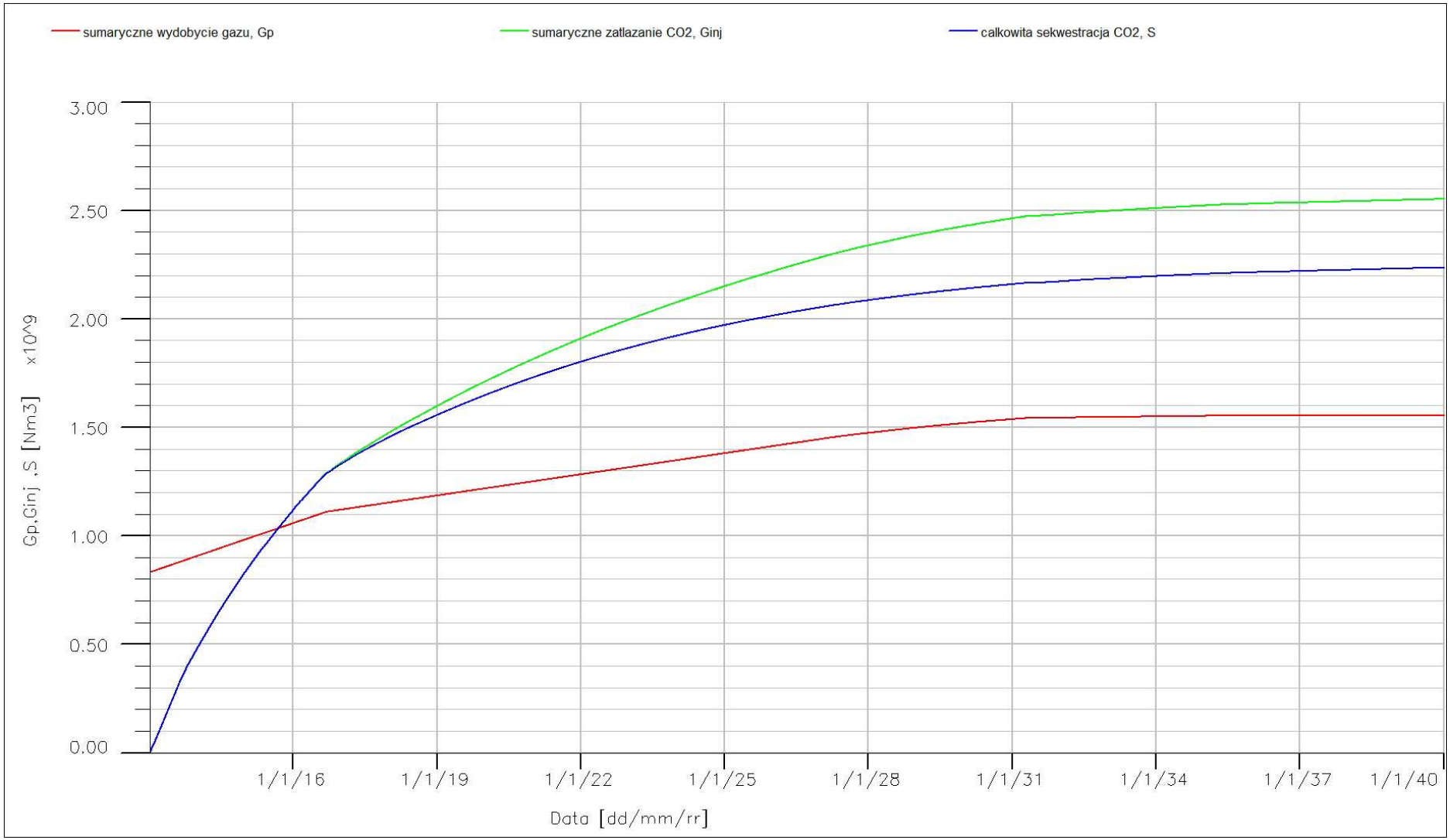
Rys. 4.4. Złoże Łąkta. Prognoza wydobycia gazu. Wariant I.1. Wydajność wydobycia gazu i koncentracja CO_2 w wydobywanym gazie.

Przedmiot dokumentacji technicznej stanowi własność intelektualną Instytutu



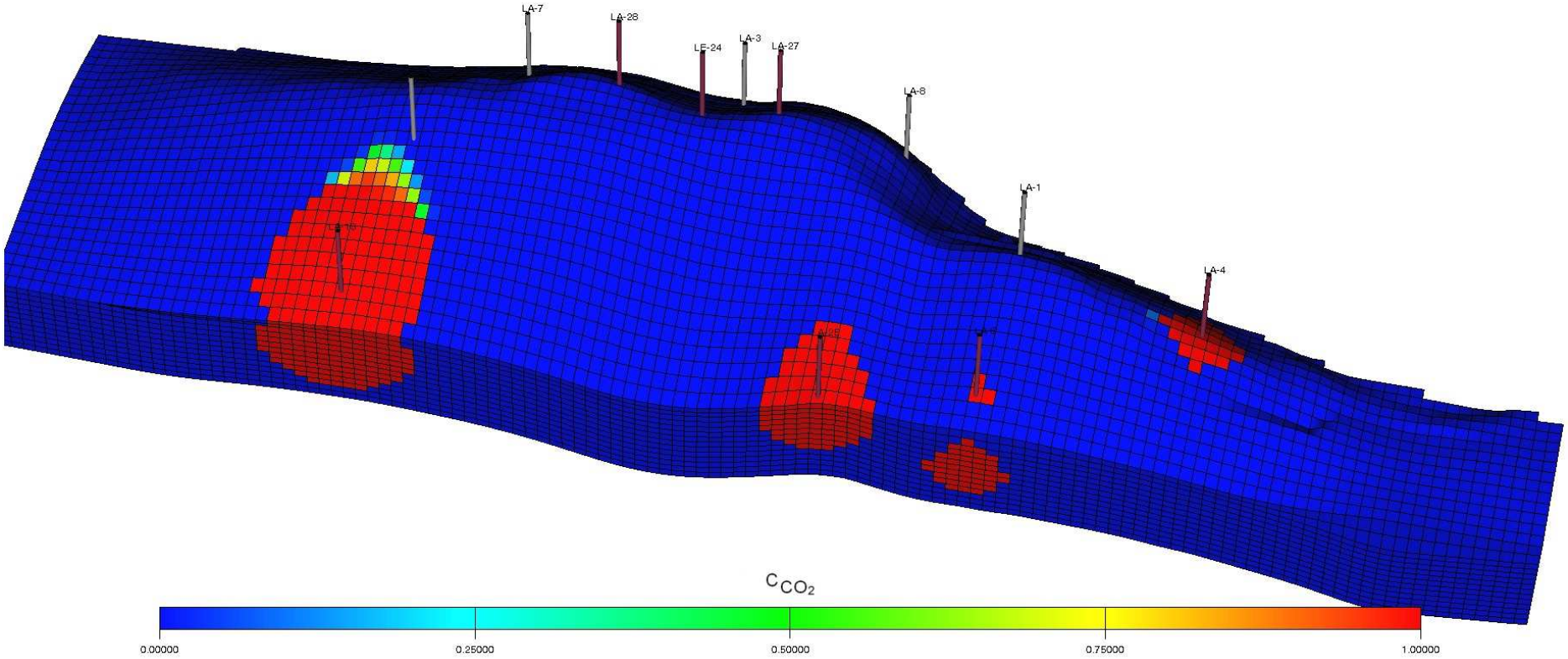
Rys. 4.5. Złoże Łąkta. Prognoza procesu sekwestracji. Wariant I.1. Wydajność zatłaczania CO_2, wydobycie gazu ze złoża i średnie ciśnienie złożowe.

Przedmiot dokumentacji technicznej stanowi własność intelektualną Instytutu



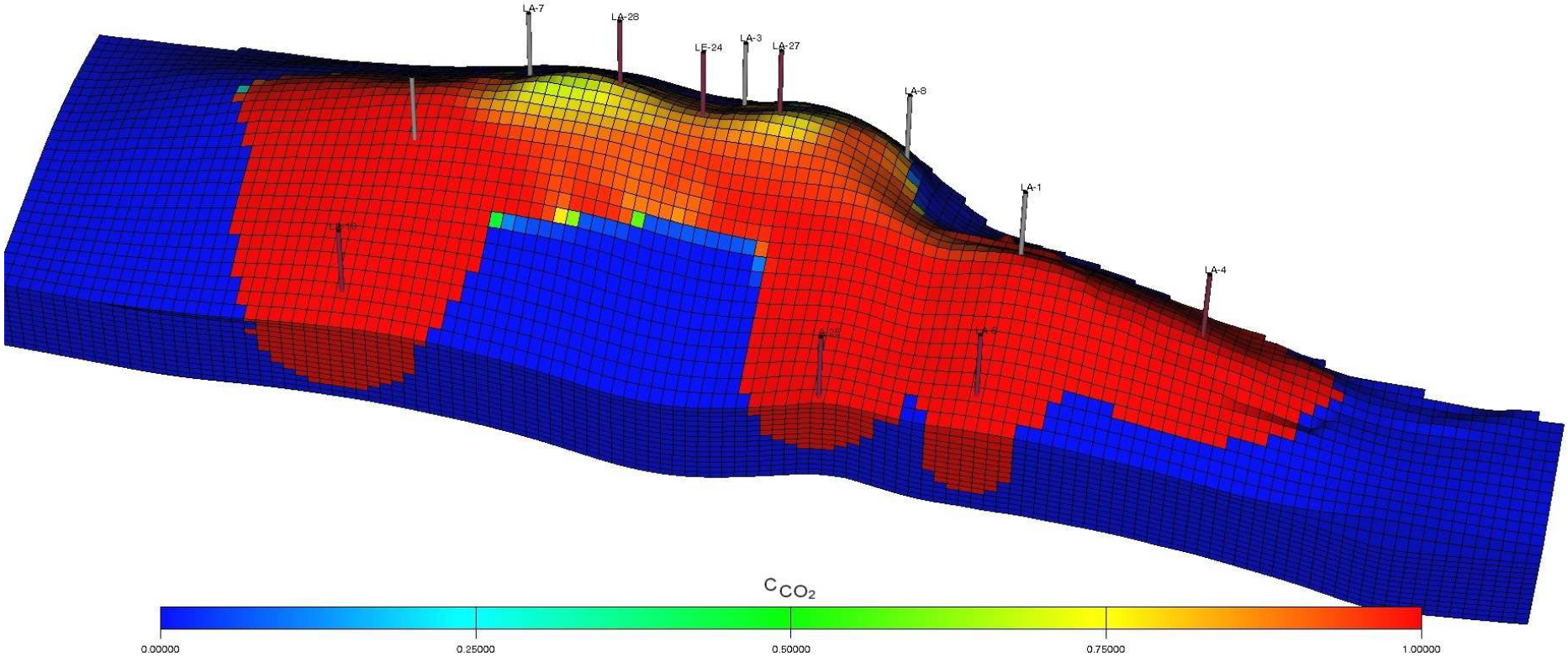
Rys. 4.6. Złoże Łąkta. Prognoza procesu sekwestracji CO_2.Wariant I.1. Sumaryczna ilość zatłaczanego CO_2, wydobytego gazu i pojemność zmagazynowanego CO_2.

Przedmiot dokumentacji technicznej stanowi własność intelektualną Instytutu



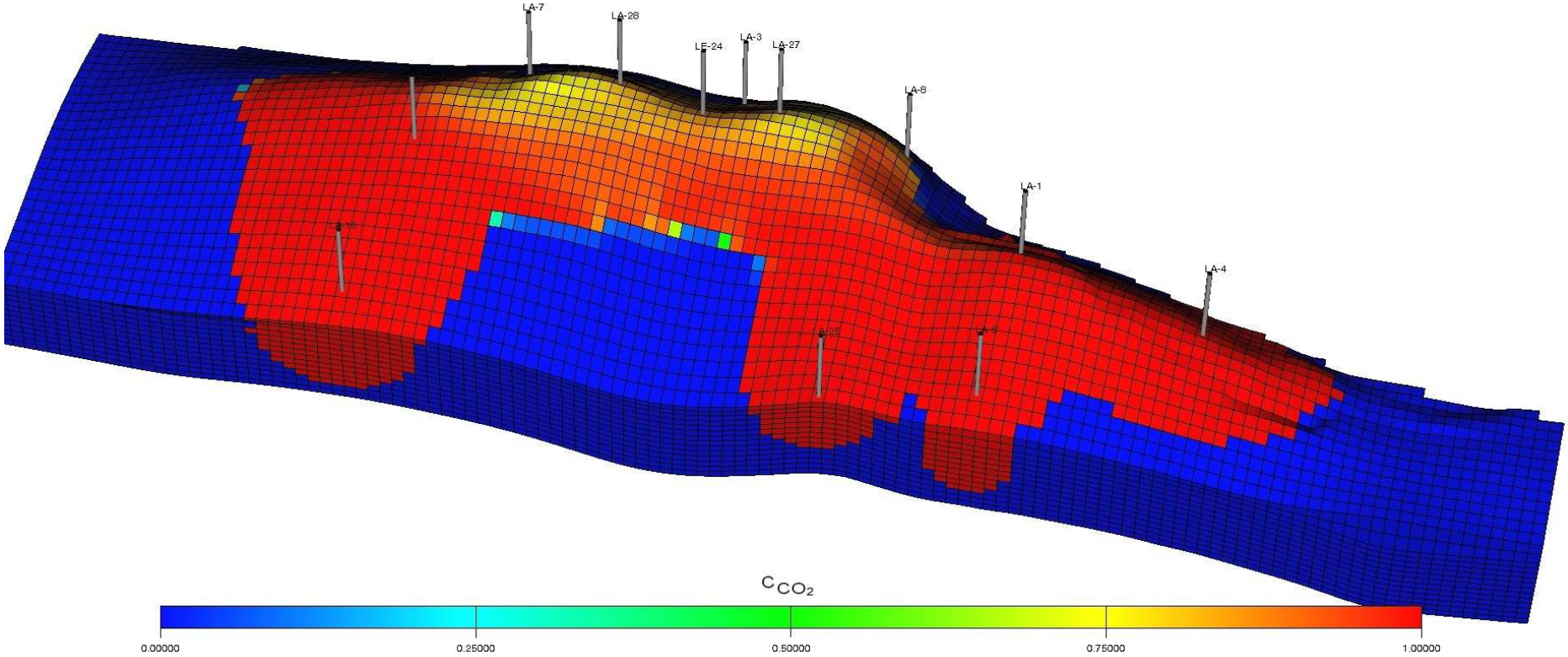
Rys. 4.7. Złoże Łąkta. Prognoza procesu sekwestracji. Wariant I.1. Rozkład koncentracji CO_2 w fazie gazowej na koniec fazy 1 zatłaczania.

Przedmiot dokumentacji technicznej stanowi własność intelektualną Instytutu



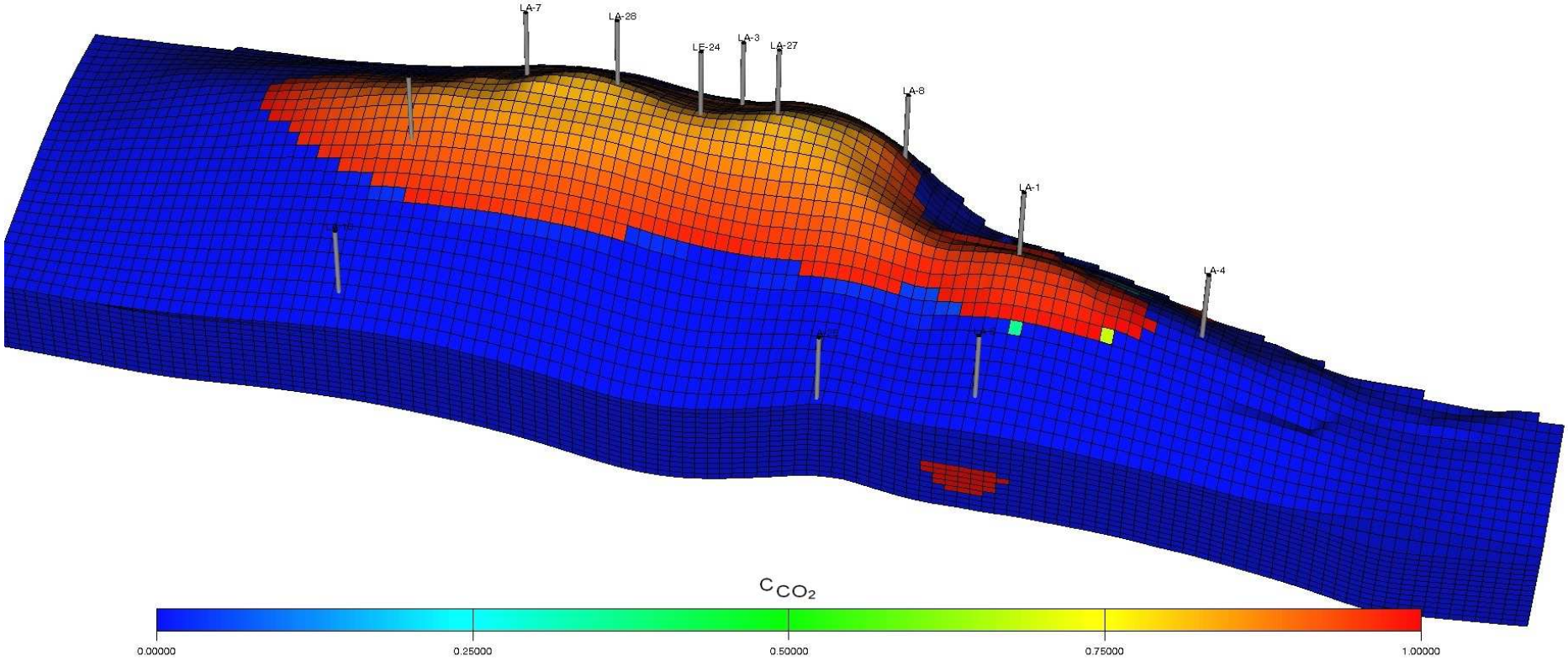
Rys. 4.8. Złoże Łąkta. Prognoza procesu sekwestracji. Wariant I.1. Rozkład koncentracji CO_2 w fazie gazowej na koniec fazy 2 zatłaczania.

Przedmiot dokumentacji technicznej stanowi własność intelektualną Instytutu



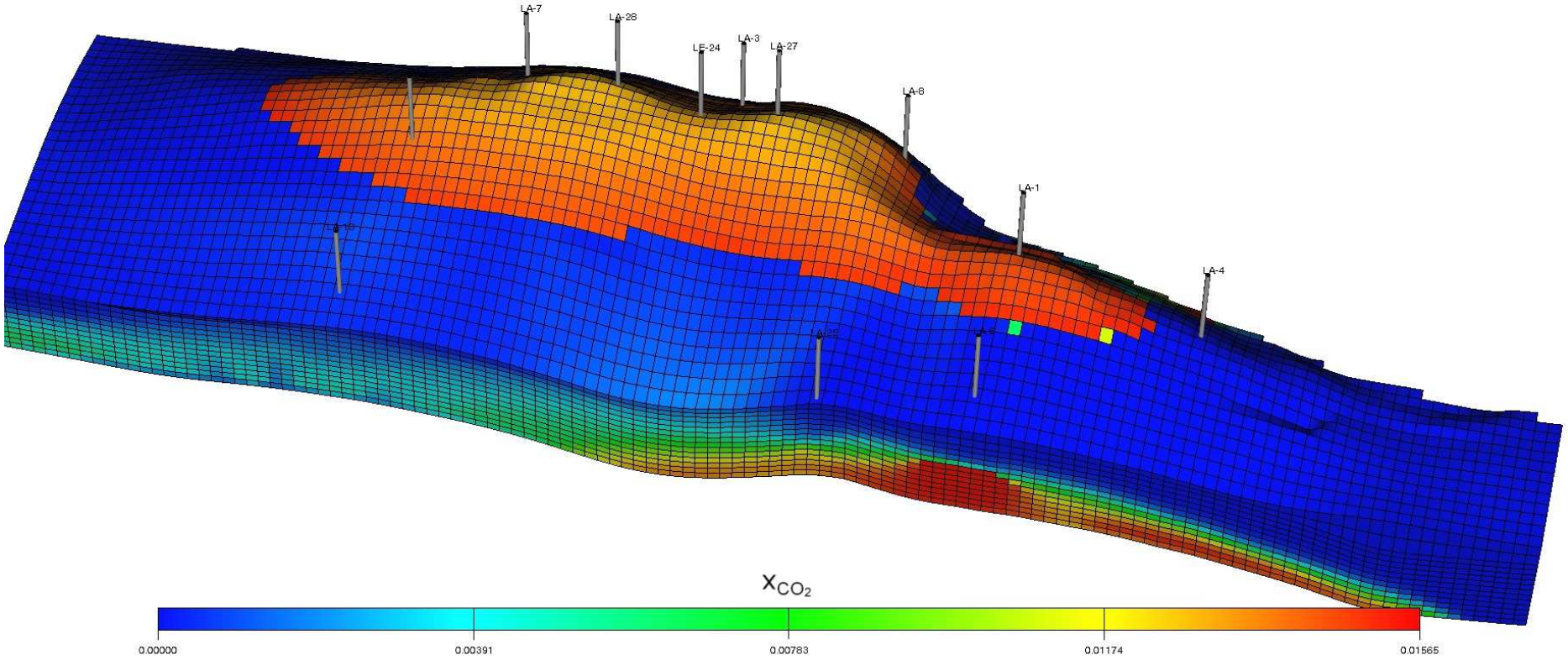
Rys. 4.9. Złoże Łąkta. Prognoza procesu sekwestracji. Wariant I.1. Rozkład koncentracji CO_2 w fazie gazowej na koniec fazy 3 zatłaczania.

Przedmiot dokumentacji technicznej stanowi własność intelektualną Instytutu



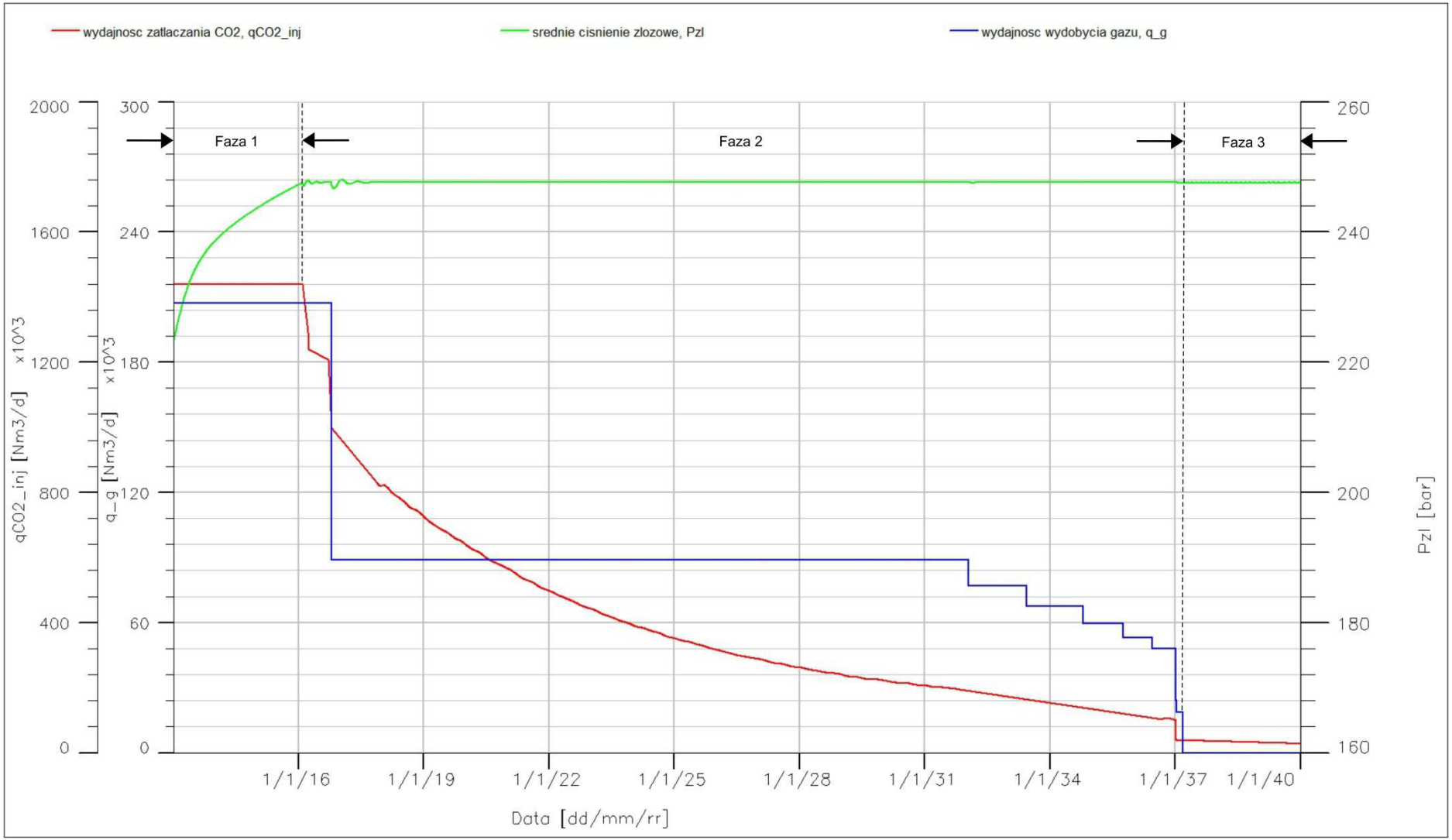
Rys. 4.10. Złoże Łąkta. Prognoza procesu sekwestracji. Wariant I.1. Rozkład koncentracji CO_2 w fazie gazowej na koniec okresu relaksacji.

Przedmiot dokumentacji technicznej stanowi własność intelektualną Instytutu



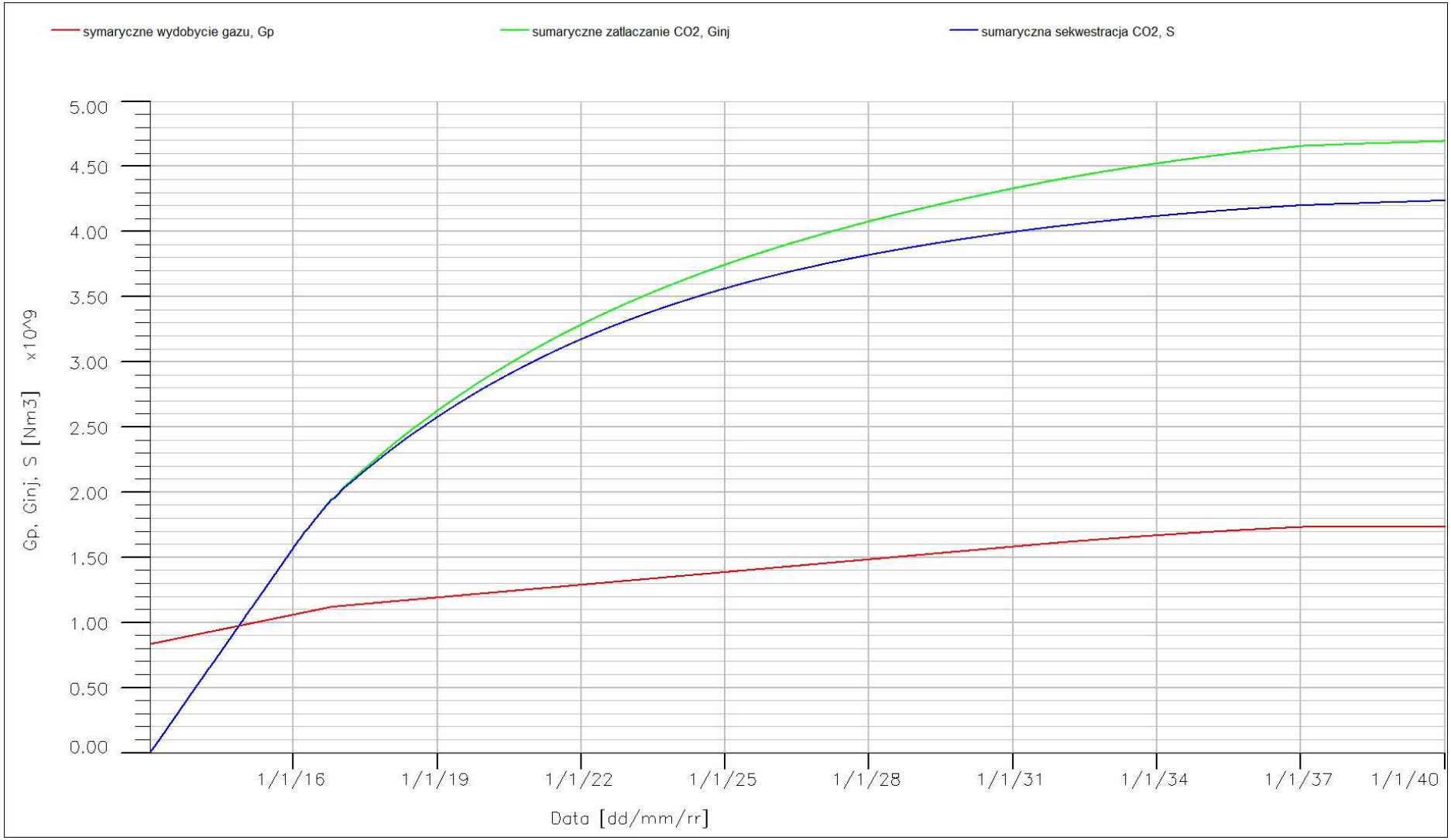
Rys. 4.11. Złoże Łąkta. Prognoza procesu sekwestracji. Wariant I.1. Zawartość rozpuszczonego CO_2, x_{CO2} w fazie wodnej na koniec okresu relaksacji.

Przedmiot dokumentacji technicznej stanowi własność intelektualną Instytutu



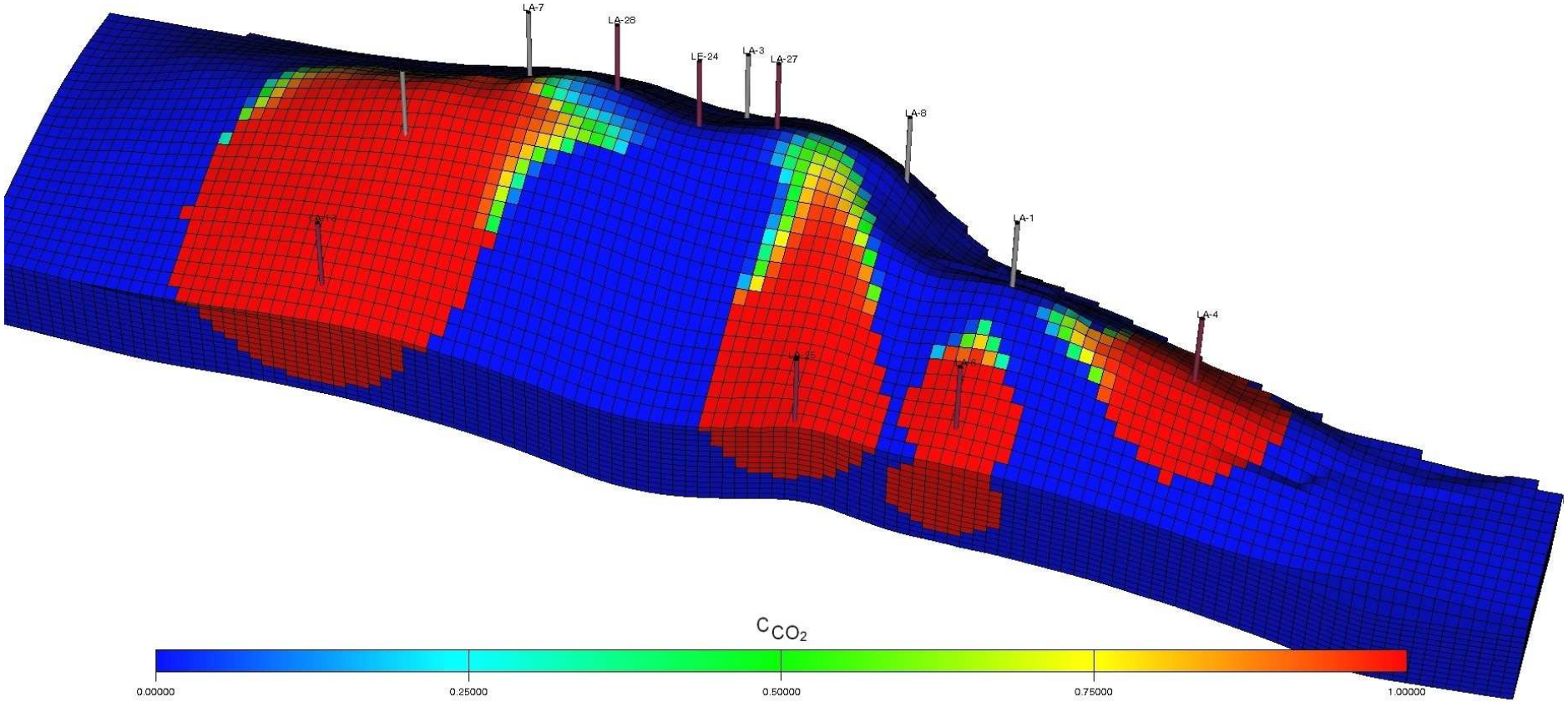
Rys. 4.12. Złoże Łąkta. Prognoza procesu sekwestracji. Wariant I.2. Wydajność zatłaczania CO_2, wydobycie gazu ze złoża i średnie ciśnienie złożowe.

Przedmiot dokumentacji technicznej stanowi własność intelektualną Instytutu



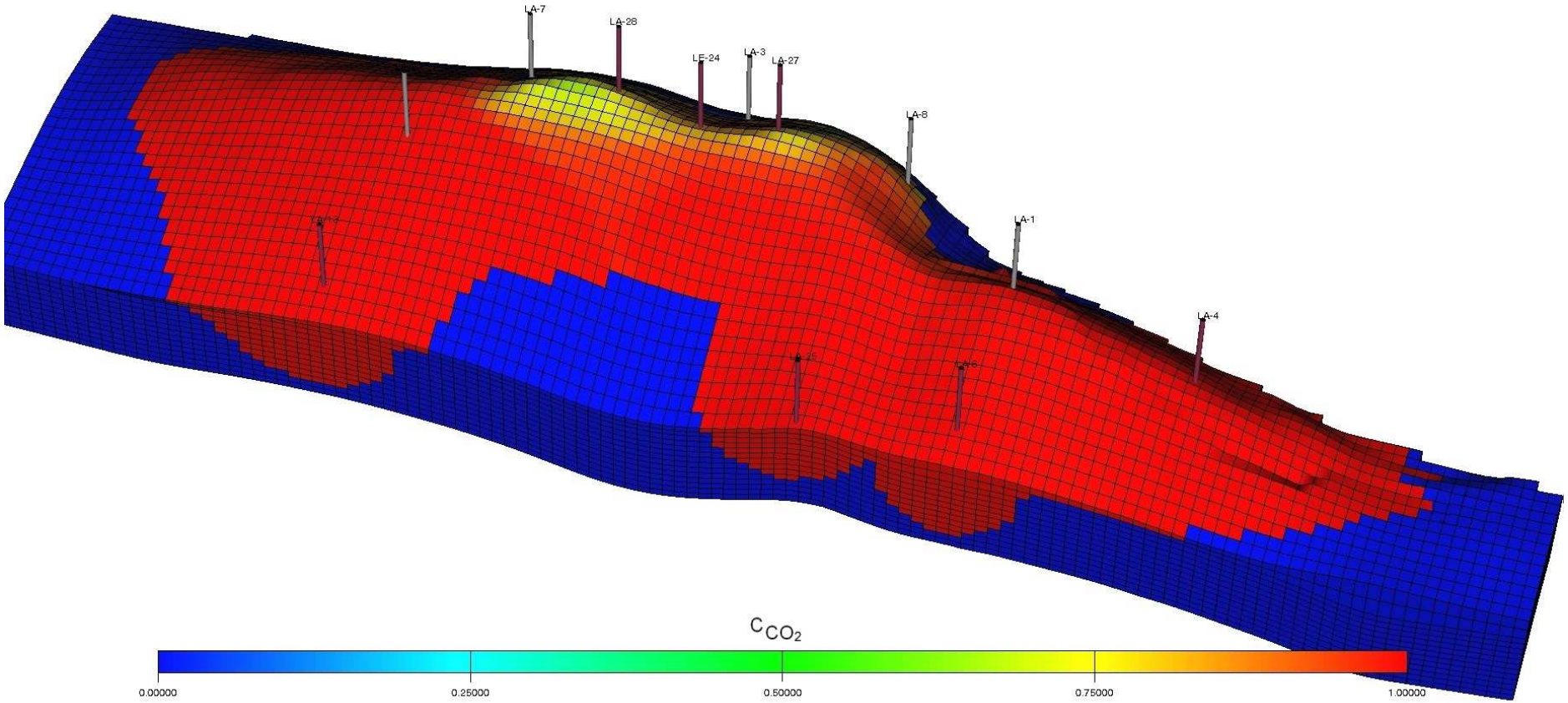
Rys. 4.13. Złoże Łąkta. Prognoza procesu sekwestracji CO_2.Wariant I.2. Sumaryczna ilość zatłaczanego CO_2, wydobytego gazu i pojemność zmagazynowanego CO_2.

Przedmiot dokumentacji technicznej stanowi własność intelektualną Instytutu



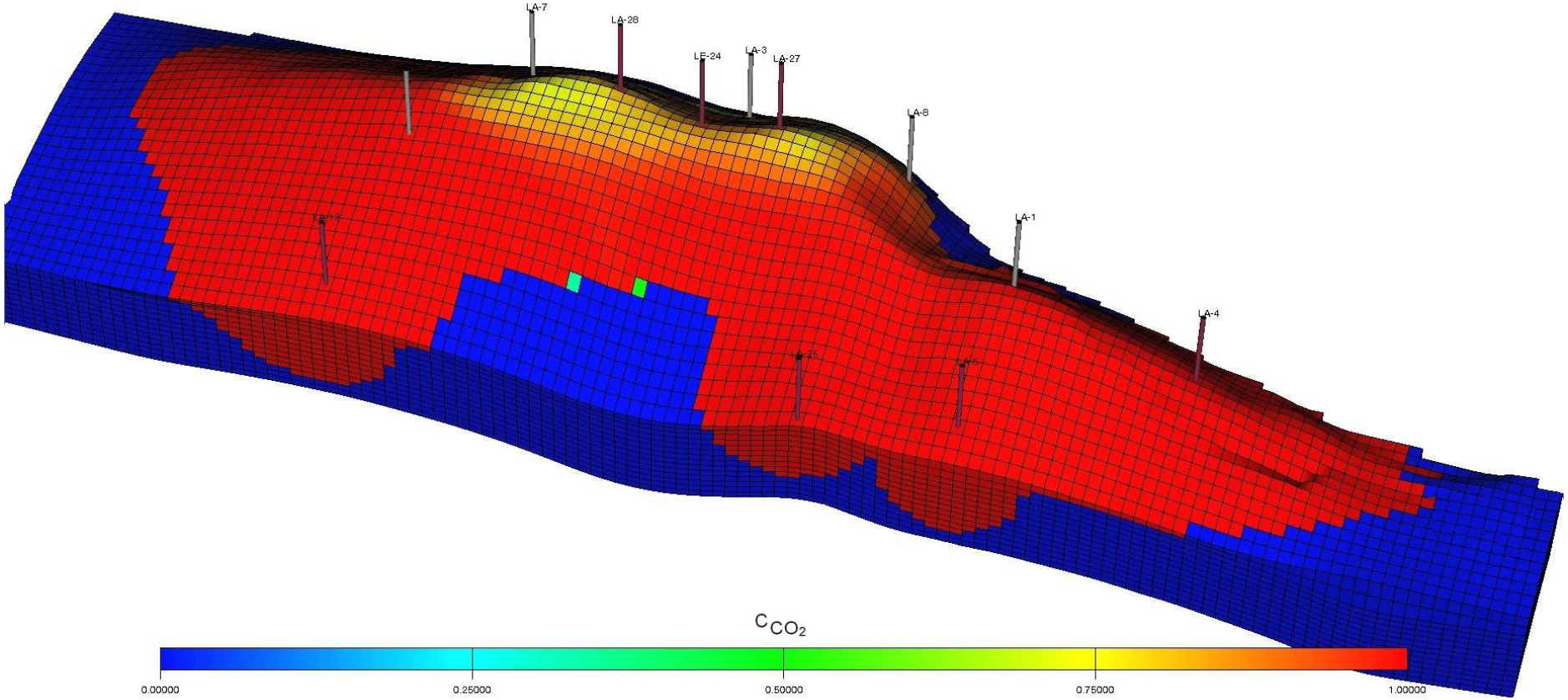
Rys. 4.14. Złoże Łąkta. Prognoza procesu sekwestracji. Wariant I.2. Rozkład koncentracji CO_2 w fazie gazowej na koniec fazy 1 zatłaczania.

Przedmiot dokumentacji technicznej stanowi własność intelektualną Instytutu



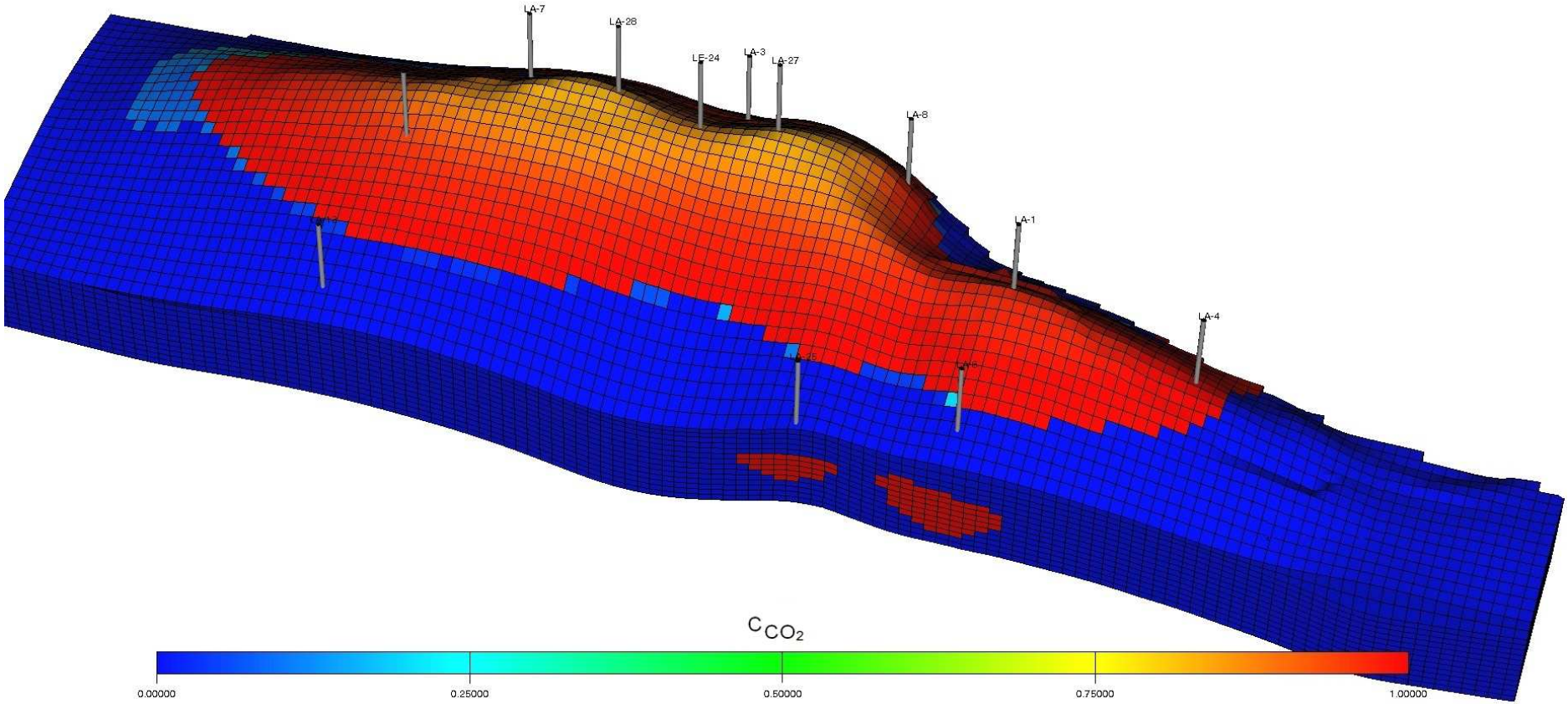
Rys. 4.15. Złoże Łąkta. Prognoza procesu sekwestracji. Wariant I.2. Rozkład koncentracji CO_2 w fazie gazowej na koniec fazy 2 zatłaczania.

Przedmiot dokumentacji technicznej stanowi własność intelektualną Instytutu



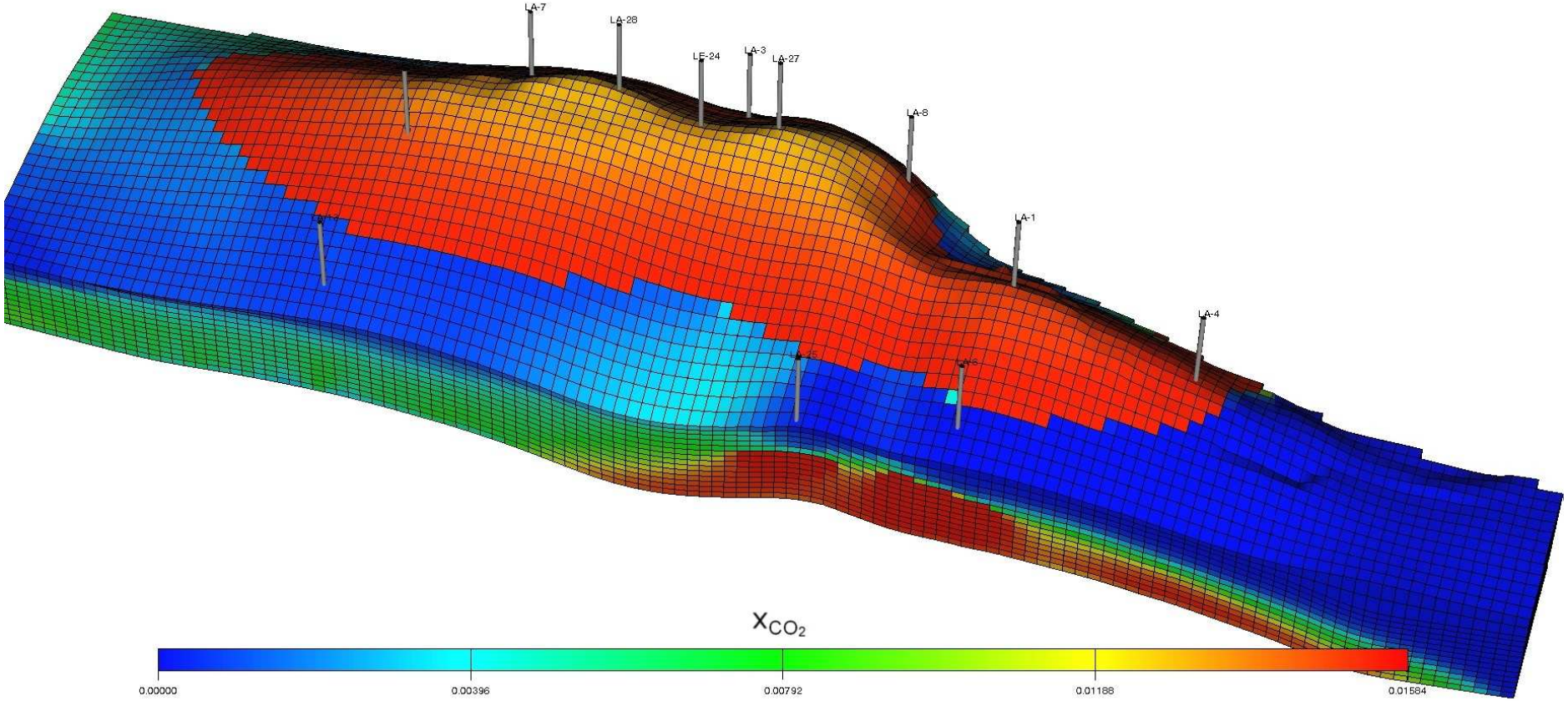
Rys. 4.16. Złoże Łąkta. Prognoza procesu sekwestracji. Wariant I.2. Rozkład koncentracji CO_2 w fazie gazowej na koniec fazy 3 zatłaczania.

Przedmiot dokumentacji technicznej stanowi własność intelektualną Instytutu



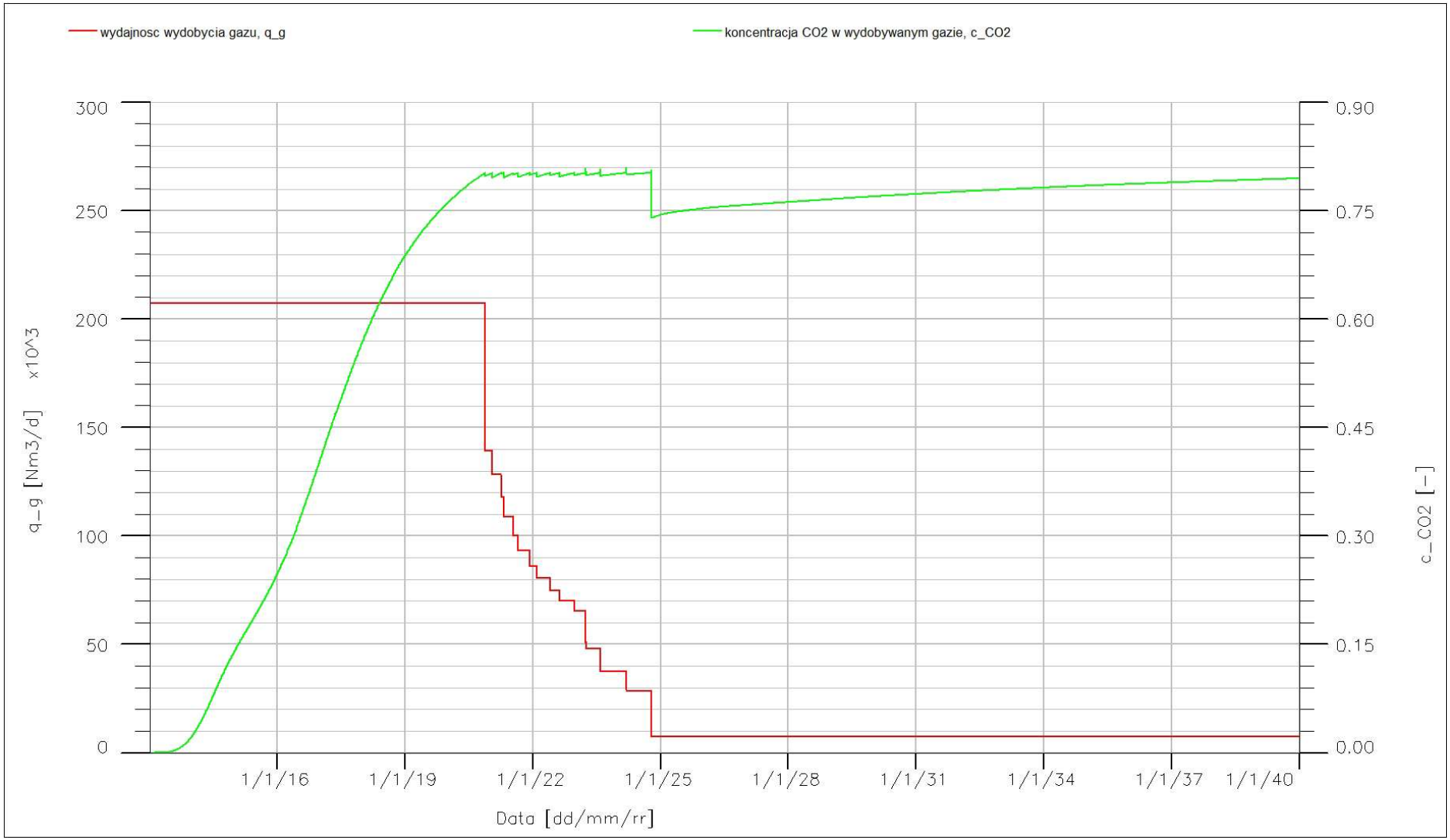
Rys. 4.17. Złoże Łąkta. Prognoza procesu sekwestracji. Wariant I.2. Rozkład koncentracji CO_2 w fazie gazowej na koniec okresu relaksacji.

Przedmiot dokumentacji technicznej stanowi własność intelektualną Instytutu



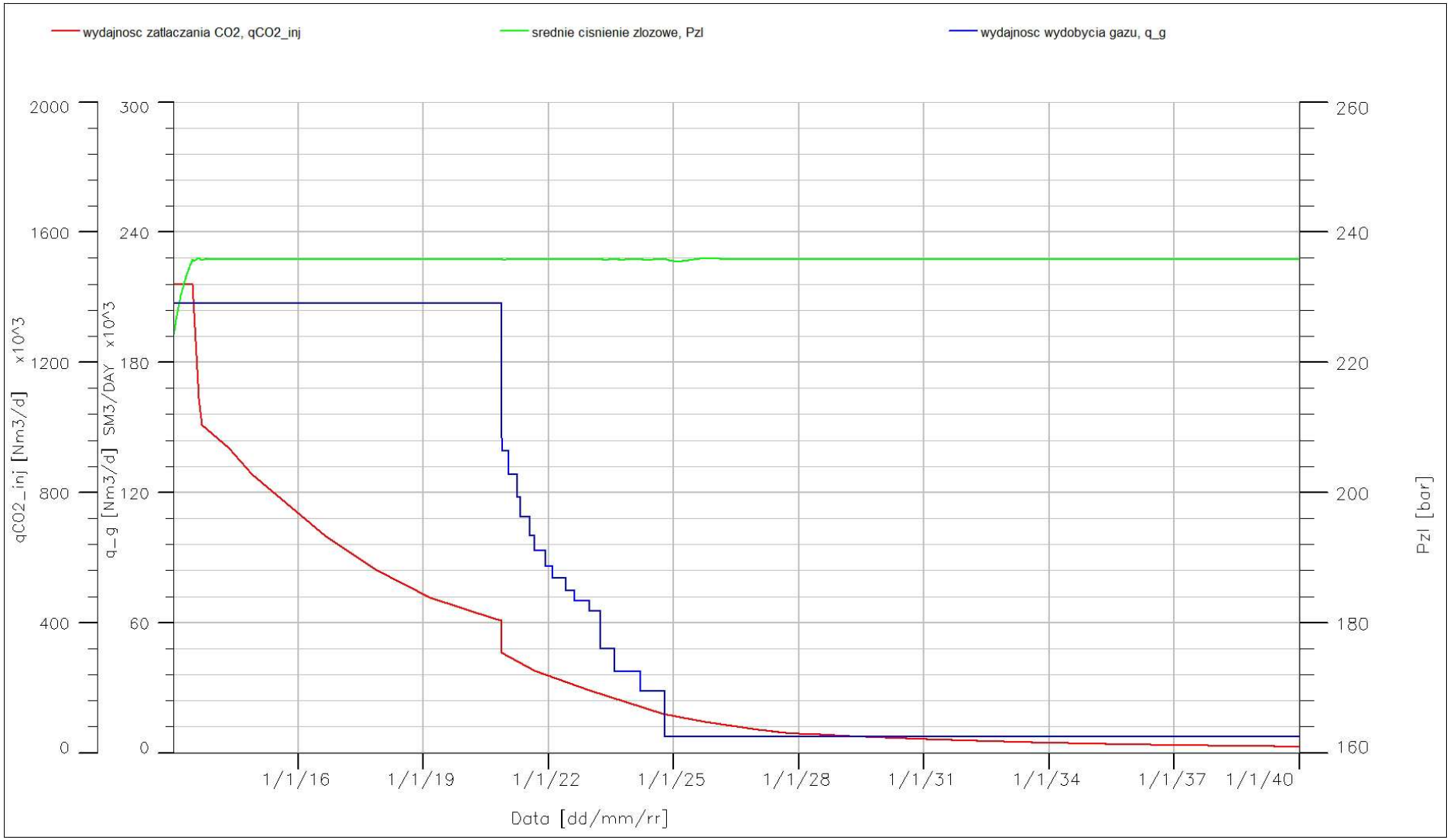
Rys. 4.18. Złoże Łąkta. Prognoza procesu sekwestracji. Wariant I.2. Zawartość rozpuszczonego CO_2, x_{CO2} w fazie wodnej na koniec okresu relaksacji.

Przedmiot dokumentacji technicznej stanowi własność intelektualną Instytutu



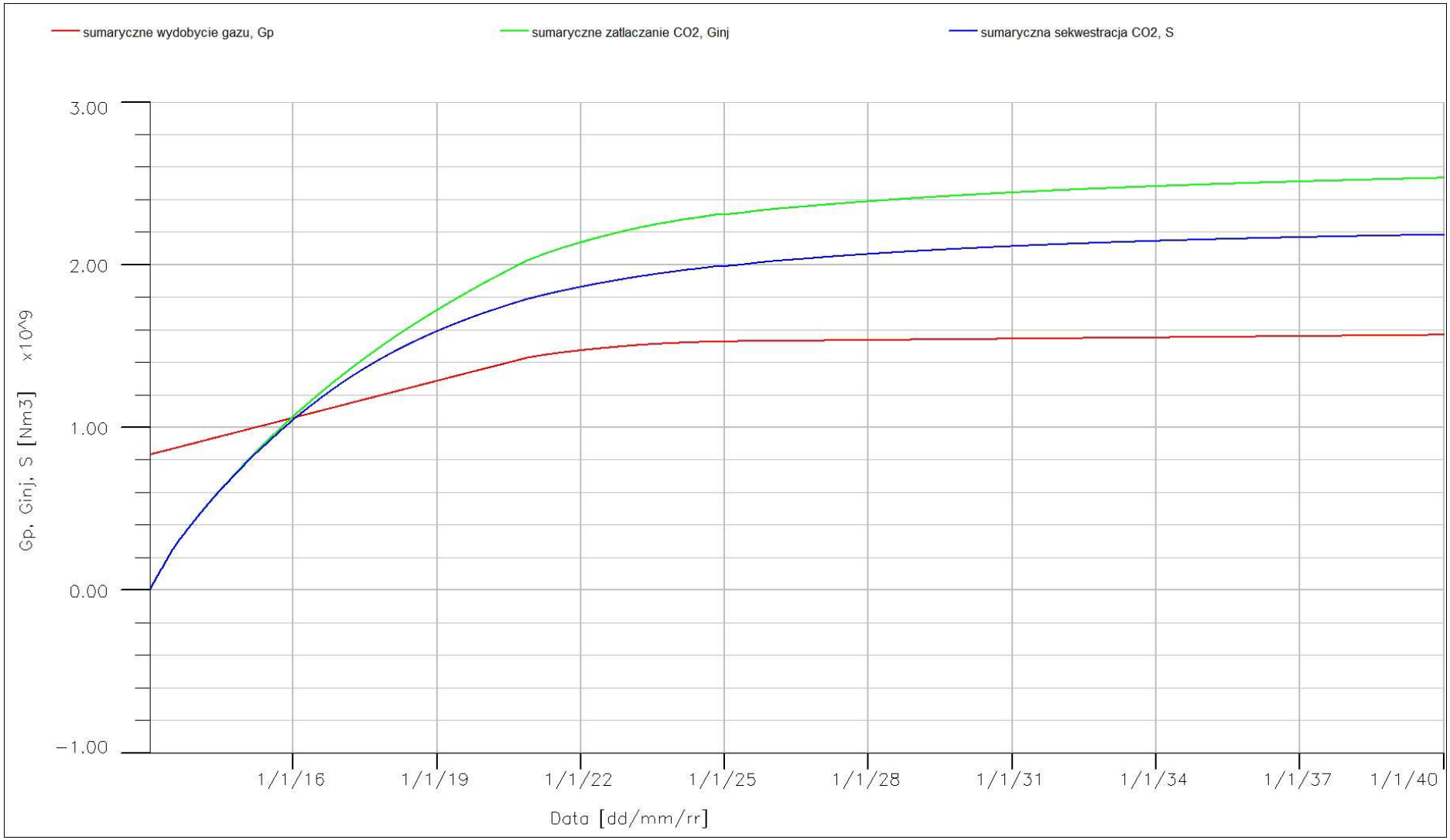
Rys. 4.19. Złoże Łąkta. Prognoza wydobycia gazu. Wariant II.1. Wydajność wydobycia gazu i koncentracja CO_2 w wydobywanym gazie.

Przedmiot dokumentacji technicznej stanowi własność intelektualną Instytutu



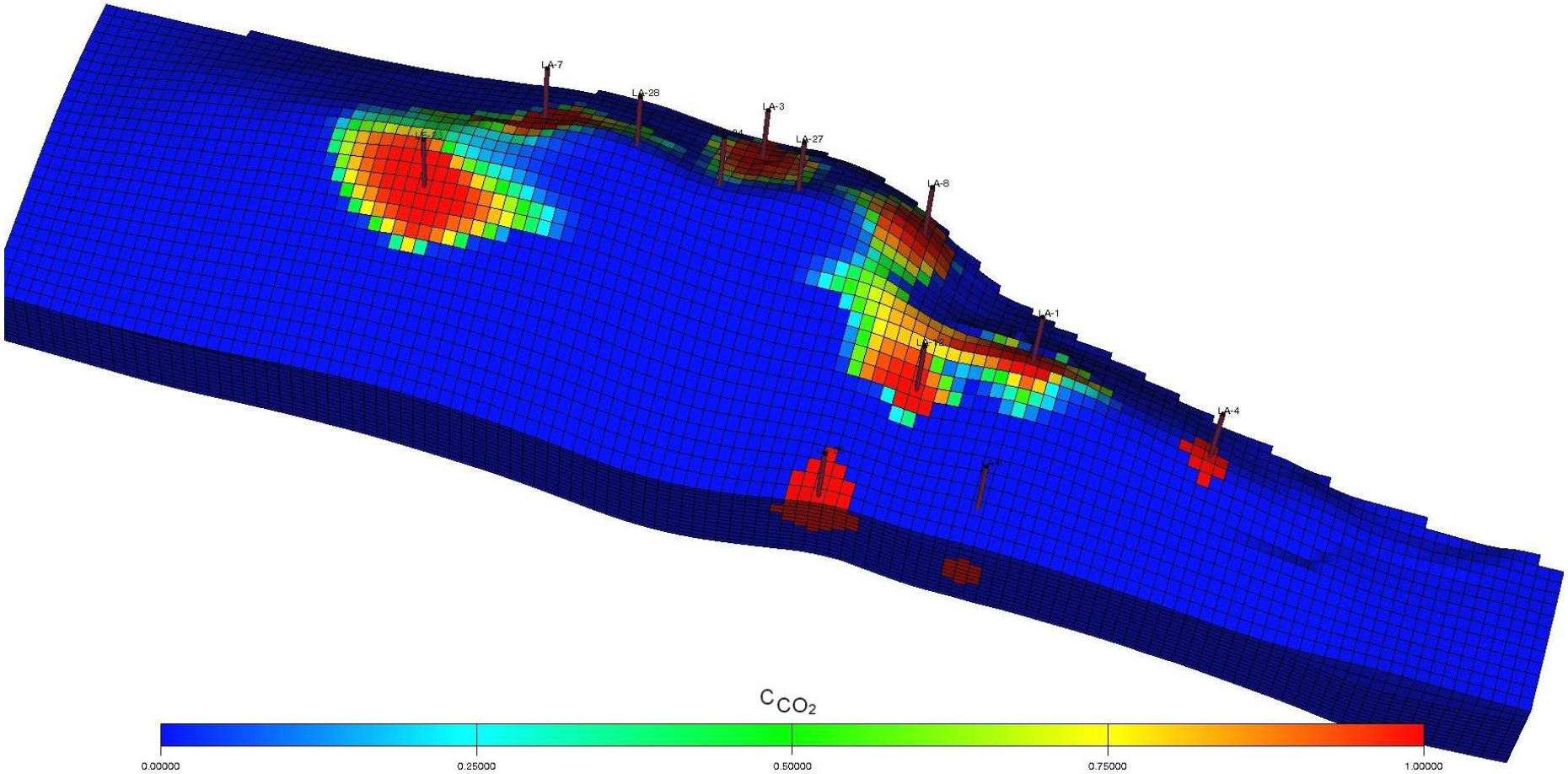
Rys. 4.20. Złoże Łąkta. Prognoza procesu sekwestracji. Wariant II.1. Wydajność zatłaczania CO_2, wydobycie gazu ze złoża i średnie ciśnienie złożowe.

Przedmiot dokumentacji technicznej stanowi własność intelektualną Instytutu



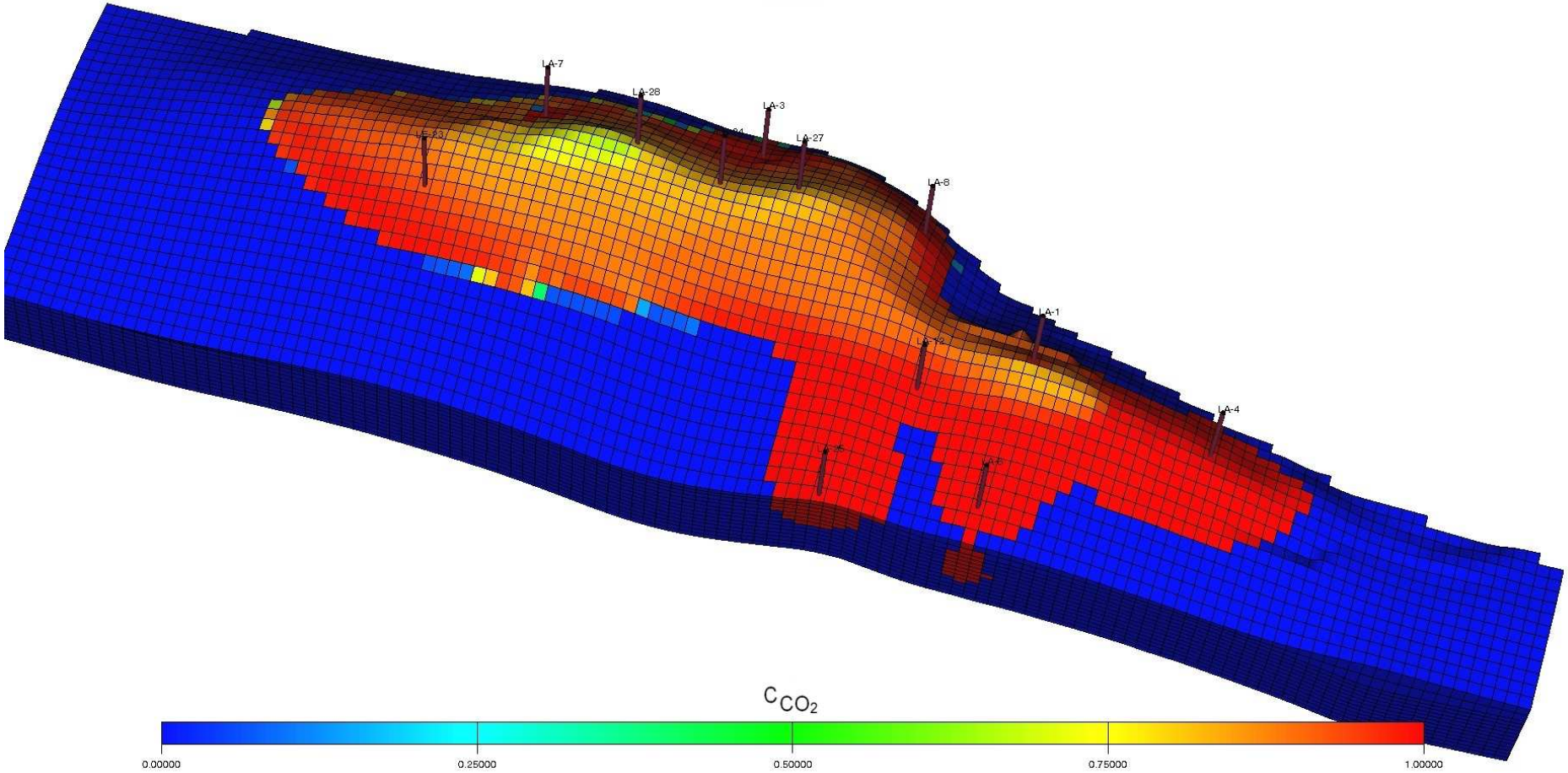
Rys. 4.21. Złoże Łąkta. Prognoza procesu sekwestracji CO_2.Wariant II.1. Sumaryczna ilość zatłaczanego CO_2, wydobytego gazu i pojemność zmagazynowanego CO_2.

Przedmiot dokumentacji technicznej stanowi własność intelektualną Instytutu



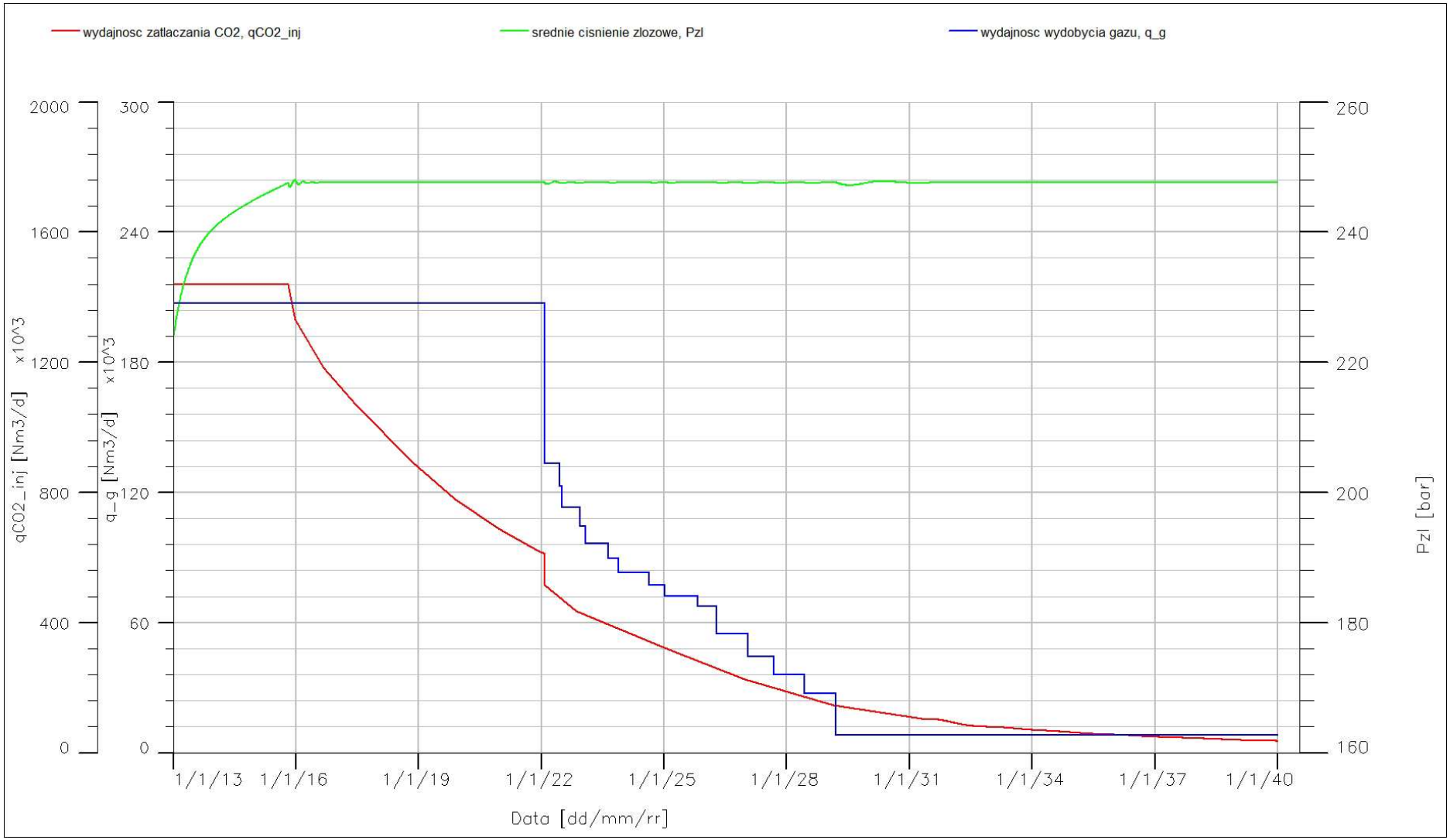
Rys. 4.22. Złoże Łąkta. Prognoza procesu sekwestracji wg Wariantu II.1. Rozkład koncentracji CO_2 w fazie gazowej na koniec fazy 1 zatłaczania.

Przedmiot dokumentacji technicznej stanowi własność intelektualną Instytutu



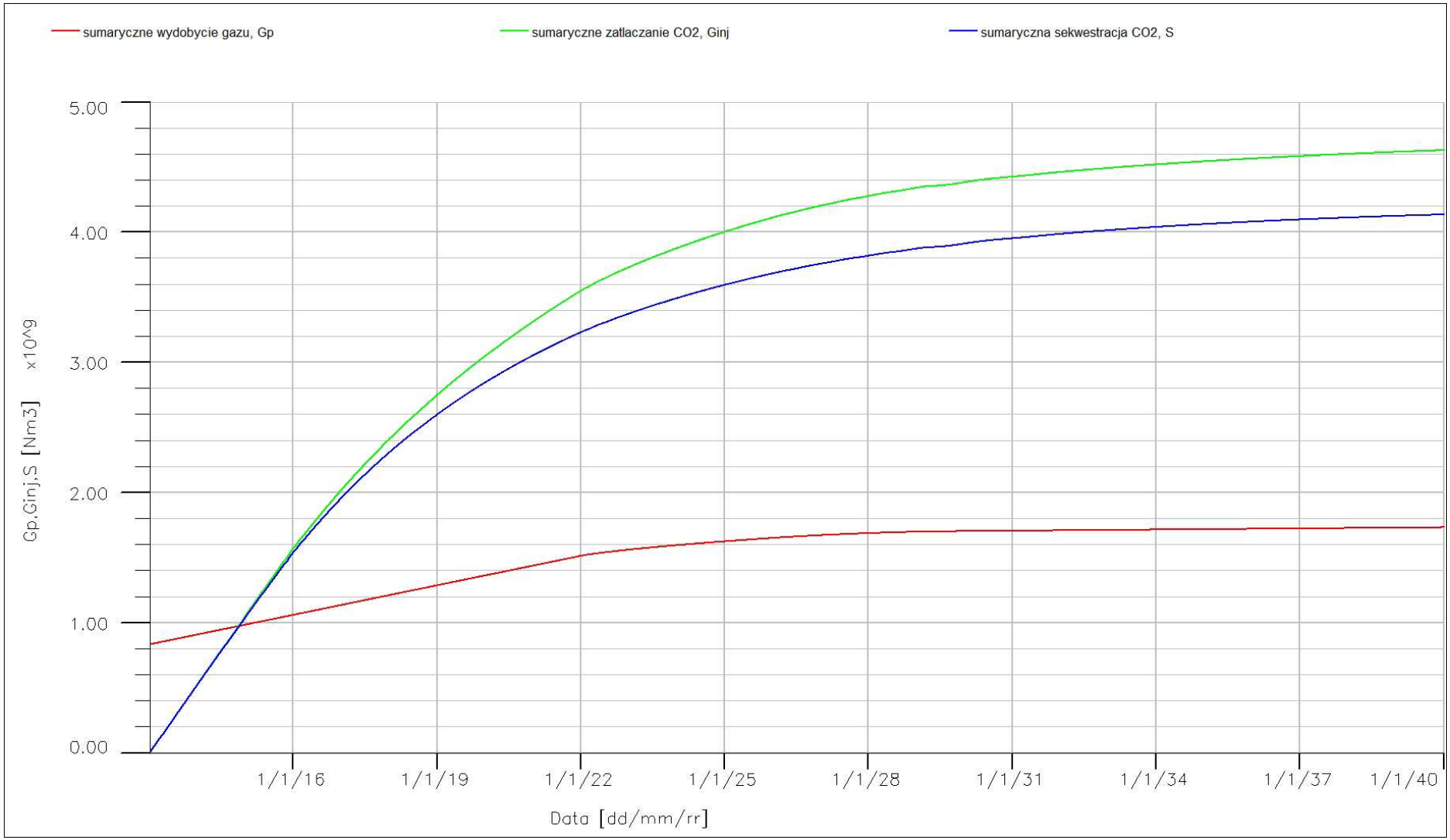
Rys. 4.23. Złoże Łąkta. Prognoza procesu sekwestracji wg Wariantu II.1. Rozkład koncentracji CO_2 w fazie gazowej po fazie 2 (XII 2040) na koniec zatłaczania.

Przedmiot dokumentacji technicznej stanowi własność intelektualną Instytutu



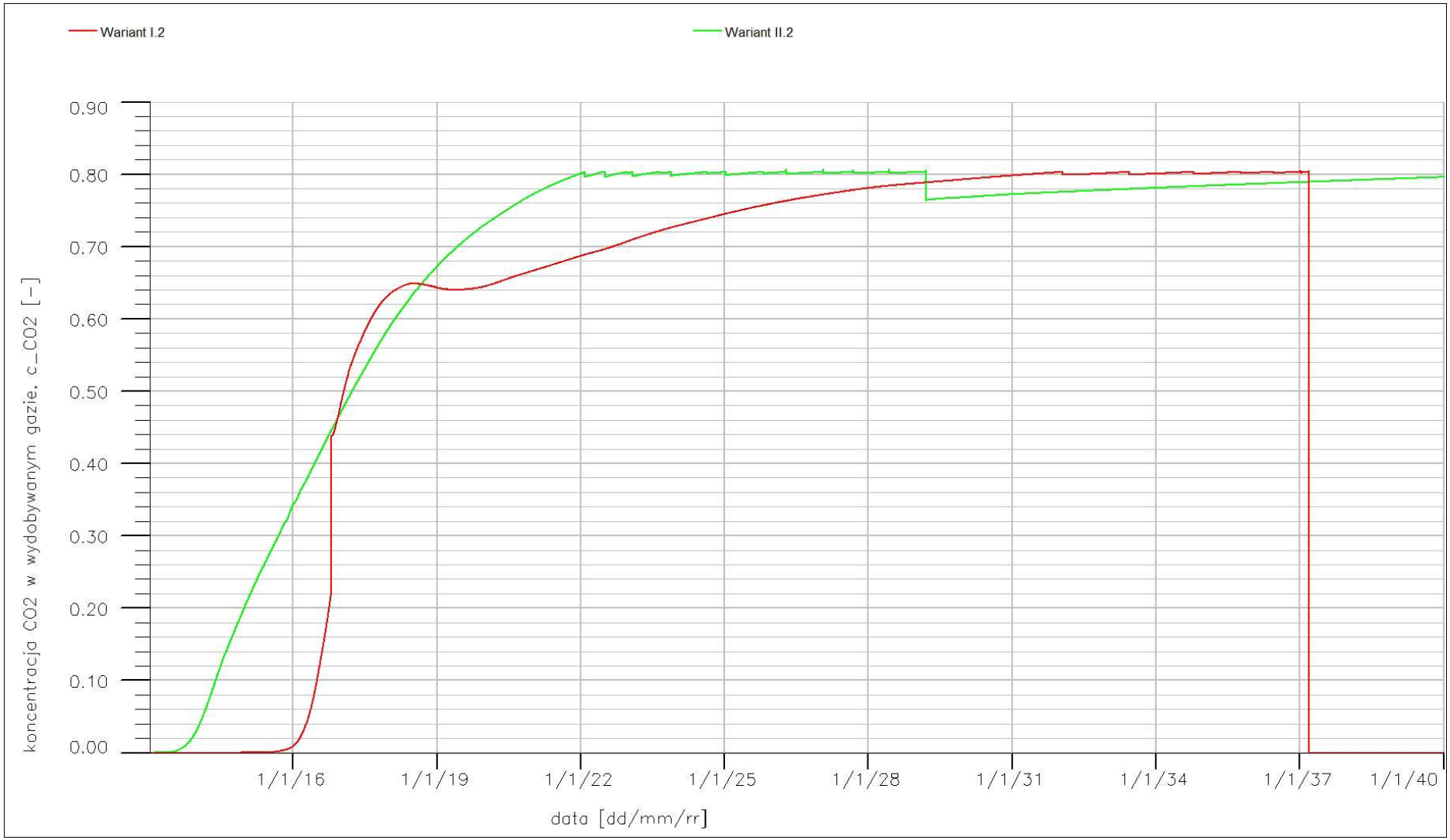
Rys. 4.24. Złoże Łąkta. Prognoza procesu sekwestracji. Wariant II.2. Wydajność zatłaczania CO_2, wydobycie gazu ze złoża i średnie ciśnienie złożowe.

Przedmiot dokumentacji technicznej stanowi własność intelektualną Instytutu



Rys. 4.25. Złoże Łąkta. Prognoza procesu sekwestracji CO_2.Wariant II.2. Sumaryczna ilość zatłaczanego CO_2, wydobytego gazu i pojemność zmagazynowanego CO_2.

Przedmiot dokumentacji technicznej stanowi własność intelektualną Instytutu



Rys. 4.26. Złoże Łąkta. Porównanie Wariantów I.2 i II.2. Koncentracja CO_2 w wydobywanym gazie.

Przedmiot dokumentacji technicznej stanowi własność intelektualną Instytutu

5. Podsumowanie i wnioski

W pracy skonstruowano dynamiczny model symulacyjny struktury złoża gazu ziemnego Łąkta w utworach cenomanu i malmu w celu oszacowania możliwości składowania w niej CO_2, oceny jej pojemności sekwestracyjnej i efektów wspomaganego wydobycia gazu.

W tym celu:

1. Zaimplementowano statyczny model geologiczny struktury i uzupełniono powstały model symulacyjny o model płynu złożowego i modele transportu płynu w skałach złożowych w tym rozpuszczalność CO_2 w solance.
2. Przeprowadzono kalibrację modelu symulacyjnego na podstawie danych eksploatacyjnych z 29-letniej historii eksploatacji złoża.
3. Wykonano wielowariantowe symulacje prognostyczne procesu sekwestracji CO_2 w strukturze złoża Łąkta.

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

1. Struktura posiada ograniczoną pojemność sekwestracyjną z powodu dużej aktywności wód złożowych objawiających się wysokim ciśnieniem złożowym pomimo stosunkowo wysokiego sczerpania jej zasobów gazu ziemnego.
2. Maksymalizacja pojemności sekwestracyjnej wymaga zastosowania strategii jednoczesnego zatłaczania CO_2 i wydobycia gazu ziemnego pozostałego w złożu.
3. Wykorzystanie istniejącego systemu odwiertów do realizacji powyższej strategii wymaga rekonstrukcji odwiertów wydobywczych położonych w szczycie struktury i przystosowania peryferyjnych odwiertów zawodnionych do zatłaczania CO_2.
4. Szczegółowy wybór odwiertów zatłaczających spośród odwiertów peryferyjnych istniejących na złożu wykazuje stosunkowo niewielki wpływ na końcową pojemność sekwestracyjną struktury.

Przedmiot dokumentacji technicznej stanowi własność intelektualną Instytutu

5. Pojemność sekwestracyjna w istotny sposób zależy od ciśnienia złożowego na koniec fazy zatłaczania – jednak przekroczenie pierwotnego ciśnienia złożowego o więcej niż 5% grozi ucieczką gazu w kierunku południowo-wschodnim poprzez zlokalizowaną tam strukturę „siodła”.
6. Ilościowe wyniki wariantów do punktu 4 i 5 podano w tabeli poniżej.

Wariant	Pojemność sekwestracji CO_2		Dodatkowe wydobycie gazu rodzimego
	mld Nm^3	Mt	mln Nm^3
I.1 4 odwierty zatłaczające $P_{max} = P_{ini}$	2.24	4.16	405
I.2 4 odwierty zatłaczające P_{max} = 105% P_{ini}	4.24	7.89	444
II.1 9 odwiertów zatłaczających $P_{max} = P_{ini}$	2.18	4.07	387
II.2 9 odwiertów zatłaczających P_{max} = 105% P_{ini}	4.13	7.70	405

Przedmiot dokumentacji technicznej stanowi własność intelektualną Instytutu

6. Literatura

[1]. Wiesław Szott i zespół. „Program wspomagania wydobycia ropy i gazu z krajowych złóż przy zastosowaniu zatłaczania CO_2” INiG Krosno, 2012.

[2]. Petrel 2009.2. Eclipse 300, v 2010.1 firmy GeoQuest Schlumberger.

[3]. Program PVTSim 16 firmy Calsep.

[4]. Marcin Warnecki, „Rozpuszczalność CO_2 i rodzimych gazów ziemnych w solance złożowej”, Nafta-Gaz, styczeń 2010.

Przedmiot dokumentacji technicznej stanowi własność intelektualną Instytutu