

Badanie rozpuszczalności CO₂ w solankach rejonu Bełchatowa

Jan Lubaś¹, Marcin Warnecki¹



J. Lubaś

M. Warnecki

Solubility study of CO₂ in saline aquifers of Belchatow region. *Prz. Geol.*, 58: 408–415.

Abstract. European Union member states are obliged to identify and document geological formations and structures suitable for storage of CO₂ from large industrial emitters in their territories. In Poland such studies were concentrated on deep saline aquifer formations in several regions of the country. Poland is one of a few countries already having some experience in CO₂ storage in geological structures thanks to the first industrial installation sequestering acid gas by direct injection to aquifer underlying Borzęcin natural gas field, in continuous operation since 1996. PGE Bełchatów Power Plant is the largest conventional power plant in Europe. It annually consumes 35 million tons of brown coal and it is also a significant CO₂ emitter. In the area of Bełchatów there is documented a number of deep geological structures that meet sequestration site criteria, particularly criteria concerning depth at

which the structures are located, thickness, water mineralization and other petrophysical parameters. The paper presents mineralization maps of saline aquifers from selected stratigraphic horizons (Triassic, Jurassic), basic data characterizing the reservoir conditions in selected saline structures, as well as chemical composition of their brines and mineralization and physical parameters determined in the PVT laboratory. Authors describe mechanisms that determine the amount of CO₂ that can be deposited in these aquifers. Research apparatus and procedures used during PVT study of reservoir brines and CO₂ mixtures are presented in the paper. The solubility of CO₂ in brines of the Bełchatów region at pressures and temperatures corresponding to appropriate reservoir conditions were examined and reported in the paper.

Key words: CO₂ solubility, brines, saline aquifers, sequestration, CO₂ capture & storage

PGE Elektrownia Bełchatów jest największą w Europie elektrownią konwencjonalną opalaną węglem brunatnym, o mocy 4440 MW. Zużywając rocznie 35 mln ton paliwa, jest równocześnie źródłem znacznej emisji CO₂. Wychodząc naprzeciw wymogom ochrony środowiska, w tym również dyrektywy Unii Europejskiej, w ramach szerszego programu w elektrowni realizowany jest projekt budowy pierwszej demonstracyjnej instalacji do wychwytywania, transportu i geologicznego składowania CO₂. Budowany obecnie nowy blok energetyczny o mocy 858 MW zostać przygotowany do działania (status *capture ready*) poprzez wykonanie instalacji wychwytywania CO₂ ze spalin w ilości 1,8 mln ton rocznie. Ilość ta powinna być przetłoczona i zdeponowana w sąsiednich, głębokich poziomach solankowych.

Państwa członkowskie Unii Europejskiej są zobowiązane do rozpoznania i udokumentowania na swoim terytorium formacji i struktur geologicznych odpowiednich do składowania CO₂ pochodzącego z dużych przemysłowych źródeł emisji. W ramach powołanego w roku 2008 konsorcjum prowadzone są badania w celu rozpoznania formacji i struktur do bezpiecznego składowania CO₂.

Badaniom są poddane szczególnie głębokie solankowe poziomy wodonośne w różnych rejonach kraju. Instytut Nafty i Gazu, działając w powołanym konsorcjum, którego liderem jest Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, wykonał w ostatnim czasie szereg badań laboratoryjnych i studialnych związanych z określeniem parametrów petrofizycznych skał zbiornikowych w rejonie Bełchatowa oraz opracowania modeli statycznych i dynamicznych określonych struktur geologicznych (Szott,

2009). W celu określenia pojemności składowania wykonano badania rozpuszczalności CO₂ w solankach wypełniających głębokie poziomy wodonośne w rejonie Bełchatowa. Polska, jako jeden z nielicznych krajów, dysponuje już pewnymi doświadczeniami w realizacji projektów składowania CO₂ w strukturach geologicznych (Lubaś, 2007). W roku 1996, w wyniku współpracy INiG i PGNiG SA uruchomiono instalację przemysłowego składowania gazów kwaśnych w poziomach solankowych podścielających złoża gazu ziemnego Borzęcin. Kilkunastoletnia nieprzerwana praca tej instalacji oraz doświadczenia z niej płynące powinny być wykorzystane przy realizacji następnych, znacznie większych przedsięwzięć, zarówno w aspekcie technologii wychwytywania i przesyłu CO₂, jak i inżynierii złożowej.

Poziomy solankowe

Głębokie solankowe poziomy wodonośne, chociaż bardzo słabo poznane, posiadają największy potencjał składowania CO₂.

Potencjał ten można w prosty sposób przedstawić według formuły:

- 1000 — głębokie solankowe poziomy wodonośne,
- 100 — szcerpane złoża węglowodorów,
- 10 — głębokie pozabilansowe złoża węgla,
- 1 — sekwestracja mineralna.

Optymalne kryteria stosowane przy wyborze poziomów solankowych jako struktur dla zdeponowania CO₂ (wg Chadwick i in., 2007) przedstawiają się następująco:

- ☐ głębokość występowania kolektora — 800–2500 m,
- ☐ miąższość kolektora ≥ 50 m, min. 20 m,
- ☐ porowatość kolektora ≥ 20%, min. 10%,
- ☐ przepuszczalność kolektora ≥ 200–300 mD, min. 100 mD,
- ☐ zasolenie wód złożowych: ≥ 30 g/l,

¹Instytut Nafty i Gazu, Oddział Krosno, ul. Armii Krajowej 3, 38-400 Krosno; lubas@inig.pl, warnecki@inig.pl

- miąższość warstw uszczelniających ≥ 100 m, min. 50 m, z zachowaniem integralności.

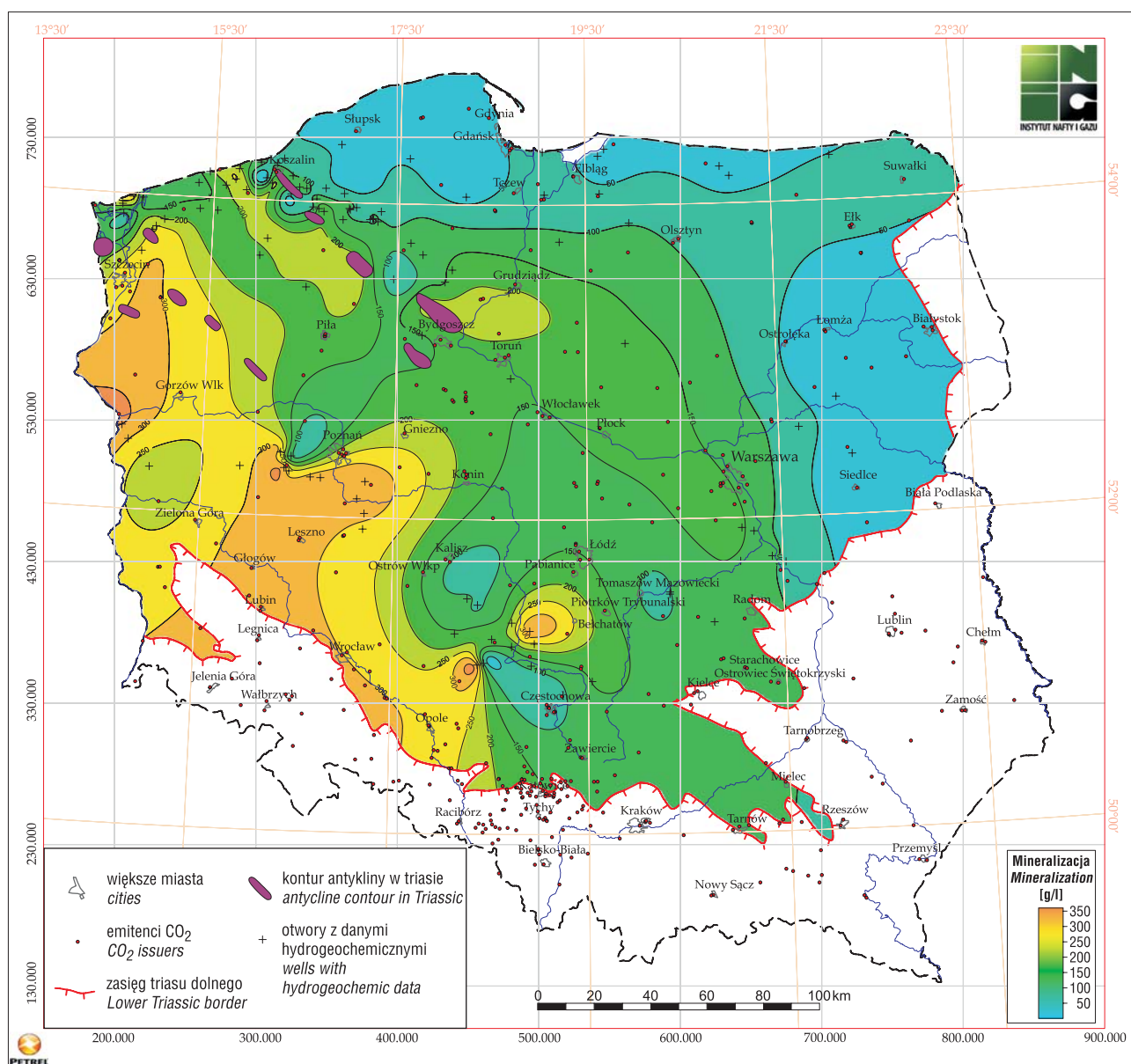
Znaczna głębokość składowania CO₂, co najmniej 800 m, wynika z potrzeby uzyskania parametrów nadkrytycznych CO₂, powyżej 73,8 bara i 31°C. W tych warunkach można w jednostce objętości zdeponować największą ilość CO₂.

W rejonie Bełchatowa udokumentowano szereg głębokich struktur geologicznych spełniających wstępnie wymienione kryteria, szczególnie w zakresie głębokości zalegania, miąższości, mineralizacji wód wysycających skały kolektora oraz parametrów petrofizycznych (Wójcicki, 2008). Wstępną geologiczną analizę struktur w rejonie Bełchatowa przedstawiono również w publikacji (Tarkowski i in., 2009). Szczegółowych badań wymaga natomiast szczelność nadkładu z zasadniczym uwzględnieniem integralności w pionie oraz poziomie. Mineralizacja wód, jako kryterium zabezpieczające przed wykorzystaniem do celów sekwestracji zasobów wód pit-

nych, jest wystarczająco wysoka, szczególnie w poziomach triasu dolnego.

W tabeli 1 przedstawiono podstawowe dane charakteryzujące zarówno warunki złożowe niektórych badanych struktur solankowych reprezentowanych przez wybrane odwierty, jak i skład chemiczny solanek, mineralizację oraz parametry fizyczne PVT określone w badaniach laboratoryjnych (Warnecki, Kuśnierczyk, 2009). Opisane w tabeli otwory wiertnicze są zlokalizowane w rejonie Bełchatowa na obszarze o promieniu 100 km i obejmują swym zasięgiem utwory permu, triasu, jury i kredy.

Mineralizacja solanek z ważniejszych poziomów stratygraficznych triasu i jury, wraz z zaznaczeniem lokalizacji ważniejszych emitentów (Lubaś i in., 2009), przedstawiona została na poszczególnych mapach (ryc. 1, 2 i 3). W zdecydowanej większości są to wody o znacznej mineralizacji powyżej 30 g/l, które będzie można wykorzystać do sekwestracji CO₂.



Ryc. 1. Mapa mineralizacji wód złożowych dolnego triasu (Lubaś i in., 2009)

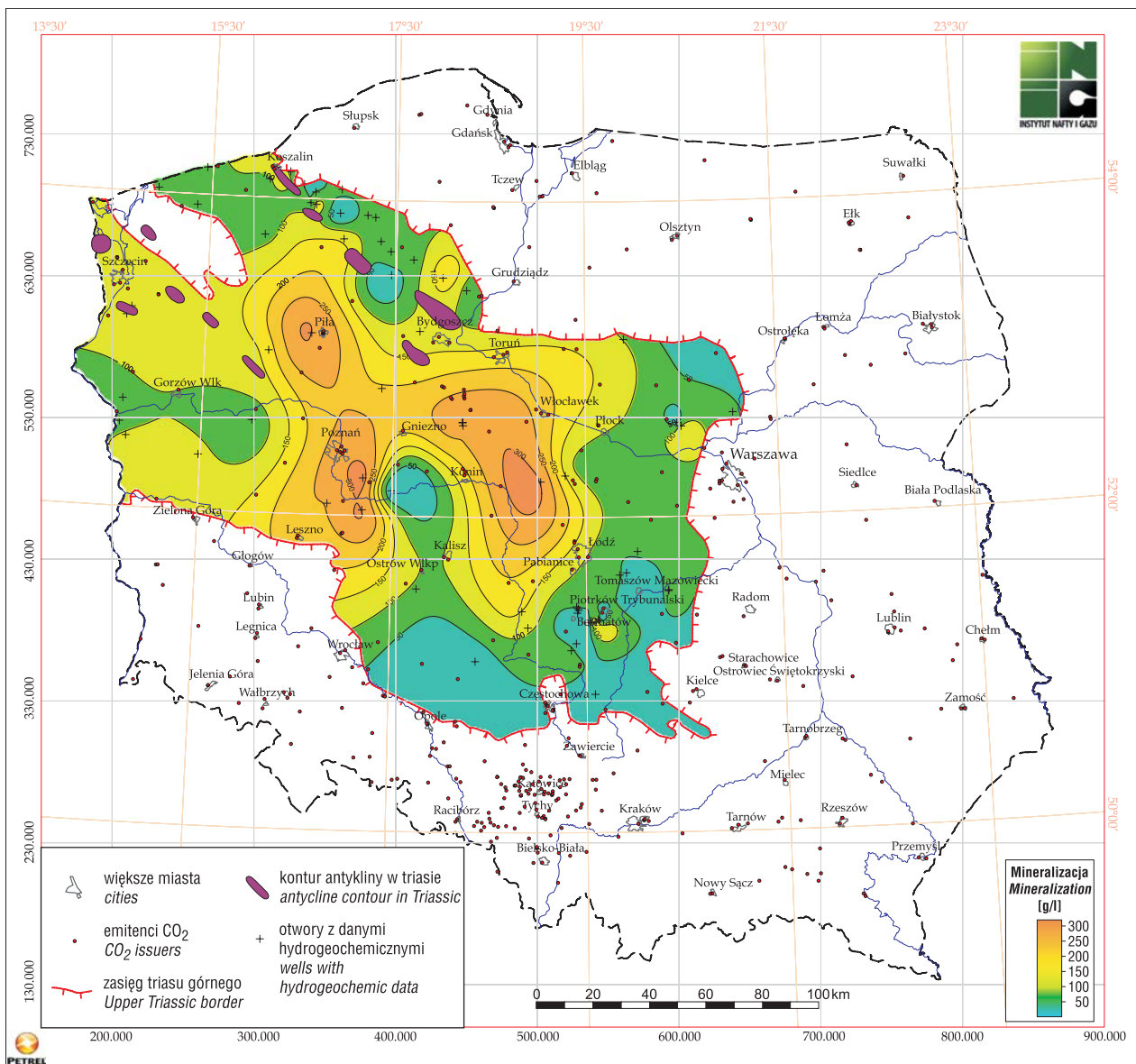
Fig. 1. Map of mineralization of the Lower Triassic reservoir water (Lubaś i in., 2009)

Tab. 1. Dane charakteryzujące warunki złożowe wybranych struktur zbadanych za pomocą odwiertów w rejonie Belchatowa (obszar o promieniu 100 km)

— skład chemiczny solanek, mineralizacja oraz parametry fizyczne PVT

Table 1. Data characterizing reservoir conditions of selected structures represented by the appropriate well data, brine composition, mineralization, and physical parameters determined in the PVT studies for the Belchatow area (within a radius of 100 km)

Lp. No.	Nazwa odwiertu Well	Wiek Age	Strop Layer ceiling [m]	Warunki złożowe Reservoir conditions		Skład solanki złożowej [mg/dm ³] Brine composition									Minerali- -zacja Mineralization composition [g/dm ³]	Parametry określone w badaniach PVT PVT properties			
				P _a [bar]	T _a [°C]	Br	Cl	Ca	Mg	Fe	Na	K	R ^{ScO₂} [m ³ /m ³]	B ^{SN} [m ³ /m ³]		ρ ^{SN} [g/cm ³]	ρ SM [g/cm ³]		
1	Budziszewice IG1	J1	1 325	132	45,5	8,54	2 916,60	1,26	394,00	74,00	—	1 824	140,5	7,092	30,0	1,044	1,018	1,0028	
2	Budziszewice IG1	T1	3 436	375	110,0	156,62	60 776,00	11,72	9 860,00	4,40	—	27 490	750,0	104,900	25,1	1,067	1,051	1,0716	
3	Jeżów IG1	J1	1 635	162	49,3	7,68	1 369,40	0,00	27,03	7,60	6,00	930	17,5	2,660	29,4	1,038	1,021	1,0010	
4	Jeżów IG1	J1	1 712	167	50,8	54,16	8 027,78	1,92	361,72	111,13	18,00	4 250	36,0	12,960	30,5	1,045	1,022	1,0071	
5	Jeżów IG1	T3	1 893	187	58,5	248,11	39 238,91	1,35	4 471,88	796,70	25,00	17 500	150,0	63,200	25,4	1,043	1,047	1,0413	
6	Jeżów IG1	T1	2 726	313	77,5	1 963,39	219 852,00	3,49	69 685,00	5 446,62	75,00	46 000	3 700,0	360,000	13,0	1,029	1,223	1,2327	
7	Kalisz IG1	J1	1 185	118	45,1	5,60	1 315,15	0,41	101,53	40,84	2,22	724	46,0	2,560	31,3	1,048	1,014	1,0003	
8	Kalisz IG1	P2	3 025	339	123,0	1 798,47	201 637,00	—	18 134,55	4 558,50	—	87 500	13 750,0	336,600	13,5	1,058	1,166	1,2067	
9	Madaje Stare IG1	K1	1 478	140	48,0	—	19,00	—	55,00	7,00	1,00	32	6,0	0,263	30,9	1,048	1,012	0,9986	
10	Madaje Stare IG1	J3	1 929	181	62,1	85,00	33 200,00	3,00	1 950,00	664,00	1,20	17 500	320,0	55,900	25,3	1,044	1,040	1,0352	
11	Madaje Stare IG1	J3	2 178	205	69,4	133,00	58 900,00	4,00	3 500,00	1 000,00	1,00	30 400	520,0	96,200	22,2	1,042	1,061	1,0611	
12	Niechmירów IG1	J1	1 400	134	52,5	747,66	75 575,98	4,50	17 424,00	2 894,08	46,55	24 750	440,0	127,000	20,2	1,035	1,088	1,0855	
13	Ożegów IG1	T1	2 085	216	71,8	1 050,00	148 650,00	5,00	19 600,00	4 000,00	35,00	63 750	1 900,0	242,000	14,6	1,037	1,142	1,1552	
14	Ożegów IG1	P2	2 538	263	89,2	1 400,00	199 100,00	7,00	30 750,00	4 400,00	50,00	82 500	2 550,0	328,000	13,8	1,040	1,190	1,2104	
15	Poddębice IG1	J3	2 545	252	87,0	81,00	76 200,00	4,00	3 650,00	750,00	83,00	40 500	640,0	129,000	21,1	1,047	1,069	1,0770	



Ryc. 2. Mapa mineralizacji wód złożowych górnego triasu (Lubaś i in., 2009)
 Fig. 2. Map of mineralization of the Upper Triassic reservoir water (Lubaś i in., 2009)

Pojemność składowania poziomów solankowych

Można wyróżnić cztery podstawowe czynniki określające pojemność składowania CO₂ w poziomach solankowych (Chadwick i in., 2007):

- pułapkowanie strukturalne i stratygraficzne migrującego CO₂ w przestrzeni porowej (faza gazu, pynu lub cieczy),
- rozpuszczanie CO₂ w solance złożowej,
- rezydualne nasywanie skały oparte na zjawiskach adsorpcji i sił kapilarnych,
- wiązanie geochemiczne CO₂ poprzez skałę kolektora, składniki i pierwiastki reaktywne rozpuszczone w rodzimej solance.

Procesy mineralnego wiązania, w wyniku których powstają węglany odgrywają niewielką rolę ze względu na bardzo wolny ich przebieg. W rezultacie praktyczne znaczenie mają trzy pozostałe procesy, w tym rozpuszczalność CO₂ w solankach.

Najbardziej przybliżoną metodę wyliczania pojemności składowania CO₂ określili Bachu & Shaw (2003). Przy-

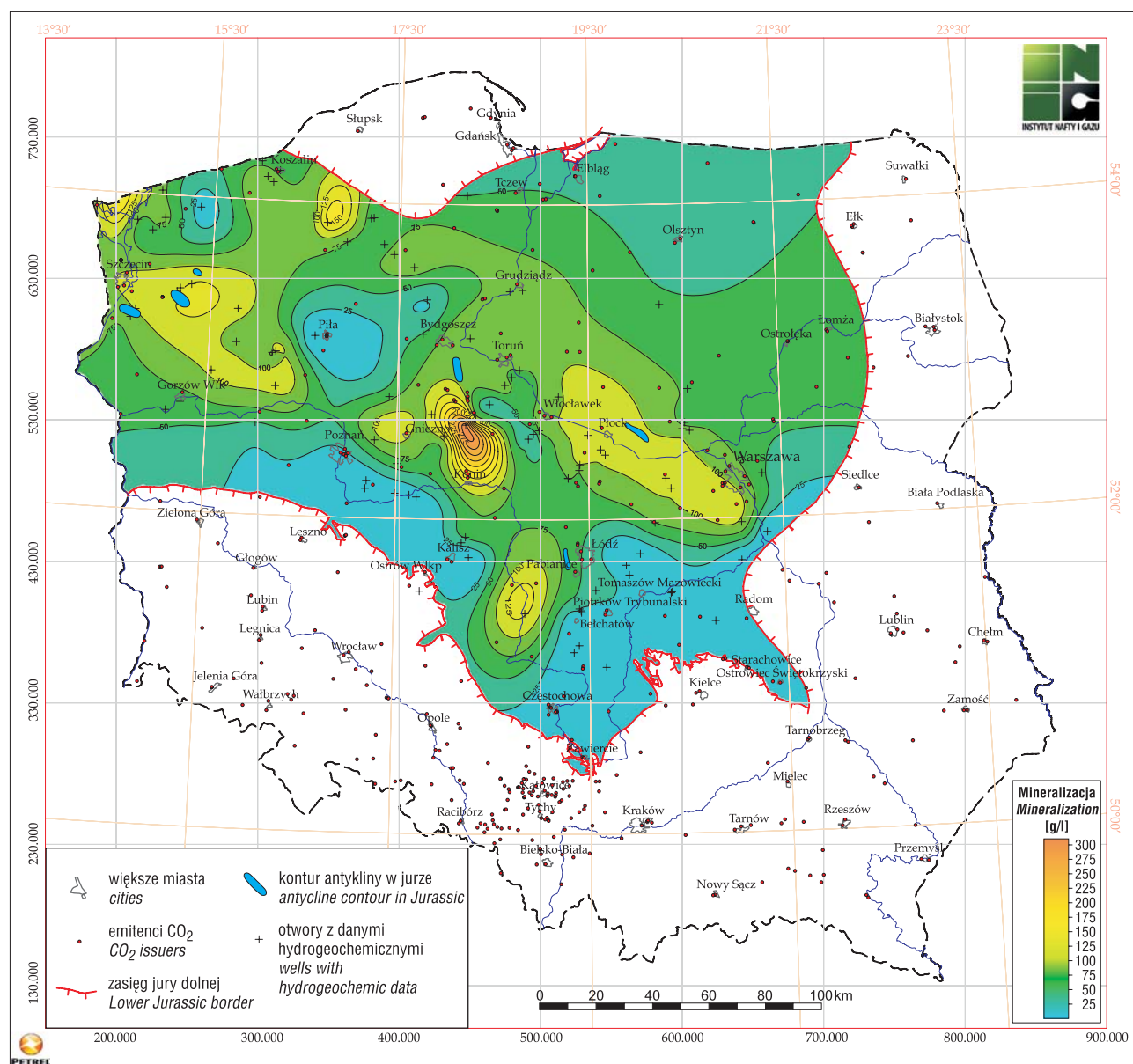
jęto w niej, że przestrzeń porowa zajmowana przez wydobywalne ilości płynów złożowych może być wykorzystana do składowania CO₂.

Ilość CO₂, która może być deponowana w danym poziomie solankowym, jest określana jako wskaźnik pojemności C (Chadwick i in., 2007). Przedstawia on ułamek objętościowy pojemności złożowej poziomu solankowego i jest definiowany jako suma członów niemieszalnego, nadkrytycznego CO₂ (C^{gaz}) oraz CO₂ rozpuszczonego w rodzimych solankach wypełniających przestrzeń skały kolektora (C^{ciecz}).

$$C = C^{\text{gaz}} + C^{\text{ciecz}}$$

$$C^{\text{gaz}} = \langle \phi S_g \rangle, C^{\text{ciecz}} = \langle \phi S_l X_1^{CO_2} \rho_g / \rho_l \rangle$$

gdzie: ϕ — porowatość, S_g , S_l — udział objętościowy przestrzeni porowej zawierającej odpowiednio nadkrytyczny CO₂ oraz ciecz, $X_1^{CO_2}$ — udział masowy CO₂ rozpuszczonego w solance, ρ_g , ρ_l — gęstości odpowiednio fazy nadkrytycznej oraz cieklej; nawiasy $\langle \rangle$ oznaczają wartości uśrednione dla danego obszaru przestrzeni porowej rozpatrywanej struktury.



Ryc. 3. Mapa mineralizacji wód złożowych jury dolnej (Lubaś i in., 2009)

Fig. 3. Map of mineralization of the Lower Jurassic reservoir water (Lubaś i in., 2009)

Z dotychczas przeprowadzonych badań wynika, że większość zatłaczanego CO_2 będzie wypierać wodę z przestrzeni porowej i gromadzić się jako swobodny gaz, często w stanie nadkrytycznym w górnej części przestrzeni kolektora (van der Meer & Egberts, 2008). Rozpuszczanie CO_2 zachodzi wówczas, gdy w układzie mamy do czynienia z wystarczającą ilością wody. W przestrzeni porowej pozostaje woda związana, której ilość stopniowo maleje, co przyczynia się do zwiększania ilości zmagazynowanego CO_2 w stanie nadkrytycznym (Horne, 2008). W przypadku zatłaczania bardzo dużych objętości CO_2 , gaz ten wywiera wpływ na zmiany objętości i ciśnienia całego układu sekwestracyjnego.

Wykonane obliczenia symulacyjne z wykorzystaniem oprogramowania SIMED IITM (van der Meer & van Wees, 2006 a) wykazały, że w typowym poziomie zawodnionym w początkowej fazie do wody przenika od 10–20% masowych CO_2 ulegającego rozpuszczeniu. Woda nasycona rozpuszczonym CO_2 zwiększając swą gęstość, opada w dół i jest zastępowana „świeżą”, nienasyconą wodą w

rezultacie procesów konwekcyjnych. W wyniku segregacji grawitacyjnej nasycona dwutlenkiem węgla woda złożowa opada do strefy spągowej poziomu zawodnionego (van der Meer & van Wees, 2006 b). Potwierdzają to w pewnym stopniu badania sejsmiczne 3D wykonane w poziomie solankowym formacji Utsira, gdzie do roku 2001 zatłoczono 4,3 Mt CO_2 (Meadows, 2008).

Modelowanie symulacyjne wykazało, że dalsze rozpuszczanie CO_2 przebiega bardzo wolno i dopiero po upływie 1000 lat przekroczy 50% ilości zatłoczonej.

Badanie rozpuszczalności CO_2 w solankach rejonu Bełchatowa

Badania mieszanin CO_2 i wód złożowych prowadzono na nowoczesnej, bezręciowej aparaturze PVT do określania właściwości fazowych płynów złożowych w INiG, Oddział Krosno (ryc. 4).

Zasadniczym elementem aparatury są dwie komory ciśnieniowe umieszczone w powietrznej łaźni termosta-

tycznej z możliwością prowadzenia badań do ciśnienia 690 barów i temperatury do 200°C (ryc. 5)

Proces mieszania próbki w zadanych warunkach ciśnienia i temperatury (PT) realizowany jest poprzez pierścień magnetyczny przesuwany mechanicznie w górę i w dół wewnątrz komory.

Procedura badawcza stosowana podczas badań kolejnych mieszanin CO₂ i solanki polegała na przygotowywaniu solanki o zadanym składzie chemicznym, wprowadzeniu jej do komory, odpowietrzeniu, dotłoczeniu odpowiedniej ilości CO₂, uzyskaniu oczekiwanych parametrów ciśnienia i temperatury, odpowiednio długim mieszaniu w celu osiągnięcia maksymalnego nasycenia solanki dwutlenkiem węgla, a następnie przeprowadzeniu dwuetapowej separacji płynów z precyzyjnym pomiarem ich objętości.

W tabeli 1 zebrano rezultaty badań wybranych solanek, informacje uzupełniono o parametry złożowe oraz skład poszczególnych solanek. Wybrane dane zilustrowano graficznie na kolejnych rysunkach:

- rozpuszczalność CO₂, R_{SCO₂} w poszczególnych solankach w warunkach PT (ryc. 6),
- rozpuszczalność CO₂ w solankach w funkcji temperatury złożowej (ryc. 7),
- rozpuszczalność CO₂ w solankach w funkcji ciśnienia złożowego (ryc. 8),
- rozpuszczalność CO₂ w solankach w funkcji stopnia mineralizacji (ryc. 9).

We wszystkich przypadkach, z wyjątkiem jednego, CO₂ znajdował się w stanie nadkrytycznym. Podczas badań doświadczalnych istniała możliwość wizualnej obserwacji, przez szklany wziernik, zachowania się CO₂ i fazy wodnej. Po osiągnięciu stanu nasycenia wody rozpuszczającym się dwutlenkiem węgla, na powierzchni lustra wody znajdowała się faza CO₂ w stanie nadkrytycznym, niemieszająca się z wodą. Potwierdza to wcześniejsze doniesienia literatu-

ry (Tarkowski, 2005) o niemieszalności nadkrytycznego CO₂ z fazą wodną.

Wyniki badań zilustrowane na rycinie 6 wykazują znaczną rozpiętość rozpuszczalności CO₂ w badanych solankach, w granicach od 12,9 do 32,1 m³/m³, w tym w solankach:

□ permu dolnego (P ₁)	32,1 m ³ /m ³ ,
□ permu górnego (P ₂)	12,9–13,8 m ³ /m ³ ,
□ triasu dolnego (T ₁)	13,0–25,4 m ³ /m ³ ,
□ triasu środkowego (T ₂)	14,1 m ³ /m ³ ,
□ triasu górnego (T ₃)	25,4–29,4 m ³ /m ³ ,
□ jury dolnej (J ₁)	23,6–31,3 m ³ /m ³ ,
□ jury środkowej (J ₂)	32,0 m ³ /m ³ ,
□ jury górnej (J ₃)	21,1–25,3 m ³ /m ³ ,
□ kredy dolnej (K ₁)	24,1–31,2 m ³ /m ³ ,
□ kredy górnej (K ₂)	31,8 m ³ /m ³ .

W płytszych warstwach rozpuszczalność jest większa ze względu na mniejszą mineralizację solanki i niższą temperaturę. Oba te czynniki hamują wpływ ciśnienia, które oddziałuje na rozpuszczalność CO₂ odwrotnie niż mineralizacja i temperatura.

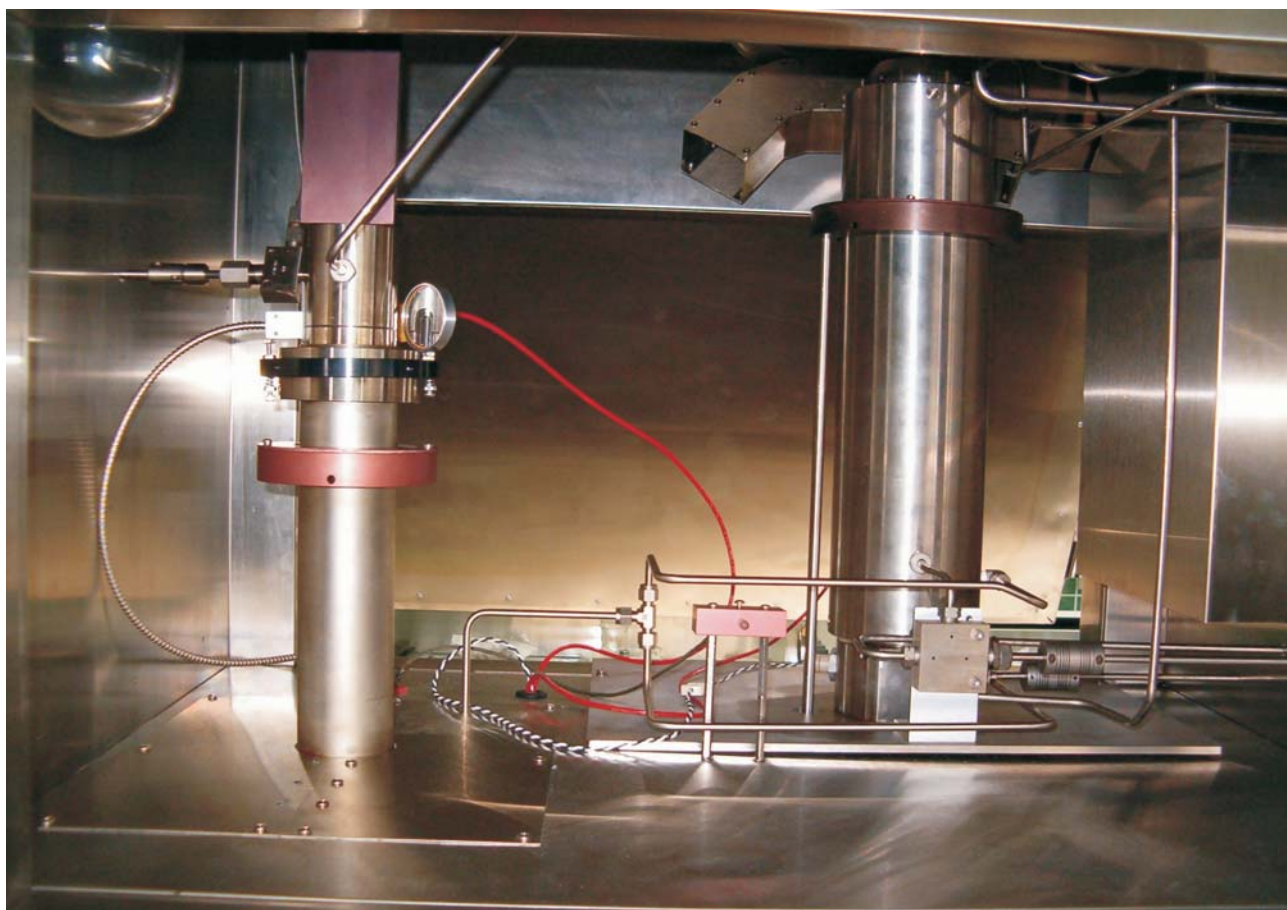
Rozpuszczalność CO₂ maleje wraz ze wzrostem temperatury (ryc. 7). Ten trend rozpuszczalności zakłóca zmieniająca się mineralizacja, nie koniecznie wraz z rosnącą temperaturą.

Zależność rozpuszczalności CO₂ wraz ze wzrostem ciśnienia przedstawiona na rycinie 8 jest wyraźnie zakłócona przez wpływ mineralizacji badanej solanki, która oddziałuje odwrotnie do ciśnienia. Wraz z rosnącym ciśnieniem zwiększającą rozpuszczalność CO₂ rośnie zwykle mineralizacja, a jej efekt jest zupełnie odwrotny. W rezultacie otrzymujemy obraz wyraźnie zdeformowany.

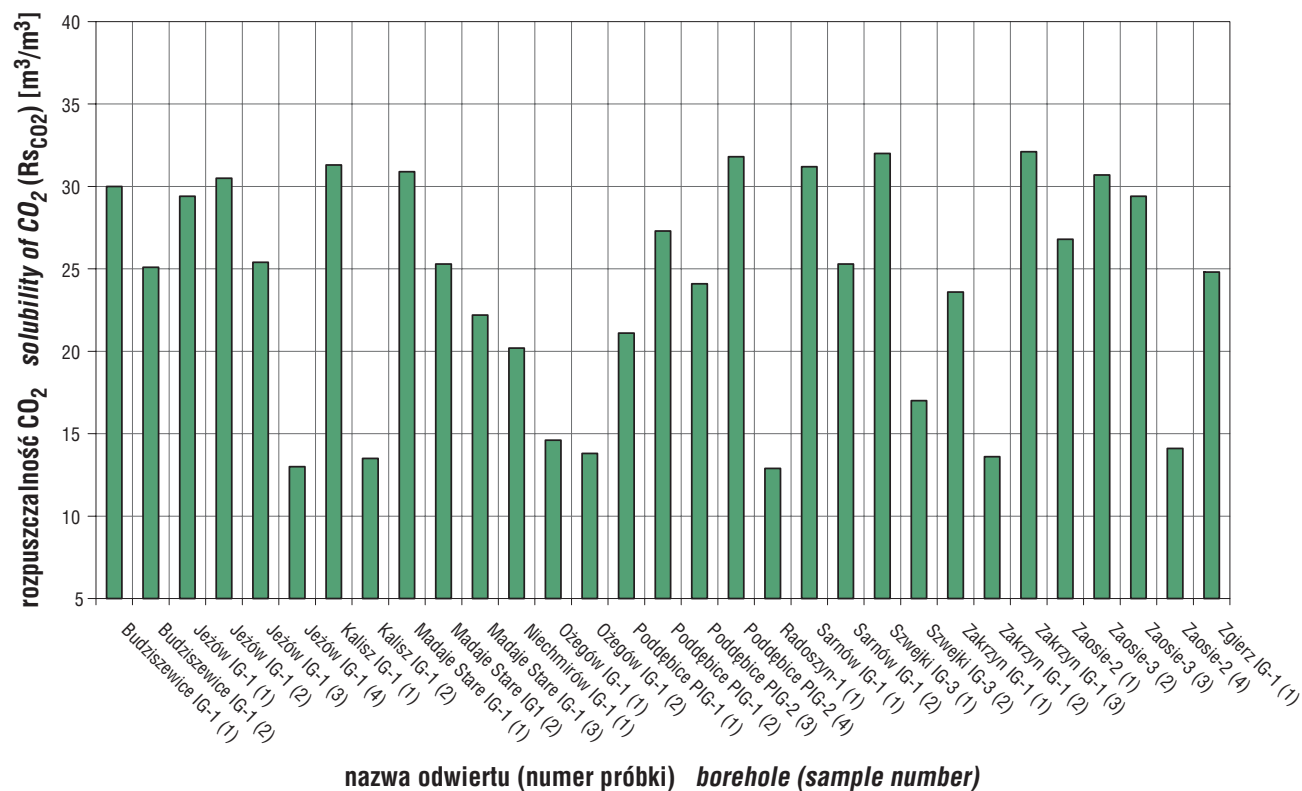
Prawidłową zależność uzyskano natomiast badając wpływ mineralizacji solanki na wielkość rozpuszczalności, która jest odwrotnie proporcjonalna do tego parametru (ryc. 9).



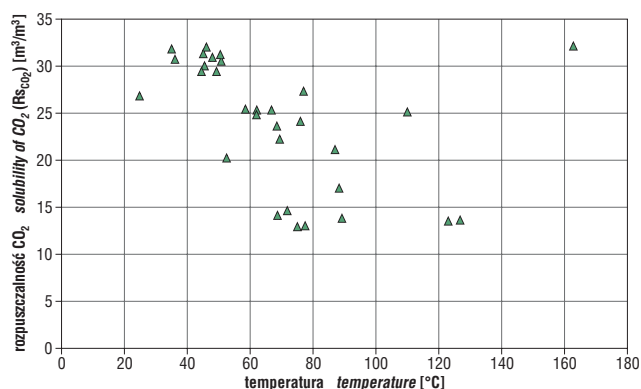
Ryc. 4. Aparatura do badań przemian fazowych PVT w INiG, Oddział Krosno. Fot. M. Warnecki
Fig. 4. Apparatus for PVT study of phase transitions in INiG, Krosno Branch. Photo M. Warnecki



Ryc. 5. Komory ciśnieniowe posadowione w powietrznej łaźni termostatycznej. Fot. M. Warnecki
 Fig. 5. Pressure chamber placed in the thermostatic air bath. Photo M. Warnecki

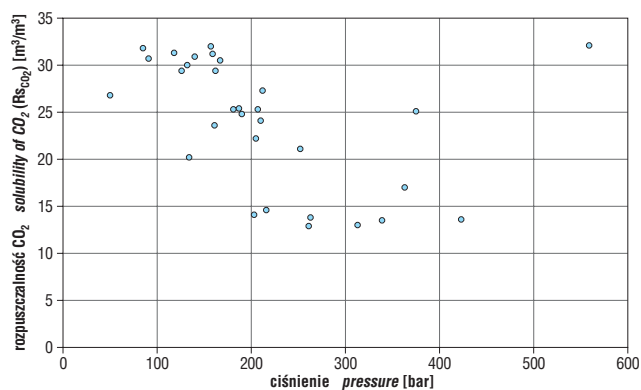


Ryc. 6. Rozpuszczalność CO2 w poszczególnych solankach w wybranych otworach wiertniczych
 Fig. 6. Solubility of CO2 in brines under in selected boreholes



Ryc. 7. Rozpuszczalność CO₂ w solankach w funkcji rosnącej temperatury złożowej

Fig. 7. Solubility of CO₂ in the brines as a function of rising reservoir



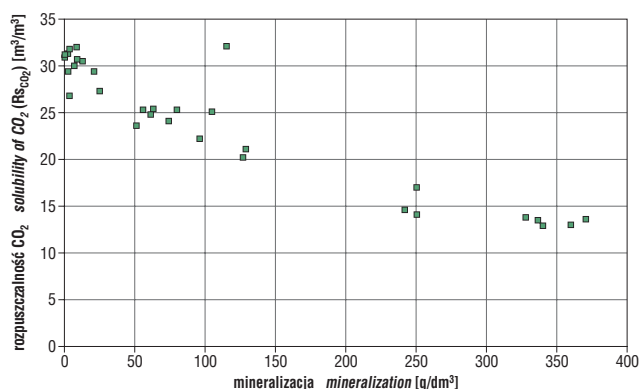
Ryc. 8. Rozpuszczalność CO₂ w solankach w funkcji ciśnienia złożowego

Fig. 8. Solubility of CO₂ in the brines as a function of reservoir pressure

Wnioski

W artykule zarysowano w skróconej formie zagadnienia związane z możliwością składowania CO₂ w poziomach solankowych rejonu Bełchatowa, zwracając szczególną uwagę na rolę rozpuszczalności. Określona w wyniku badań doświadczalnych rozpuszczalność CO₂ w poszczególnych solankach, zmieniała się w zakresie od 12,9 (Radoszyn-1) do 32,1 m³/m³ (Zakrzyn IG-1). Łatwość rozpuszczania się CO₂ w wodach złożowych uzależniona jest od parametrów złożowych oraz cech fizyczno-chemicznych solanki. Mineralizacja będąca m.in. pochodną głębokości zalegania warstwy wodonośnej, a więc również ciśnienia i temperatury ma zasadniczy wpływ na zdolności rozpuszczania się CO₂ w danej solance złożowej. Jak powszechnie wiadomo, w solankach charakteryzujących się wysoką wartością mineralizacji rozpuszczalność CO₂ jest niższa w porównaniu do wód słodkich. W strukturze Budziszewice rozważanej wstępnie jako obiekt sekwestracyny dla Bełchatowa, rozpuszczalność CO₂ jest całkiem pokaźna i wynosi od 25 do 30 m³/m³. Uzyskane wyniki zostaną wykorzystane w dalszych pracach konsorcjum, a szczególnie podczas wykonywania prognoz określających pojemność składowania CO₂ na dynamicznych modelach symulacyjnych obiektów zlokalizowanych w rejonie Bełchatowa zgodnie z założonym programem zatłaczania.

Przytoczone prace studialne wykazują, na podstawie wykonanych symulacji złożowych, powolny przebieg zja-



Ryc. 9. Rozpuszczalność CO₂ w solankach w funkcji mineralizacji

Fig. 9. Solubility of CO₂ in the brines as a function of brine mineralization

wisk rozpuszczania CO₂ w poziomach solankowych, wymaga to jednak potwierdzenia obserwacjami i badaniami polowymi, np. w obiekcie Borzęcin.

W artykule wykorzystano wyniki prac wykonanych na zamówienie Ministra Środowiska za środki finansowe wypłacone przez Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej.

Literatura

- BACHU S. & SHAW J. 2003 — Evaluation of the sequestration capacity in Alberta's oil and gas reservoirs at depletion and the effect underlying aquifers. *Can. J. Petr. Techn.*, 42, 9: 51–61.
- CHADWICK A., ARTS R., BRENSTONE CH. MAY F., THIBEAU S. & ZWEIGEL P. 2007 — Best practice for the storage of CO₂ in saline aquifers. CO2STORE_BPM_final_rev 1.
- HORNE R. 2008 — Physical modeling of CO₂ sequestration. California Energy Commission, Stanford University.
- LUBAŚ J. 2007 — Pionierskie doświadczenia Polski w zakresie sekwestracji dwutlenku węgla. *Prz. Geol.*, 55, 8: 663–665.
- LUBAŚ J., MATYASIK I. & SOWIŹDŹAŁ K. 2009 — Rozpoznawanie formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO₂ wraz z programem ich monitorowania — Charakterystyka hydrogeochemiczna płynów złożowych. Zamówienie Ministra Środowiska. Arch INiG, Kraków.
- MEADOWS M. 2008 — Time — lapse seismic modeling and inversion of CO₂ saturation for storage and enhanced oil recovery. *TLE*, 27, 4: 506–516.
- SZOTT W. 2009 — Rozpoznawanie formacji i struktur dla bezpiecznego geologicznego składowania CO₂ wraz z programem ich monitorowania. Opracowanie szczegółowych statycznych modeli ośrodka geologicznego składowisk. Zamówienie Ministra Środowiska. Arch INiG, Kraków.
- TARKOWSKI R. (red.) 2005 — Podziemne składowanie CO₂ w głębokich strukturach geologicznych (ropo-, gazo- i wodonośnych). Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- TARKOWSKI R., MAREK S. & ULIASZ-MISIAK B. 2009 — Wstępna geologiczna analiza struktur do składowania CO₂ w rejonie Bełchatowa. *Gosp. Sur. Miner.*, 25, 2: 37–45.
- VAN DER MEER B. & EGBERTS P. 2008 — Calculating subsurface CO₂ storage capacities. *TLE*, 27, 4: 502–505.
- VAN DER MEER L. & VAN WEES J. 2006 a — Effects of CO₂ solubility on the long — term fate of CO₂ sequestered in a saline aquifer. *TLE*, 25, 10: 1276–1280.
- VAN DER MEER L. & VAN WEES J. 2006 b — Limitation to storage pressure in finite saline aquifers and effect of CO₂ solubility on storage pressure. *SPE* 103342.
- WARNECKI M. & KUŚNIERCZYK J. 2009 — Rozpoznawanie formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO₂ wraz z programem ich monitorowania — Badania PVT płynów złożowych. Zamówienie Ministra Środowiska. Arch INiG, Kraków.
- WÓJCICKI A. 2008 — Rozpoznawanie formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO₂ wraz z programem ich monitorowania — Charakterystyka formacji i struktur do geologicznego składowania CO₂. Zamówienie Ministra Środowiska. Centr. Arch. Geol. Państw. Inst. Geol., Warszawa.

Praca wpłynęła do redakcji 14.09.2009 r.

Po recenzji akceptowano do druku 03.02.2010 r.