

PERSPEKTYWICZNE KOMPLEKSY DO SKŁADOWANIA CO₂ W PODŁOŻU KARPAT ZEWNĘTRZNYCH I ZAPADLIKA PRZEDKARPACKIEGO POMIĘDZY KRAKOWEM A RZESZOWEM

THE PROSPECTIVE COMPLEXES FOR CO₂ STORAGE IN THE BASEMENT OF THE CARPATHIAN FOREDEEP BETWEEN CRACOW AND RZESZÓW

JÓZEF CHOWANIEC¹, ZBIGNIEW BUŁA², RYSZARD HABRYN², WOJCIECH RYŁKO¹, ADAM TOMAŚ¹

Abstrakt. W artykule przedstawiono analizę możliwości składowania dwutlenku węgla na obszarze obejmującym strefę Karpat zewnętrznych i zapadlisko przedkarpackie na obszarze między Krakowem a Rzeszowem. W wyniku przeprowadzonej analizy budowy geologicznej za potencjalne skały zbiornikowe do składowania CO₂ uznano występujące na tym obszarze: gruboklastyczne utwory kambru dolnego, węglanowe osady dewonu środkowego i górnego oraz karbonu dolnego, a także permio-triasowe i środkowojurajskie piaskowce i zlepieńce.

Uwzględniając ogólnie przyjęte kryteria przy typowaniu struktur i formacji do geologicznego składowania CO₂, wyróżniono cztery rejon występowania skał zbiornikowych.

Podobszar A — zbiornik Wadowice–Myślenice o powierzchni około 850 km², w którym jako potencjalny zbiornik do składowania CO₂ wytypowano kompleks dolnokambryjskich skał piaskowcowo-zlepieńcowych. Podobszar B — zbiornik Gdów o powierzchni 765,5 km², skałę zbiornikową stanowią tu piaskowce i zlepieńce permio-triasu i jury środkowej. Podobszar C — zbiornik Niepołomice o powierzchni 268,9 km², skałę zbiornikową stanowią dewońskie wapienie i dolomity. Podobszar D — zbiornik Grobla. Obszar proponowanego zbiornika obejmuje 422,4 km², skałę zbiornikową stanowią dewońsko-dolnokarbońskie wapienie i dolomity. Poziom uszczelniający dla skał zbiornikowych w wymienionych rejonach stanowią utwory mioceńskie zapadliska przedkarpackiego, tworzące na analizowanym obszarze zwartą pokrywę, o zróżnicowanej miąższości przekraczającej 100 m. W części południowej obszaru na te utwory są nasunięte jednostki fliszowe Karpat.

Słowa kluczowe: technologia CCS, magazyny CO₂, podłoże Karpat.

Abstract. The paper deals with the possibility of carbon dioxide storage in the Outer Carpathians and the Carpathian Foredeep between Kraków and Rzeszów. The analysis of the geological structure has revealed the following potential reservoir rocks for CO₂ storage: coarse-clastic Cambrian rocks, Middle and Upper Devonian and Lower Carboniferous carbonates, and Permian-Triassic and Middle Jurassic sandstones and conglomerates. Four sub-areas of reservoir rocks have been indicated for the geological storage of CO₂: (1) Sub-area A – the Wadowice–Myślenice reservoir with a surface area of about 850 km² as a potential reservoir for CO₂ represented by a Lower Cambrian sandstone-conglomerate rock complex; (2) Sub-area B – the Gdów reservoir with a surface area of 765.5 km², where the reservoir rocks are Permian-Triassic and Middle Jurassic sandstones and conglomerates; (3) Sub-area C – the Niepołomice reservoir with a surface area of 268.9 km², with the reservoir rocks composed by Devonian carbonates and dolomites; (4) Sub-area D – the Grobla reservoir with a surface area of 422.4 km², represented by Devonian–Lower Carboniferous carbonates and dolomites. The cap rocks for the reservoir rocks in these areas are the Miocene formations of the Carpathian Foredeep, forming a compact cover with a variable thickness exceeding 100 m. In the southern part of the area, these formations are overthrust by the Flysch formations of the Outer Carpathians.

Key words: CCS technology, CO₂ storage, Carpathians bedrock.

¹ Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, Oddział Karpacki, ul. Skrzatów 1, 31-560 Kraków;
e-mail: jozef.chowaniec@pgi.gov.pl, wojciech.rylko@pgi.gov.pl, adam.tomas@pgi.gov.pl

² Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, Oddział Górnośląski, ul. Królowej Jadwigi 1, 41-200 Sosnowiec;
e-mail: zbigniew.bula@pgi.gov.pl, ryszard.habryn@pgi.gov.pl

WSTĘP

W ramach krajowego programu „Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO₂ wraz z ich programem monitorowania” uruchomionego przez Ministerstwo Środowiska w 2008 r., wykonano w latach 2010–2011 prace oraz badania mające na celu wytypowanie i charakterystykę struktur geologicznych do składowania CO₂ w rejonie IV, obejmującym strefę Karpat zewnętrznych i zapadlisko przedkarpackie na obszarze między Krakowem a Rzeszowem (Chowaniec i in., 2010a, b, 2011; Buła i in., 2011).

Do przeprowadzonej w pierwszym etapie prac analizy budowy geologicznej tego obszaru wykorzystano dane z 235 otworów wiertniczych oraz archiwalne i publikowane mapy geologiczne, a także wyniki zrealizowanych tu prac sejsmicznych. Ponadto wykonano 19 przekrojów geologicznych obrazujących budowę geologiczną poszczególnych części tego obszaru do głębokości ponad 3 km. W wyniku przeprowadzonej analizy budowy geologicznej za potencjalne skały zbiornikowe do składowania CO₂ uznano występujące na tym obszarze: gruboklastyczne utwory kambru dolnego, węglanowe osady dewonu środkowego i górnego oraz karbonu dolnego, a także permsko-triasowe i środkowojurajskie piaskowce i zlepieńce.

Uwzględniając ogólnie przyjęte kryteria przy typowaniu struktur i formacji do geologicznego składowania CO₂ (Chadwick i in., 2006; Wójcicki, 2010), wyróżniono cztery rejony występowania skał zbiornikowych (fig. 1, 2):

- podobszar A — zbiornik Wadowice–Myślenice – skała zbiornikowa: piaskowce i zlepieńce kambru dolnego;

- podobszar B — zbiornik Gdów – skała zbiornikowa: piaskowce i zlepieńce permo-triasu i środkowej jury;
- podobszar C — zbiornik Niepołomice – skała zbiornikowa: dewońsko-dolnokarbońskie wapienie i dolomity;
- podobszar D — zbiornik Grobla – skała zbiornikowa: dewońsko-dolnokarbońskie wapienie i dolomity.

Poziom uszczelniający dla skał zbiornikowych w wymienionych rejonach stanowią utwory mioceńskie zapadliska przedkarpackiego, tworzące na analizowanym obszarze zwartą pokrywę, o zróżnicowanej miąższości przekraczającej 100 m. W części południowej obszaru na te utwory są nasunięte jednostki fliszowe Karpat zewnętrznych (fig. 3).

Należy podkreślić, że przy wyznaczaniu wymienionych potencjalnych zbiorników magazynowania CO₂ brano również pod uwagę ich położenie (odległość) od głównych emitentów CO₂ usytuowanych na tym obszarze, do których należą: Mittal Steel Poland S.A. Oddział Kraków; Elektrownia Skawina S.A.; Zakłady Azotowe w Tarnowie-Mościskach S.A.

W drugim etapie prac przeprowadzono szczegółową charakterystykę wytypowanych, potencjalnych zbiorników CO₂ (Buła i in., 2011; Chowaniec i in., 2011), z uwzględnieniem głównie kryteriów geologicznych (Chadwick i in., 2006). W tym celu wykonano dla poszczególnych rejonów (A–D; fig. 1, 2) mapy strukturalne i miąższościowe kompleksów skał zbiornikowych oraz zebrano dane archiwalne dotyczące ich cech petrologicznych i petrofizycznych (porowatości i przepuszczalności), a także wyniki badań hydrogeologicznych.

TŁO GEOLOGICZNE

Analizowany obszar charakteryzuje się skomplikowaną, piętrową budową geologiczną. W wykonanych otworach wiertniczych osiągnięto różnowiekowe, o różnej genezie skały: prekambryjskie (archaiczne i proterozoiczne), paleozoiczne (dolnokambryjskie, sylurskie, dewońskie, karbońskie i permskie), mezozoiczne (triasowe, jurajskie i kredowe) oraz kenozoiczne (mioceńskie) (fig. 1–3).

Na omawianym obszarze kontaktują się wzdłuż strefy uskoku Kraków–Lubliniec dwie regionalne jednostki tektoniczne – blok górnośląski i blok małopolski, różniące się budową prekambryjskiego fundamentu oraz rozwojem paleogeograficzno-facjalnym i paleotektonicznym paleo-

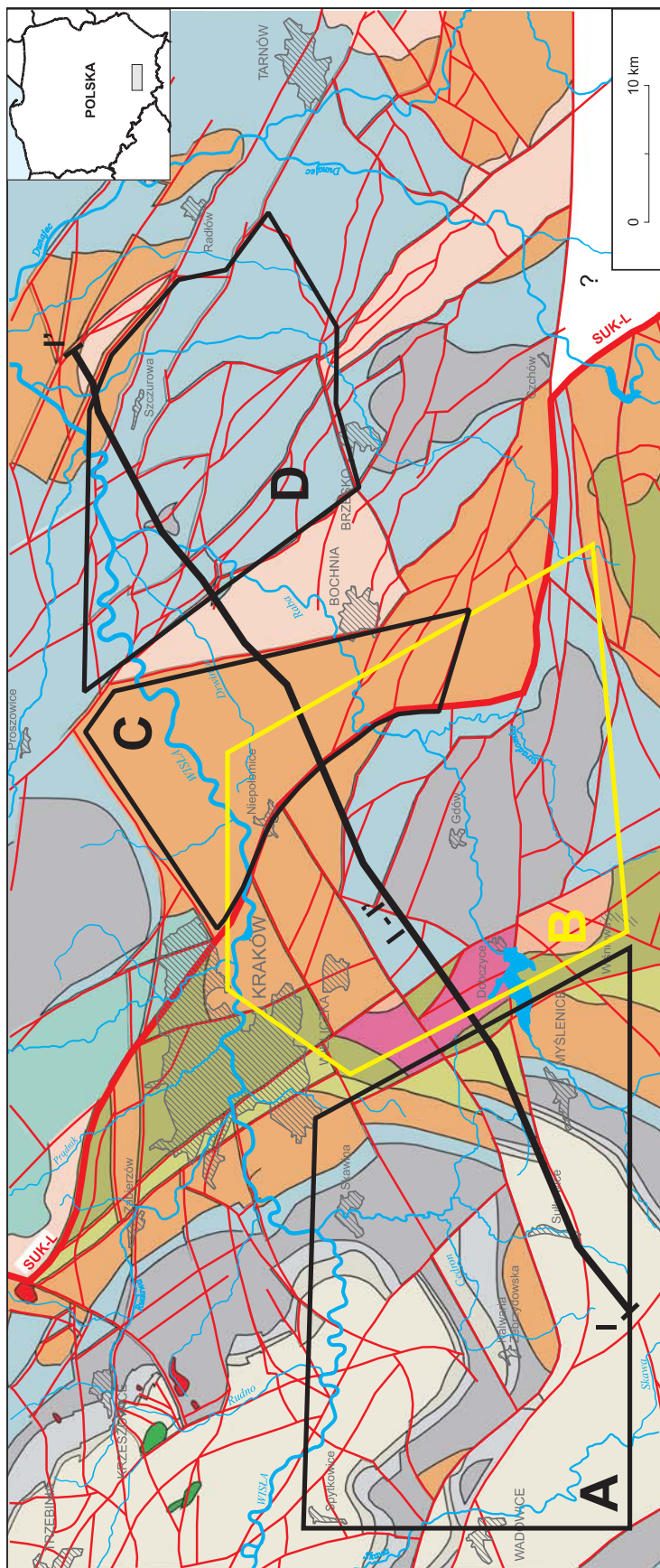
zoicznych pokryw osadowych (m.in. Buła, Habryn, 2008, 2010; Buła i in., 2008).

Fundament prekambryjski bloku górnośląskiego w jego południowo-wschodniej części tworzą zróżnicowane wiekowo (archaiczno-wczesnoproterozoiczne i neoproterozoiczne), a także pod względem przeobrażeń metamorficznych kompleksy skał krystalicznych (metamorficznych), anchi-metamorficznych i osadowych (fig. 1, 3) (Buła, Habryn, 2008, 2010; Buła, Żaba, 2008; Żelaźniewicz i in., 2009). Prekambryjski fundament bloku małopolskiego, w jego części objętej badaniami, tworzą natomiast zaliczane do ediakaru skały silikoklastyczne o charakterze fliszowym i słabym



Fig. 1. Analizowane obszary zbiornikowe na tle mapy geologicznej odkrytej po karbon (według Buły, Habryna, 2008)

Analysed areas for CO₂ storage against the map of Carbon formations (after Buła, Habryn, 2008)



GÓRNY PALEOZOIK
UPPER PALEOZOIC

- krakowska seria piaskowca (westfal B-D)
Cracow Sandstone Series (Westphalian B-D)
- seria mulowocowa (westfal A-B)
Mudstone Series (Westphalian A-B)
- górnosląska seria piaskowca (namur B-C)
Upper Silesian Sandstone Series (Namurian B-C)
- seria paraliczna (wyższy namur A)
Paralic Series (upper Namurian A)
- karbońskie skł. klastyczne (kulm)
Carboniferous terrigenous rocks (Culm)
- karbońskie skł. węglanowe
Carboniferous carbonate rocks
- devonskie skł. węglanowe
Devonian carbonate rocks
- dolnodewonskie skł. klastyczne
Lower Devonian terrigenous rocks

- górnokarbońskie utwory węglonośne GZW)
Upper Carboniferous coal-bearing deposits of the Upper Silesian Coal Basin)
- BLOK MAŁOPOLSKI I GÓRNOŚLĄSKI
MAŁOPOLSKA AND UPPER SILESIAN BLOCKS
- BLOK GÓRNOŚLĄSKI
UPPER SILESIAN BLOCK

DOLNY PALEOZOIK
LOWER PALEOZOIC

- sylur
Silurian
- kambryjny dolny holmitowy i subholmitowy
Lower Cambrian Holmia and Sub-holmia Zone
- kambryjny dolny subholmitowy – formacja z Borzęty (fm)
Lower Cambrian Sub-holmia Zone – Borzęty Formation (fm)

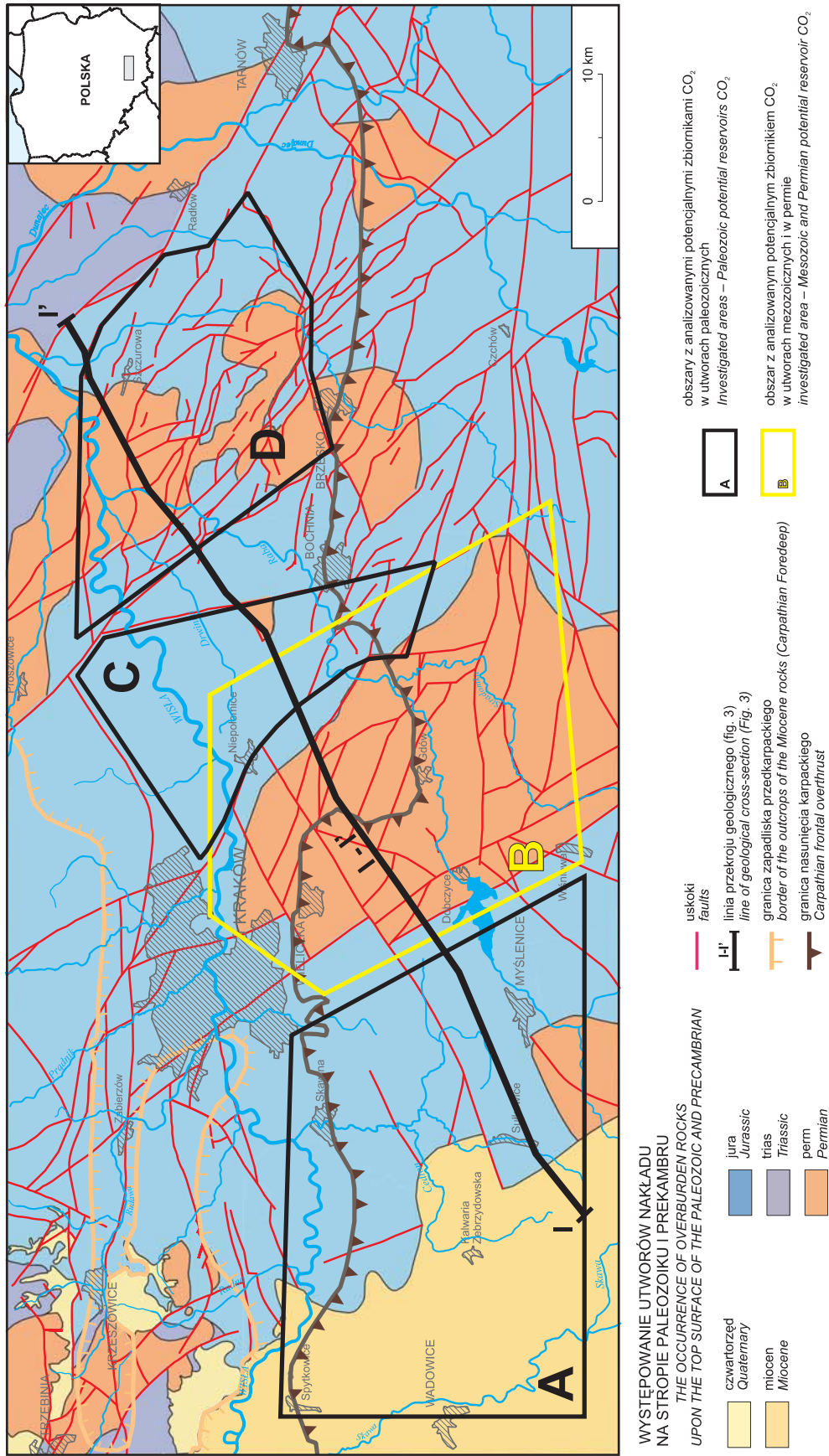
PREKAMBR
PRECAMBRIAN

- ediakarskie skł. anchimetamorficzne
Etiacaran anchimetamorphic rocks
- ediakarskie zlepionce polimiktyczne
Etiacaran polymictic conglomerates
- archajczno-wczesnoproterozoiczne skł. krystaliczne
Archaean-Early Proterozoic crystalline rocks

SKALY MAGMOWE NA POWIERZCHNI PALEOZOIKU
IGNEOUS ROCKS ON THE TOP SURFACE OF THE PALAEOZOIC

- porfiry, granitoidy
porphyres, granitoides
- diabazy, melafiry
diabases, melaphyres
- uskoki
faults

- obszary z analizowanymi potencjalnymi zbiornikami CO₂ w utworach paleozoicznych
Investigated areas – Paleozoic potential reservoirs CO₂
- obszary z analizowanymi potencjalnym zbiornikiem CO₂ w utworach mezozoicznych i w permie
Investigated area – Mesozoic and Permian potential reservoir CO₂
- strefa uskokiowa Kraków-Lubliniec
Krakow-Lubliniec Fault Zone
- linia przekroju geologicznego (fig. 3)
line of geological cross-section (fig. 3)



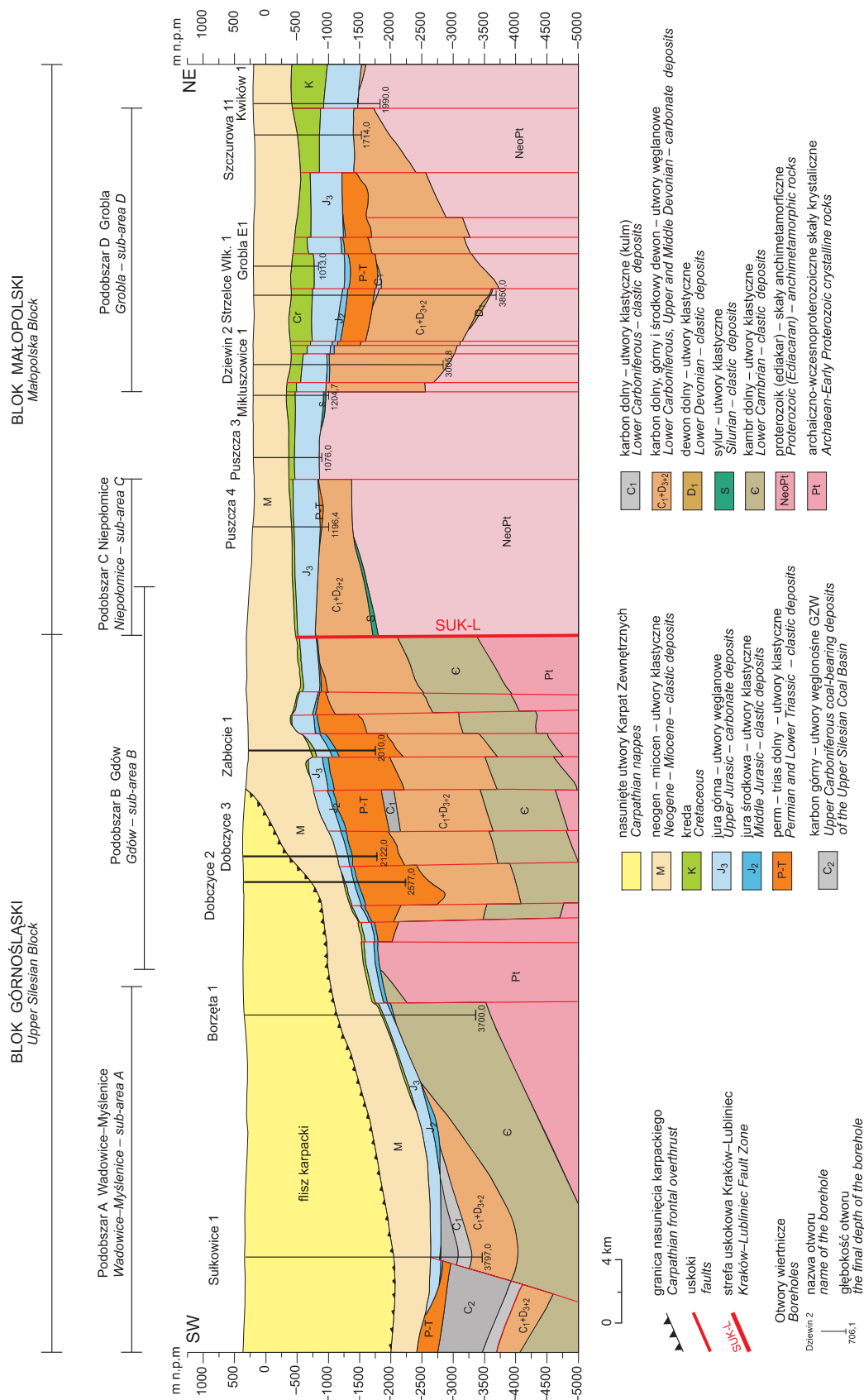


Fig. 3. Przekrój geologiczny I-I'

Geological cross-section I-I'

stopniu przeobrażeń metamorficznych (anchimetamorficznych) (fig. 1, 3; Buła, Habryn, 2008, 2010; Żelaźniewicz i in., 2009). Konsolidacja fundamentu prekambryjskiego bloku górnośląskiego i małopolskiego jest wiązana z kadomskimi procesami tektoniczno-termalnymi (Żelaźniewicz i in., 2009).

W obrębie paleozoicznej pokrywy osadowej, w analizowanych częściach obu bloków można wyróżnić dwa piętra strukturalne ukształtowane w wyniku kaledońskich i waryscyjskich procesów sedymentacyjno-diastraficznych.

W południowo-wschodniej części bloku górnośląskiego wczesnopaleozoiczne (kaledońskie) pokrywowe piętro strukturalne reprezentują piaskowce, mułowce, iłowce i zlepińce kambru dolnego (fig. 1, 3), które rozwijały się w warunkach lądowych (dyluwialno-aluwialnych) i płytkiego szelfu (Pacześna, 2005, 2010). W profilu tych osadów, osiagających tu maksymalną miąższość rzędu 2000 m, są wyróżniane dwie nadrzędne jednostki litostratygraficzne – formacje z Borzęty (fm) i z Goczałkowic (fm), które zostały podzielone na szereg jednostek litostratygraficznych w randze ogniów (Buła, 2000; Buła, Habryn, 2010; Jachowicz-Zdanowska, 2011). Dolnokambryjskie osady bloku górnośląskiego leżą niezgodnie na różnowiekowych skałach prekambryjskich tworzących jego fundament. Od góry kontaktują się wzdłuż powierzchni nieciągłości sedymentacyjnej, podkreślonej niezgodnością kątową, z utworami dewońskimi lub bezpośrednio mezozoicznymi (jurajskimi) (fig. 3). Utwory wczesnopaleozoicznego pokrywowego piętra strukturalnego bloku małopolskiego zachowały się w jego obrębie tylko lokalnie. W jego południowo-zachodniej części między Skałą a Bochnią są reprezentowane przez osady zlepińcowo-piaszczysto-mułowcowe o niejasnej genezie i miąższości do około 300 m. Skały te, zaliczone do syluru i wyróżnione jako formacja z Łapczycy (fm) (fig. 1) (Buła, 2000; Buła, Habryn, 2010), leżą z wyraźnie zaznaczającą się dyskordancją kątową na sfałdowanych ediakarskich utworach fliszowych, a od góry kontaktują się niezgodnie z utworami dewonu lub mezozoiku.

Zarówno na bloku górnośląskim, jak i małopolskim górnopaleozoiczne (waryscyjskie) pokrywowe piętro strukturalne tworzą podobne litologicznie utwory dewonu i karbonu dolnego. W profilach tych utworów są wyróżniane trzy zróżnicowane litologicznie i facjalnie kompleksy skalne, tj.: dolnodewoński kompleks skał klastycznych; kompleks środkowo-górnodewońskich i dolnokarbońskich skał węglanowych; kompleks dolnokarbońskich skał klastycznych (fig. 1, 3) (m.in. Jawor, 1970; Zając, 1975, 1981, 1984; Tomasz, Zając, 1996; Narkiewicz, 2001, 2005; Buła, Krieger, 2004; Jawor, Baran, 2004; Moryc, 2006a; Buła, Habryn, 2008, 2010; Tomasz, Tomasz, 2010).

Dolnodewońskie skały klastyczne, rozwinięte w facji old redu i zaliczane do emsu, występują tylko lokalnie w analizowanych częściach bloków górnośląskiego i małopolskiego, a ich miąższość nie przekracza 70 m. Utwory te, leżące na bloku górnośląskim, Narkiewicz (2005) wyróżnił w randze formalnej jednostki litostratygraficznej – formacji żwirowców, piaskowców i mułowców z Andrychowa (fm).

Skały węglanowe dewonu środkowego i górnego oraz karbonu dolnego, rozwinięte w facjach platformy węglanowej, są reprezentowane przez różne litotypy dolomitów i wapieni oraz margle. Miąższość tego kompleksu skalnego w południowo-wschodniej części bloku górnośląskiego jest zmienna – od 400 do 1500 m, natomiast na bloku małopolskim, w jego południowo-wschodniej części, gdzie dewońsko-dolnokarboński kompleks węglanowy poddany został intensywnej pokarbońskiej erozji, jego miąższość jest bardzo zróżnicowana. W rowach tektonicznych maksymalnie sięga 1900 m. W południowej części tego bloku, na obszarze między Tarnowem a Rzeszowem brak jest osadów dewońskich, a dolnokarbońskie skały węglanowe leżą bezpośrednio na utworach starszych (sylurskich, ordowickich lub ediakarskich). Zdaniem Zając (1987) oraz Narkiewicza i in. (1988) obszar ten w dewonie był lądem. W profilach dewońsko-dolnokarbońskich skał węglanowych, w analizowanych częściach bloków górnośląskiego i małopolskiego wyróżniono szereg formalnych i nieformalnych jednostek litostratygraficznych o różnej randze (Tomasz, Zając, 1996; Jawor, Baran, 2004; Narkiewicz, 2005; Moryc, 2006a).

Dolnokarbońskie skały klastyczne (wizen górny – niższy namur A), określane jako kulum, są reprezentowane przez piaskowce, iłowce i mułowce, którym lokalnie towarzyszą wkładki wapieni, a na obszarze bloku górnośląskiego również wkładki węgla kamiennych. W południowo-wschodniej części bloku górnośląskiego miąższość tych utworów, określanych jako warstwy zalaskie (Kotas, 1972; Buła, 2001; Buła, Habryn, 2010), sięga 700 m. W południowo-zachodniej części bloku małopolskiego dolnokarbońskie skały klastyczne występują tylko lokalnie, tam gdzie zachowały się w obrębie struktur o charakterze rowów tektonicznych. Największą ich miąższość – ponad 1200 m – stwierdzono w obrębie rowu Słomnik (Buła, Habryn, 2008, 2010).

Stropową część górnopaleozoicznego (waryscyjskiego) pokrywowego piętra strukturalnego na obszarze bloku górnośląskiego reprezentują górnokarbońskie (namur A–westfal D) utwory węglonośne Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (GZW). W analizowanej części bloku górnośląskiego miąższość górnokarbońskich osadów węglonośnych, tworzących tu południowo-zachodnią część GZW (fig. 1), sięga 1000 m (Buła, Habryn, 2010). Na bloku małopolskim brak jest odpowiedników stratygraficznych i litofacjalnych tych utworów. W analizowanej części bloku górnośląskiego miąższość górnokarbońskich osadów węglonośnych, tworzących tu południowo-zachodnią część GZW, sięga 1000 m. Na bloku małopolskim brak jest odpowiedników stratygraficznych i litofacjalnych tych utworów.

Fundament prekambryjski bloku górnośląskiego i osady paleozoiczne występujące w formie pokryw osadowych na tych jednostkach tektonicznych w trakcie późnowaryscyjskich ruchów tektonicznych zostały poddane silnym deformacjom tektonicznym, głównie typu dysjunktywnego i intensywnej, pokarbońskiej erozji. O skali i intensywności tych procesów świadczy fakt, że na powierzchni podpermsko-mezozoicznej w analizowanych częściach bloku górno-

śląskiego i małopolskiego odsłaniają się różnowiekowe utwory prekambryjskie i paleozoiczne (dolnokambryjskie, sylurskie, dewońskie i karbońskie; fig. 1, 3).

Utwory permskie i mezozoiczne, leżące tu niezgodnie na różnowiekowych, starszych skałach (fig. 1–3), włączane są do permsko-mezozoicznego pokrywowego piętra strukturalnego ukształtowanego w wyniku wczesnoalpejskich procesów sedymentacyjno-diastraficznych. Występujące tu utwory jury i kredy, a lokalnie również triasu, tworzą południowo-wschodnią część monokliny śląsko-krakowskiej i południową część niecki miechowskiej.

Dolną część permsko-mezozoicznego pokrywowego piętra strukturalnego tworzą lądowe (rzeczne i jeziorne) nierozdzielone stratygraficznie utwory permu i triasu dolnego, wyróżniane jako kompleks permsko-triasowy (m.in. Kiersnowski, 2001; Moryc, 2006b). Tworzą go mułowce i piaskowce, którym często towarzyszą zlepieńce, a rzadziej węglany (wapienie) i ewaporyty (gipsy i anchydryty). Na analizowanym obszarze utwory te występują tylko lokalnie i wypełniają obniżenia tektoniczno-morfologiczne (o charakterze rowów i półrowów tektonicznych) (fig. 2, 3), ukształtowane na powierzchni podpermskiej w wyniku finalnych ruchów waryscyjskich. Miąższość kompleksu permsko-triasowego jest silnie zróżnicowana, w przedziale od kilkudziesięciu do ponad 1300 m. Największą miąższość (rzędu 1390 m) utwory te osiągają w rowie Liplasu (otwory: Liplas 2, Tarnawa 1; Kiersnowski, 2001; Moryc, 2006b). Wyższą część permsko-mezozoicznego pokrywowego piętra strukturalnego, w zasięgu obszaru objętego badaniami, tworzą głównie epikontynentalne utwory jury i kredy (fig. 2, 3; Moryc, 2006b i cytowana tam literatura). Osady jurajskie należące do jury środkowej leżą na różnowiekowych utworach paleozoicznych i lokalnie triasowych w północno-wschodniej części omawianego obszaru (fig. 2, 3). Niższą część profilu jury środkowej reprezentują lądowe (rzeczne) osady piaskowcowo-ilasto-mułowcowe z wkładkami zlepieńców, a część

wyższą tworzą morskie osady klastyczno-węglanowe – piaskowce wapniste, wapienie organiczne i margliste. Utwory środkowojurajskie występują lokalnie, zwykle wypełniają nierówności morfologiczne (paleodoliny) na powierzchni podgórnójurajskiej (fig. 3), a ich miąższość sięga 180 m (otwór Zalasowa 1 w rejonie Tarnowa; Moryc, 2006b). Morskie osady węglanowe (wapienie, wapienie margliste) jury górnej tworzą zwartą pokrywę na obszarze między Wadowcami a Tarnowem (fig. 2, 3). Ich miąższość rośnie od południowego-zachodu w kierunku na północny wschód, od kilkudziesięciu do ponad 1000 m (Moryc, 2006b). Stropową część permsko-mezozoicznego pokrywowego piętra strukturalnego w rejonie między Krakowem a Tarnowem tworzą utwory kredy górnej (Moryc, 2006b i cytowana tam literatura), reprezentowane w dolnej części przez utwory zlepieńcowo-piaskowcowe cenomanu, a w części wyższej przez osady węglanowe (wapienie i margle), lokalnie z wkładkami iłowców. Zachowana miąższość utworów górnokredowych, które w okresie przedmioceniowym (badeńskim) uległy tu intensywnej erozji, sięga 700 m.

W trakcie ruchów laramijskich i późnoalpejskich utwory permsko-mezozoicznego pokrywowego piętra strukturalnego uległy zuskokowaniu oraz intensywnej erozji przedmioceniowej. Większość uskoków tnących te utwory ma starsze, waryscyjskie założenia.

Najmłodsze, późnoalpejskie piętro strukturalne na analizowanym obszarze budują mioceniowe, molasowe osady zapadliska przedkarpackiego o zróżnicowanej miąższości, do ponad 1200 m. Utwory te, tworzące tutaj zwartą pokrywę, są reprezentowane głównie przez iłowce i mułowce z przewarstwieniami piaskowców (formacja skawińska; Alexandrowicz, 1963), a lokalnie przez ewaporyty – sole kamienne i gipsy (formacja z Wieliczki; Garlicki, 1994). Na utwory te w późnym miocenie zostały nasunięte od południa jednostki fliszu Karpat zewnętrznych (fig. 3).

CHARAKTERYSTYKA POTENCJALNYCH ZBIORNIKÓW DO ZATŁACZANIA CO₂

PODOBSZAR A — ZBIORNIK WADOWICE–MYŚLENICE

W wyznaczonym podobszarze A (fig. 1–3), o powierzchni około 850 km², jako potencjalny zbiornik do składowania CO₂ wytypowano kompleks dolnokambryjskich skał piaskowcowo-zlepieńcowych (Chowaniec i in., 2010a, b; Buła i in., 2011). Kompleks ten, utworzony w przewodzie z różnoziarnistych piaskowców i zlepieńców pochodzenia rzeczno-górnego i deltowego (Paczeńska, 2005), jest zaliczany do ogniwa piaskowców skolitusowych z Mogilan (og) w formacji z Goczałkowic (fm) wyróżnionej w profilu kambru dolnego na bloku górnośląskim (Buła, 2000; Buła, Habryn, 2010). Piaskowce i zlepieńce tworzące ogniwo piaskowców skolitusowych z Mogilan (og) rozpoznano na obszarze Wadowice–Myślenice w 6 otworach wiertniczych (Potrójna IG 1, Wyso-

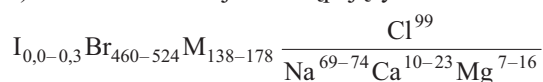
ka 1, 2; Mogilany 1; Głogoczów IG 1 i Borzęta IG 1). Osady tego ogniwa charakteryzują się tu silnie zróżnicowaną miąższością, która wzrasta od WSW w kierunku ENE od około 160 m (otwór Potrójna IG 1) do ponad 1400 m (otwór Mogilany 1). Z powyższego wynika, że miąższość tego kompleksu przekracza (i to wielokrotnie) przyjęte minimalne kryterium miąższościowe dla poziomów zbiornikowych do składowania CO₂ (>50 m; Chadwick i in., 2006).

Struktura występujących na tym obszarze osadów dolnokambryjskich i leżących ponad nimi zróżnicowanych litologicznie i facjalnie kompleksów skał dewońskich i karbońskich (fig. 1, 3), reprezentujących paleozoiczną pokrywę osadową w południowo-wschodniej części bloku górnośląskiego, została ukształtowana przede wszystkim w trakcie późnowaryscyjskich procesów tektonicznych, które przyczyniły się do ich silnego zuskokowania i rozwoju intensyw-

nej, pokarbońskiej erozji. Późniejsze, głównie wczesnoalpejskie, procesy tektoniczne doprowadziły przede wszystkim do reaktywacji niektórych uskoków o starszych założeniach i równoleżnikowym przebiegu, wzdłuż których utwory paleozoiczne przemieszczane są ku południowi (fig. 3).

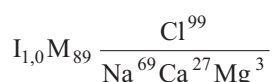
Wynikiem wspomnianych procesów tektonicznych jest silne zróżnicowanie struktury, a zwłaszcza głębokości zalegania, dolnokambryjskich osadów ogniwa piaskowców skolitusowych z Mogilan (og) na obszarze Wadowice–Myślenice. Strop tego ogniwa znajduje się tutaj na głębokości 700–5100 m p.p.t., a spąg w przedziale głębokości 1700–6000 m p.p.t. (Buła i in., 2011). Z punktu widzenia ekonomiki składowania CO₂ za optymalną przyjmuje się głębokość zalegania formacji zbiornikowej w przedziale 800–2500 m. To kryterium osady ogniwa piaskowców skolitusowych z Mogilan (og) spełniają tylko w części północnej i wschodniej analizowanego obszaru, w rejonie Wadowice–Skawina–Głogoczów (Buła i in., 2011).

W wyniku badań hydrogeologicznych osadów reprezentujących ogniwo piaskowców skolitusowych z Mogilan (og) w otworach wiertniczych Głogoczów IG 1, Mogilany 1 i Potrójna IG 1 stwierdzono w nich poziom (lub poziomy) subartezyjski (subartezyjskie), z których uzyskano dopływy solanek w ilości od 0,26 do 0,50 m³/h. Wody występujące w skałach tego ogniwa należą do strefy stagnacji i reprezentują wysokozmineralizowane solanki (138–178 g/dm³) jodowo-bromowe, chlorkowo-sodowe lub chlorkowo-wapniowe, klasy Cl-Ca (Bojarski, 1975). Chemizm wód został dokładnie zbadany w otworach Głogoczów IG 1 i Potrójna IG 1 (*op. cit.*). Ich średni skład jest następujący:



Są to wysoko zmineralizowane solanki jodowo-bromowe, chlorkowo-sodowe lub chlorkowo-wapniowe, klasy Cl-Ca wg Bojarskiego (1975). Opisane wody występują poniżej głębokości 2963 m i należą do strefy stagnacji.

Znacznie mniej zmineralizowane wody chlorkowo-sodowo-wapniowe występują w utworach kambru w rejonie Kęt (otwór Kęty 7), gdzie zostały opróbowane na głębokości 1655,0–1167,5 m. Średni skład chemiczny przedstawia się następująco:



Badania laboratoryjne porowatości i przepuszczalności piaskowców i zlepieńców ogniwa piaskowców skolitusowych z Mogilan (og), przeprowadzono na populacji 270 próbek pochodzących z otworów wiertniczych: Głogoczów IG 1, Mogilany 1, Potrójna IG 1 oraz Wysoka 1 i 3. Wyniki tych badań wskazują, że charakteryzują się one niskimi wartościami porowatości (poniżej 10%) i brakiem przepuszczalności lub bardzo niskimi współczynnikami przepuszczalności, których wartość nie przekracza 20 mD.

Ze względu na niskie wartości porowatości i przepuszczalności skał reprezentujących dolnokambryjski kompleks

ogniwa piaskowców skolitusowych na obszarze Wadowice–Myślenice oraz duże głębokości jego zalegania, podatność tego kompleksu skalnego do składowania CO₂ oceniono negatywnie (Buła i in., 2011).

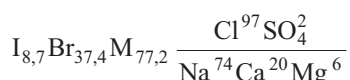
PODOBSZAR B — ZBIORNIK GDÓW

Podobszar B o powierzchni 765,5 km² wyznaczono na południowy wschód od Krakowa (fig. 1, 2). Przeprowadzona analiza budowy geologicznej obszaru (Buła, Habryn, 2008, 2010; Chowaniec i in., 2010a, b) (fig. 1–3) oraz parametrów petrofizycznych skał, w zestawieniu z kryteriami geologicznymi wyboru miejsc składowania CO₂, pozwoliła wyznaczyć i zakwalifikować kompleks osadów jury środkowej, z przystropowymi partiami permu–triasu dolnego i pozostającymi w kontakcie hydraulicznym nadległymi skałami węglanowymi jury górnej, do potencjalnych zbiorników CO₂ (Buła i in., 2011). W rozważaniach nad tak zdefiniowanym zbiornikiem kluczowe znaczenie ma fakt występowania w nadkładzie ilów miocenkich o dużej miąższości (do 1100 m), stanowiących doskonałą warstwę izolacyjną dla magazynów CO₂. Spąg tych utworów jednocześnie pokrywa się z powierzchnią stropową zbiornika. Opracowana mapa strukturalna spągu miocenu (Buła i in., 2011) wskazuje, że w części południowej i centralnej omawianego obszaru strop jurajskiego kompleksu występuje na głębokościach od 800 do 2000 m. Będące przedmiotem analizy utwory jury środkowej (rozpoznane w 35 otworach) wypełniają rozległą permsko-dolnojurajską dolinę erozyjną, której oś maksymalnego przegłębienia przebiega łukiem od rejonu Łąka–Rajbrot poprzez rejon Grabiny, Liplasu i Gdowa do Zabłocia, a następnie zakręca na południowy zachód między Dobczyce a Rzeszotary. Miąższości grubookruchowych i mułowcowo-piaszczystych osadów powyżej 50 m można się spodziewać w centralnej i zachodniej części paleodoliny w pasie o szerokości od 7–9 km, idąc od południowego wschodu, do 3,5 km w części zachodniej, a miąższości zbliżonych do 100 m w dwóch izolowanych obszarach Grabina–Liplas i Zabłocie (Buła i in., 2011). Bezpośrednio na utworach jury środkowej platformowo leżą utwory węglanowe jury górnej, tworzące ciągłą pokrywę na całym obszarze. Ich miąższość rośnie w kierunku północno-wschodnim od 52 do 370 m. Na utworach jury górnej płatowo leżą utwory kredy o niewielkich miąższościach.

Współczesny model geologiczno-strukturalny permsko-mezozoicznej pokrywy osadowej rejonu Gdowa został ukształtowany w wyniku licznych, głównie laramijskich uskoków z dwoma starszymi, regionalnymi, zrzucającymi na południe dyslokacjami. Pierwsza to uskoczek Rzeszotary–Niepołomice o kierunku SW–NE, o amplitudzie zrzutu w planie podmezozoicznym przekraczającej 400 m w części zachodniej obszaru i wygasającym na granicy strefy tektonicznej Kraków–Lubliniec, a druga to strefa Kraków–Lubliniec z towarzyszącym jej zespołem uskoków (fig. 1–3). Spowodowały one szybkie pograżanie podłoża południowej części

omawianego obszaru w kierunku południowym, powstanie równoleżnikowych i subrównoleżnikowych progów morfologicznych oraz zmianę nachylenia kompleksów skalnych ku południowi (fig. 3). Zwraca uwagę fakt, że wielkość zrzu-tów uskoków często przekracza miąższość utworów jury środkowej. Tektonika blokowa uniemożliwia zatem śród-formacyjne swobodne przepływy wewnątrz jednorodnych litologicznie i facjalnie osadów, gdyż w strefach przyusko-kowych utwory jury środkowej kontaktują w profilu pionowym z utworami węglanowymi jury górnej bądź ze skałami klastycznymi permu–triasu dolnego. Litologiczno-facjalne cechy wykształcenia osadów jury środkowej, charakter we-wnątrzformacyjnych granic oraz tektonika górotworu wska-zują, że kompleks środkowojurajski ma połączenia hydrau-liczne z leżącymi wyżej utworami węglanowymi jury górnej i dopiero występujące na całym obszarze iłowce badenu, w części południowej leżące również pod nasuniętymi utwo-rami Karpat zewnętrznych, są nieprzepuszczalne i stanowią doskonałą izolację dla potencjalnych zbiorników CO₂.

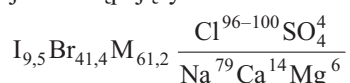
Chemizm wód triasowych opracowano na podstawie 29 analiz chemicznych. Średni skład chemiczny tych wód jest następujący:



Mineralizacja wód mieści się w przedziale od 0,61 do 176,60 g/dm³. Siarkowódór stwierdzono tylko w otworze wiertniczym Zalesie-1 koło Szczucina. Wody triasowe zawierają niekiedy w śladowych ilościach jon NH₄.

Na podstawie średniego składu chemicznego omawiane wody można zaliczyć do solanek jodowo-bromowych, chlorkowo-sodowo-wapniowych (wg Szczukarewa). Według Sulina wody te należą do typu chlorkowo-wapniowego, klasa Cl-Ca II (Bojarskiego, 1975). Średnia wartość stosun-ku $\frac{rSO_4 \cdot 100}{rCl}$ wynosi 3,34.

Chemizm wód występujących w osadach jury środkowej opracowano na podstawie 29 analiz chemicznych. Średni skład tych wód jest następujący:



Na podstawie średniego składu chemicznego omawiane wody można zaliczyć do solanek jodobromowych, chlorko-wo-sodowych (wg Szczukarewa), chlorkowo-wapniowych Sulina, klasy Cl-Ca II wg Bojarskiego (1975). Stosunek $\frac{rSO_4 \cdot 100}{rCl}$ wynosi 2,08.

W 35 otworach, w których rozpoznano osady jury środ-kowej, badania porowatości i przepuszczalności prowadzo-no w ograniczonym zakresie, na 98 próbkach nieregularnie pobranych z 12 przeważnie odcinkowo rdzeniowanych otworów wiertniczych. Maksymalne porowatości w poje-dynczej próbce dochodzą do 31,48% – gruboziarniste pias-kowce z otworu Dobczyce 2. Porowatość powyżej 20% stwierdzono w próbce z piaszkowców z otworu Raciborsko 1

(21,31% przy przepuszczalności 405,8 mD.) Umiarkowanie korzystne parametry – porowatość 10–20%, stwierdzono w 35 próbkach z następujących otworów: Zabłocie 1, Raj-brot 1 i 2, Tarnawa 1, Raciborsko 1 i 3, Leszczyna 4, Dob-czyce 2 i 3. Przepuszczalność badano w 67 próbkach. Warto-ści powyżej 50 mD stwierdzono jedynie w 11 próbkach. Wyższe wartości przepuszczalności są dobrze skorelowane z wyższą porowatością. Maksymalne wartości przepuszczal-ności w pojedynczych próbkach stwierdzono w otworach Tarnawa 1, Raciborsko 1, Dobczyce 3.

Porowatość w utworach permu–triasu dolnego zbadano w 107 próbkach z 10 otworów wiertniczych. Skały zbiorni-kowe tego kompleksu tylko wyjątkowo wykazują korzystne porowatości i przepuszczalności. Najwyższe wartości poro-watości oznaczono w stropowych odcinkach permu–triasu dolnego z następujących otworów wiertniczych: Dobczyce 2 (32%), Grabina 1 (11,31%), Rajbrot 2 (15,52%) oraz Tarna-wa 1 (15,51 %). Przepuszczalność zbadano w 48 próbkach, z czego w 36 próbkach skały określono jako nieprzepusz-czalne, w pozostałych uzyskane wartości przepuszczalności nie przekraczają 21 mD.

Należy zaznaczyć, że badania petrofizyczne prowadzono na niewielkiej populacji próbek reprezentujących zaledwie kilka procent sumarycznej długości wszystkich przewierco-nych sekwencji skał permu–triasu i kilkunastu procent całych profili jury środkowej. Doświadczenie wskazuje, że w trakcie wiercenia zwykle uzyskuje się próbki skał niespę-kanych i najbardziej zwięzłych (dotyczy to przede wszyst-kim starszych otworów wiertniczych). Można zatem przy-jąć, że dokonana charakterystyka całego kompleksu jest obarczona znacznym błędem dotyczącym zarówno wy-kształcenia litologiczno-facjalnego, jak też parametrów pe-trofizycznych skał. Analiza oparta na takim materiale gene-ralnie powoduje zaniżanie parametrów zbiornikowych ca-łego kompleksu.

Istniejące materiały dotyczące parametrów zbiorniko-wych utworów jury środkowej na analizowanym obszarze wskazują, że utwory te mogą być brane pod uwagę jako potencjalne kolektory CO₂. Należy jednak podkreślić, że ba-dania prowadzono na niewielkiej populacji próbek repre-zentujących zaledwie kilka procent sumarycznej długości wszystkich przewierconych sekwencji skał środkowo-jurajskich.

Nie ma możliwości ograniczenia składowania dwutlenku węgla jedynie do utworów jury środkowej. System sekwe-stracyjny (poza utworami jury środkowej) z pewnością obej-mie utwory węglanowe jury górnej (system szczelinowy) i przystropowe partie permu–triasu dolnego, o czym mogą świadczyć parametry petrofizyczne górnych odcinków per-mo–triasu. Spowoduje to istotny, chociaż trudny do oszaco-wania, wzrost pojemności składowania. Tak scharakteryzo-wany system sekwestracyjny pozostanie bezpieczny, gdyż występująca na całym obszarze miąższa i szczelna pokrywa iłów miocenu, w części południowej również fliszu karpac-kiego (fig. 3), skutecznie uniemożliwi przedostawanie się CO₂ na powierzchnię terenu.

W podobszarze B można wyznaczyć przynajmniej dwa obszary spełniające geologiczne kryteria dla podziemnych magazynów CO₂. Pierwszy zlokalizowany w odległości 1,5–2,0 km na południe od otworu Grabina 6, drugi – w sąsiedztwie otworu Dobczyce 2.

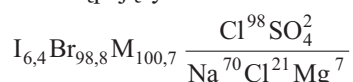
PODOBSZAR C — ZBIORNIK NIEPOŁOMICIE

Poziom magazynowy w obrębie tego zbiornika (fig. 1–3) stanowi dewońsko-dolnokarboński kompleks węglanowy, reprezentowany przez wapienie oraz dolomity, z przeławiczeniami margli, łowców, brekcji wapiennych i silikoklastyków. Kompleks węglanowy leży na ogół zgodnie na silikoklastykach dewonu dolnego, tylko niekiedy w jego podłożu znajdują się utwory starszego paleozoiku. Bezpośredni nadkład kompleksu węglanowego stanowią utwory jury lub permu. Utwory te są przykryte kilkusetmetrową serią ilastych utworów miocenu.

Strop poziomu węglanowego znajduje się na głębokości od 755,0 (Tropiszów 1) do 1673,0 m (Wyciąże 4), a jego spąg – na głębokości od 1196,4 (Puszcza 4) do 1955,0 m (Niepołomice 3). Jego miąższość zawsze przekracza 50,0 m, na ogół osiągając wartość kilkuset metrów.

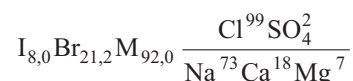
Porowatość skał tego kompleksu określona laboratoryjnie na próbkach rdzeni wiertniczych nie przekracza na ogół 5%, rzadko osiągając 10%. Rzeczywiste wartości tych parametrów można uzyskać w wyniku hydrogeologicznego opróbowania poziomu (próbne pompowania, zatłaczanie), lub interpretacji profilowań geofizyki wiertniczej.

Chemizm wód występujących w osadach poziomu zbiornikowego (dewońsko-karbońskiego poziomu węglanowego) został rozpoznany względnie dokładnie (Chowaniec i in., 2010b). Uśredniony skład chemiczny obliczony na podstawie 60 analiz jest następujący:



Na podstawie średniego składu chemicznego wody w utworach dewonu można zaliczyć do solanek jodowo-bromowych chlorkowo-sodowo-wapniowych (wg Szczukarewa). W klasyfikacji Sulina są to wody chlorkowo-wapniowe, należące do klasy Cl-Ca III według Bojarskiego (1975). Średnia wartość stosunku $\frac{rSO_4 \cdot 100}{rCl}$ wynosi 2,3, natomiast Br:Cl wynosi 0,0016. Wody w utworach dewonu występują na głębokości od 700 do 3168 m, średnio na głębokości 1717,9 m. Ich mineralizacja ogólna wynosi od 1,5 do 214,5 g/dm³.

Chemizm wód w utworach karbonu rozpoznano niezbyt licznymi wierceniami, usytuowanymi głównie w zachodniej części zapadliska. Dla synklinorium miechowskiego wykonano tylko nieliczne analizy wód z utworów karbonu. Uśredniony skład chemiczny obliczony na podstawie wyników 25 analiz chemicznych:



Na podstawie średniego składu chemicznego wody karbonu można zaliczyć do solanek jodowo-bromowych chlorkowo-sodowych. W klasyfikacji Sulina są to solanki chlorkowo-wapniowe, należące do klasy Cl-Ca II według Bojarskiego (1975). Średnia wartość $\frac{rSO_4 \cdot 100}{rCl}$ wynosi 1,35, natomiast stosunek Br:Cl jest równy 0,0004.

Mineralizacja ogólna zmienia się od 4,6 do 170,1 g/dm³.

Zbiornik Niepołomice jest ograniczony ze wszystkich stron dyslokacjami (fig. 1–3). Od zachodu zbiornik ten jest zamknięty strefą rozłamową Lubliniec–Kraków (L-K). Widoczne jest podniesienie strefy Niepołomice w stosunku do przylegającego do niej od zachodu rowu Liplasu. Wzdłuż strefy tektonicznej Lubliniec–Kraków zrzut w kierunku zachodnim w obrębie kompleksu węglanowego wynosi 700 m. Uskok ten całkowicie wygasa w stropie utworów platformowych. Od góry jest przykryty siedmusetmetrowym uszczelniającym kompleksem utworów neogenu. Na tej granicy tektonicznej możliwy jest kontakt zbiornika Niepołomice z utworami permu-triasu rowu Liplasu, również mogącego stanowić potencjalny zbiornik. Wschodnią granicę zbiornika Niepołomice stanowi zrab Puszczy. Jest to również duża dyslokacja tektoniczna o charakterze uszczelniającym. Północną granicę zbiornika Niepołomice wyznacza dyslokacja o przebiegu SW–NE. Wzdłuż tej dyslokacji utwory prekambry są zrzucone ku południowi o 1000 m. Dyslokacja ta wygasa w spągu utworów jurajskich. Wyraźnie widać, że odgrywa ona rolę uszczelniającą. Południową granicę zbiornika Niepołomice stanowi dyslokacja Sobniów–Czchów o przebiegu NWW–SEE. Dyslokacja ta nie sięga wyżej, przemieszczając jedynie utwory paleozoiku. W części podkarpackiej zbiornika, pomimo jego zdyslokowania, występują korzystne warunki uszczelniające. Składają się na to dwa elementy: po pierwsze dyslokacje nie przechodzą poza utwory paleozoiku, po drugie istnieje miąższy kompleks utworów ekranujących, składający się z utworów jury platformowej, neogenu oraz fliszu karpackiego.

W północnej części zbiornika Niepołomice dominują na powierzchni lessy i lessy piaszczyste. Centralną część zajmują utwory den dolinnych rzek Wisły i Raby. W najbardziej południowej części występują utwory fliszu karpackiego z czwartorzędowymi pokrywami lessowymi. W podłożu tych utworów występuje kilkusetmetrowej miąższości kompleks miocenijskich utworów molasowych stanowiących doskonałe uszczelnienie.

Obszar proponowanego zbiornika obejmuje 268,9 km². Wyliczona pojemność składowania CO₂ w strukturze geologicznej dla zbiornika Niepołomice wynosi 1932 Mt. Pojemność składowania CO₂ z rozpuszczania w wodzie złożowej oszacowano przy wykorzystaniu kalkulatora (*Sequestration Calculators*) umieszczonego na stronach MID-CARBON (<http://abyss.kgs.ku.edu/pls/abyss/midcarb.co2-calc.aquifer>).

W wyniku tych oszacowań otrzymano ilość rozpuszczonego CO₂ w solance równą 639 Mt. Całkowita ilość dwutlenku węgla możliwa do składowania w zbiorniku Niepołomice wynosi więc 2571 Mt.

Potencjalnymi użytkownikami zbiornika Niepołomice mogą być: Mittal Steel Poland S.A. Oddział Kraków, Elektryfikacja Kraków S.A., Elektrownia Skawina S.A.

Odległości od potencjalnych emitentów CO₂ do rejonu optymalnego odprowadzenia wahają się od 13 do 30 km. Ze względu na dobrze rozwiniętą sieć kolejową i drogową istnieje możliwość transportu skroplonego dwutlenku węgla cysternami.

PODOBSZAR D — ZBIORNIK GROBLA

Poziom magazynowy w obrębie tego zbiornika pod względem litologicznym jest wykształcony podobnie, jak w przypadku zbiornika Niepołomice. Strop poziomu węglanowego znajduje się na głębokości od 1109,5 (Grobla 28) do 2416,0 m (Strzelce Wielkie 1), a jego spąg – na głębokości od 1338,9 (Grobla 1) do 3718,0 m (Strzelce Wielkie 1). Jego miąższość zawsze przekracza 50,0 m, na ogół osiągając wartości kilkuset metrów.

Porowatość i przepuszczalność kompleksu są takie same jak w przypadku zbiornika Niepołomice.

Chemizm wód złożowych jest identyczny jak w zbiorniku Niepołomice. Zbiorniki Niepołomice i Grobla są od siebie oddzielone podniesieniem podłoża „horst Puszczy”.

Zbiornik Grobla obejmuje otwory dewońsko-karbońskie kompleksu węglanowego. Od zachodu zbiornik ten jest ograniczony zrębem Puszczy (fig. 1–3). Wyniesienie to ma charakter horstu, na którym brak utworów paleozoicznych.

Wschodnią granicę zbiornika Grobla stanowi wielka strefa dyslokacyjna Tarnów–Radłów–Dobiesławice o kierunku NW–SE. W części północno-wschodniej zbiornika jego ograniczeniem jest również zrąb Kwikowa, w obrębie którego na utworach ediakaru leżą bezpośrednio osady me-

zozoiku (jura i kreda). Dalej ku górze dyslokacja ta wygasa w spągu utworów neogenu. Miąższość utworów neogenu nad dyslokacją wynosi 525 m. Dokumentuje to otwór wiertniczy Szczurowa 11. Granica północna zbiornika Grobla przebiega wzdłuż równoleżnikowej dyslokacji łączącej północne zworniki zrębów Puszczy (na zachodzie) i Kwikowa (na wschodzie). Granica południowa zbiornika Grobla przebiega wzdłuż dyslokacji Brzesko–Wierzchosławice o kierunku zbliżonym do równoleżnikowego. Dyslokacja ta zdaje się być południowym ograniczeniem, rozumianego w szerszym niż dotychczas zakresie, zrębu Kwikowa. Południowo-wschodnie skrzydło tej dyslokacji jest zrzucone o około 350 m. Miąższość dewońsko-karbońskiego kompleksu węglanowego maleje tu do około 100 m. Centrum zbiornika jest pocięte szeregiem drugorzędnych dyslokacji o nieregularnym, chaotycznym przebiegu. Dyslokacje te zaznaczają się głównie w utworach ediakaru i paleozoiku. W obrębie utworów mezozoiku ulegają one stopniowemu wygaszeniu. Nie obserwuje się ich w stanowiących ekran utworach neogenu.

Na obszarze zbiornika Grobla dominują na powierzchni utwory den dolinnych rzek Wisły i Raby, wcinające się w pokrywy czwartorzędowych glin lodowcowych. W najbardziej południowej części występują utwory fliszu karpackiego z czwartorzędowymi pokrywami lessowymi. W podłożu tych utworów występuje kilkusetmetrowej miąższości kompleks mioceńskich utworów molasowych stanowiących doskonale uszczelnienie.

Obszar proponowanego zbiornika obejmuje 422,4 km². Pojemność składowania CO₂ w strukturze geologicznej dla zbiornika wynosi 4426 Mt. Pojemność składowania CO₂ z rozpuszczania w wodzie złożowej oszacowano na 1077 Mt. Całkowita ilość dwutlenku węgla możliwa do składowania w zbiorniku Grobla wynosi 5503 Mt.

Potencjalnymi użytkownikami zbiornika Grobla mogą być: Zakłady Azotowe w Tarnowie-Mościskach S.A. Odległość od potencjalnego emitenta CO₂ do rejonu optymalnego odprowadzenia wynosi w linii prostej około 40 km.

WNIOSKI

W wyniku przeprowadzonej analizy budowy geologicznej na obszarze obejmującym strefę Karpat zewnętrznych i zapadlisko przedkarpackie między Krakowem a Rzeszowem za potencjalne skały zbiornikowe do składowania CO₂ uznano występujące na tym obszarze: gruboklastyczne utwory kambru dolnego, węglanowe osady dewonu środkowego i górnego, karbonu dolnego, permsko-triasowe i środkowo-jurajskie piaskowce i zlepieńce. Wyróżniono cztery potencjalne podobszary predysponowane do składowania CO₂.

1. Podobszar Wadowice–Myślenice (A) o powierzchni około 850 km², w którym za potencjalny zbiornik do składowania CO₂ uznano kompleks dolnokambryjskich skał pias-

kowcowo-zlepieńcowych. Osady tego ogniwa charakteryzują się tu silnie zróżnicowaną miąższością, która wzrasta od WSW w kierunku ENE, od około 160 m do ponad 1400 m.

2. Podobszar Gdów (B) o powierzchni 765,5 km². Skałę zbiornikową stanowią tu piaskowce i zlepieńce permotriasowe i środkowej jury. Miąższości grubookruchowych i mułowcowo-piaszczystych osadów powyżej 50 m można się spodziewać w centralnej i zachodniej części paleodoliny, w pasie o szerokości od 7,9 km, idąc od południowego wschodu, do 3,5 km w części zachodniej, a miąższości zbliżonych do 100 m – w dwóch izolowanych obszarach Grabina–Liplas i Zabłocie.

3. Podobszar Niepołomice (C) o powierzchni 268,9 km², skałę zbiornikową stanowią dewońsko-dolnokarbońskie wapienie i dolomity. Strop poziomu węglanowego znajduje się na głębokości od 755,0 do 1673,0 m, a jego spąg – odpowiednio na głębokości od 1196,4 do 1955,0 m. Miąższość zawsze przekracza 50,0 m, na ogół osiągając wartość kilkuset metrów.

4. Podobszar Grobla (D) o powierzchni 422,4 km². Skałę zbiornikową stanowią dewońsko-dolnokarbońskie wapienie i dolomity. Strop poziomu węglanowego leży na głębokości

od 1109,5 do 2416,0 m, a jego spąg – odpowiednio na głębokości od 1338,9 do 3718,0 m. Jego miąższość zawsze przekracza 50,0 m, zazwyczaj osiągając wartości kilkuset metrów.

Zbiorniki Niepołomice i Grobla są od siebie oddzielone podniesieniem podłoża „horst Puszczy”.

Poziom uszczelniający dla skał zbiornikowych w wymienionych rejonach stanowią utwory miocenijskie zapadliśka przedkarpackiego, tworzące na analizowanym obszarze zwartą pokrywę oraz utwory fliszu karpackiego w południowej części obszaru.

LITERATURA

- ALEXANDROWICZ S.W., 1963 — Zarys stratygrafii miocenu okolic Krakowa. *Spraw. z Pos. Kom. Nauk Geol. PAN Oddz. w Krakowie VII–XII 1962*: 520–523.
- BOJARSKI L., 1975 — Wyniki prób złożowych i badań horyzontów perspektywicznych. Dokumentacja wynikowa otworu badawczego Głogoczów 1. Centr. Arch. Geol. PIG-PIB, Warszawa.
- BUŁA Z., 2000 — Dolny paleozoik Górnego Śląska i zachodniej Małopolski. *Pr. Państw. Inst. Geol.*, **171**: 1–63.
- BUŁA Z., 2001 — Litologia i stratygrafia utworów karbonu i dolnego permu w profilu otworu Tarnawa 1. *W: Paleozoik podłoża centralnej części Polskich Karpat Zewnętrznych rejon Liplas–Tarnawa* (red. H. Matyja). *Pr. Państw. Inst. Geol.*, **174**: 61–66.
- BUŁA Z., HABRYN R. (red.), 2008 — Atlas geologiczno-strukturalny podłoża paleozoicznego Karpat zewnętrznych i zapadliśka przedkarpackiego. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- BUŁA Z., HABRYN R., 2010 — Budowa geologiczna prekambru i paleozoiku regionu krakowskiego. *W: Mat. Konf. „Prekambry i paleozoik regionu krakowskiego”* (red. M. Jachowicz-Zdanowska, Z. Buła): 7–39. Kraków, listopad 2010. Państw. Inst. Geol. – PIB, Warszawa.
- BUŁA Z., HABRYN R., PIOTROWSKI A., 2011 — Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego składowania CO₂ wraz z ich programem monitorowania. Rejon IV – Rejon zapadliśka przedkarpackiego i brzeżnej strefy Karpat. Podregion IV A – Obszar Żywiec–Rzeszów; Podobszar A – Wadowice–Myślenice; Podobszar B – Gdów. Centr. Arch. Geol. PIG-PIB, Warszawa.
- BUŁA Z., KRIEGER W., 2004 — Charakterystyka utworów karbonu w południowej części bloku górnośląskiego. *W: Możliwości generowania węglowodorów w skałach karbonu w południowej części bloku górnośląskiego i małopolskiego* (red. M.J. Kotarba): 15–24. Wyd. TBPS „Geosfera”, Kraków.
- BUŁA Z., ŻABA J., 2008 — Struktura prekambryjskiego podłoża wschodniej części bloku górnośląskiego (Brunovistulicum). *Prz. Geol.*, **56**, 6: 473–480.
- BUŁA Z., ŻABA J., HABRYN R., 2008 — Regionalizacja tektoniczna Polski – Polska południowa (blok górnośląski i blok małopolski). *Prz. Geol.*, **56**, 10: 912–920.
- CHADWICK A., ARTS R., BERNSTONE C., MAY F., THIBEAU S., ZWEIGEL P. (red.), 2006 — Best Practice for the storage of CO₂ in saline aquifers, Observations and guidelines from the SACS and CO₂STORE projects. Raport projektu CO₂STORE. <http://www.co2storage.org>.
- CHOWANIEC J., BUŁA Z., HABRYN R., FREIWALD P., KOZIARA T., OWSIAK P., PIOTROWSKI A., RYŁKO W., SIKORA R., TOMAŚ A., TOMAŚ A., 2010a — Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego składowania CO₂ wraz z ich programem monitorowania. Rejon: IV – Rejon zapadliśka przedkarpackiego i brzeżnej strefy Karpat. Podregion IV A – Obszar Żywiec–Rzeszów; Podobszar A – Wadowice–Myślenice; Podobszar B – Gdów. Centr. Arch. Geol. PIG-PIB, Warszawa.
- CHOWANIEC J., BUŁA Z., HABRYN R., FREIWALD P., RYŁKO W., TOMAŚ A., TOMAŚ A., 2010b — Paleozoiczne piętra regionu krakowskiego jako potencjalny zbiornik CO₂ dla technologii CCS. *W: Mat. Konf. „Prekambry i paleozoik regionu krakowskiego”* (red. M. Jachowicz-Zdanowska, Z. Buła): 41–66. Kraków, listopad 2010. Państw. Inst. Geol. – PIB, Warszawa.
- CHOWANIEC J., RYŁKO W., TOMAŚ A., TOMAŚ A., 2011 — Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego składowania CO₂ wraz z ich programem monitorowania. Rejon IV – Rejon zapadliśka przedkarpackiego i brzeżnej strefy Karpat; Rejon IV A – Obszar Żywiec–Rzeszów. Określenie (aktualizacja) bilansu sekwestracijnego dla Polski – Rejon IV – Rejon zapadliśka przedkarpackiego – Obszar Żywiec–Rzeszów. Centr. Arch. Geol. PIG-PIB, Warszawa.
- GARLICKA A., 1994 — Formalne jednostki litostratygraficzne miocenu – formacja z Wieliczki. *Prz. Geol.*, **42**, 1: 26–28.
- JACHOWICZ-ZDANOWSKA M., 2011 — Palinologia kambru dolnego bloku górnośląskiego i prekambru bloku małopolskiego w regionie krakowskim. *W: Mat. Konf. „Prekambry i paleozoik regionu krakowskiego”* (red. M. Jachowicz-Zdanowska, Z. Buła): 67–92. Kraków, listopad 2010. Państw. Inst. Geol. – PIB, Warszawa.
- JAWOR E., 1970 — Wgłębna budowa geologiczna obszaru na wschód Krakowa. *Acta Geol. Pol.*, **20**, 4: 709–769.
- JAWOR E., BARAN U., 2004 — Budowa geologiczna i charakterystyka utworów karbonu w południowej części bloku małopolskiego. *W: Możliwości generowania węglowodorów w skałach karbonu w południowej części bloku górnośląskiego i małopolskiego* (red. M.J. Kotarba): 25–48. Wyd. TBPS „Geosfera”, Kraków.
- KIERSNOWSKI H., 2001 — Osady permotriasu w basenie Liplas–Tarnawa. *W: Paleozoik podłoża centralnej części polskich Karpat zewnętrznych (rejon Liplas–Tarnawa)* (red. H. Matyja). *Pr. Państw. Inst. Geol.*, **174**: 87–100.
- KOTAS A., 1972 — Osady morskie karbonu górnego i ich przejście w utwory produktywne Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. *Pr. Inst. Geol.*, **61**: 297–307.
- MORYC W., 2006a — Budowa geologiczna podłoża miocenu w rejonie Kraków–Pilzno. Cz. I. Prekambry i paleozoik (bez permu). *Nafta–Gaz*, **62**, 5: 197–216.
- MORYC W., 2006b — Budowa geologiczna podłoża miocenu w rejonie Kraków–Pilzno. Cz. II. Perm i mezozoik. *Nafta–Gaz*, **62**, 6: 263–282.

- NARKIEWICZ M., 2001 — Litostratygrafia, środowiska sedymentacji i zarys diagenety węglanów dewonu i karbonu w rejonie Rajbrotu i Tarnawy. *W: Paleozoik podłoża centralnej części polskich Karpat zewnętrznych* (red. H. Matyja). *Pr. Państw. Inst. Geol.*, **174**: 9–32.
- NARKIEWICZ M., 2005 — Seria węglanowa dewonu i karbonu w południowej części bloku górnośląskiego. *Pr. Państw. Inst. Geol.*, **177**: 5–43.
- NARKIEWICZ M., POPRAWA P., LIPIEC M., MATYJA H., MIŁACZEWSKI L., 1988 — Pozycja paleogeograficzna i tektoniczna a rozwój subsydencji dewońsko-karbońskiej obszaru pomorskiego i radomsko-lubelskiego. *Pr. Państw. Inst. Geol.*, **165**: 31–46.
- PACZEŚNA J., 2005 — Środowiska sedymentacji dolnokambryjskich osadów bloku górnośląskiego. *W: Przew. 76 Zjazdu Pol. Tow. Geol.*, Rudy k. Rybnika: 90–99. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- PACZEŚNA J., 2010 — Ichnological record of activity of Anthozoa in the early Cambrian succession of the Upper Silesian Block (southern Poland). *Acta Geol. Pol.*, **60**: 93–103.
- TOMAŚ A., TOMAŚ A., 2010 — Dewońsko-dolnokarbońskie utwory węglanowe w regionie krakowskim. *W: Mat. Konf. „Prekambr i paleozoik regionu krakowskiego”* (red. M. Jachowicz-Zdanowska, Z. Buła): 7–39. Kraków, listopad 2010. Państw. Inst. Geol. – PIB, Warszawa.
- TOMAŚ A., ZAJĄC R., 1996 — Utwory młodszego paleozoiku w podłożu polskich Karpat Zachodnich. *Prz. Geol.*, **44**, 5: 477–486.
- WÓJCICKI A., 2010 — Krajowy program „Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO₂ wraz z ich planami monitorowania”. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **439**: 9–16.
- ZAJĄC R., 1975 — Nowe dane o utworach dewonu i karbonu w rejonie Grobli. *Kwart. Geol.*, **19**, 4: 964–965.
- ZAJĄC R., 1981 — Korelacja utworów dewonu i karbonu dolnego podłoża środkowej części zapadliska przedkarpackiego. *Biul. Inst. Geol.*, **331**: 39–56.
- ZAJĄC R., 1984 — Stratygrafia i rozwój facyjny dewonu i dolnego karbonu południowej części podłoża zapadliska przedkarpackiego. *Kwart. Geol.*, **28**, 2: 291–316.
- ZAJĄC R., 1987 — Stratygrafia i rozwój facyjny dewonu i dolnego karbonu południowej części podłoża zapadliska przedkarpackiego. *Odpowiedź. Kwart. Geol.*, **31**, 4: 599–608.
- ŻELAŻNIEWICZ A., BUŁA Z., FANNING M., SEGHEDI A., ŻABA J., 2009 — More evidence on Neoproterozoic terranes in Southern Poland and southeastern Romania. *Geol. Quart.*, **58**, 1: 93–124.

SUMMARY

In this paper the possibility of carbon dioxide storage in the area covering the Outer Carpathians zone and the Carpathians Foredeep between Kraków and Rzeszów was analysed. In the first stage of the evaluation data from 235 boreholes, as well as archival and published geological maps were used for the analysis of the geological structure of this area. Moreover results of the seismic studies from this area were also used. The analysis of the geological structure revealed as a potential reservoir rocks for CO₂ storage occurring in this area macroclastic Cambrian formation, calcareous sediments of Middle and Upper Devonian, Lower Carbon, as well as Permian–Triassic and Middle Jurassic sandstones and conglomerates. Having regard generally accepted criteria for the selection of geological structures and formation for the geological storage of CO₂ four sub-areas of the reservoir rocks occurrence were distinguished (Figs. 1, 2):

Sub-area A – the Wadowice–Myślenice reservoir with a surface area about 850 km² as a potential reservoir for CO₂ storage have been selected Lower Cambrian sandstone-conglomerate rock complex. Sediments of this link are characterized by highly differentiated thickness, which increases from WSW to ENE direction, from about 160 to over 1400 m. Waters occurring in the rocks of this link belong to the zone of hydrogeological stagnancy and represent highly mineralized (138–178 g/L) iodine-bromine, sodium-chloride, or calcium-chloride brines.

Sub-area B – the Gdów reservoir with a surface area 765.5 km², were the reservoir rocks are sandstones and Permian–Triassic and Middle Jurassic conglomerates. Mudstone-sandy sediments with thickness exceeding 50 m can be expected in central and western part of a paleovalley in

the 7–9 km width belt coming from the southeast, up to 3.5 km in the west. Thickness close to 100 m can be expected in two isolated areas Grabin–Liplas and Zabłocie. Immediately on the Middle Jurassic formations laying Upper Jurassic carbonate formations forming a continuous cover throughout the area. Their thickness increases towards the northeast from 52 to 370 m.

Sub-area C – the Niepołomice reservoir with a surface area 268.9 km². Here the reservoir rocks are Devonian–Carbon carbonates and dolomites. The top of the carbonate layer is at the depths from 755.0 up to 1673.0 m, while the base is at the depths from 1196.4 to 1955.0 m, respectively. Thickness of this layer always exceeds 50 m and usually reaches several hundred meters.

The chemical properties of waters occurring in the sediments of the reservoir level (Devonian–Carbon carbonate layer) is recognised quite well. Waters in the Devonian sediments occur at the depth from 700 to 3168 m (average at 1717.9 m). Total mineralization of these waters is within the range from 1.5 to 214.5 g/L. Basing on the average chemical composition of waters, the Devonian waters might be classified as iodine-bromine and chloride-sodium-calcium brines.

Sub-area D – the Grobla reservoir. The surface of the proposed reservoir covers 422.4 km². The reservoir rock is Devonian–Lower Carbon carbonates and dolomites. Top of the carbonate layer is at the depths from 1109.5 to 2416.0 m and its base is at the depths from 1338.9 to 3718.0 m. The thickness of this layer always exceeds 50 m generally reaching several hundred meters. The chemical properties of waters are the same as in the Niepołomice reservoir.

The Niepołomice and the Grobla reservoirs are separated by an uplift of bedrock (so-called "horst Puszczy").

The sealing level for the reservoir rocks in the above-mentioned areas are Miocene formations of the Carpathian

Foredeep forming in the analysed area a compact cover with varying thickness exceeding 100 m. In the southern part of the area these formation are over thrust by the Flysch formations of the Outer Carpathians.