

## CHARAKTERYSTYKA POZIOMÓW ZBIORNIKOWYCH I USZCZELNIAJĄCYCH FORMACJI JURY I TRIASU PÓŁNOCNEGO MAZOWSZA POD KĄTEM GEOLOGICZNEGO SKŁADOWANIA CO<sub>2</sub> NA PODSTAWIE DANYCH Z GŁĘBOKICH OTWORÓW WIERTNICZYCH

### CHARACTERIZATION OF THE JURASSIC AND TRIASSIC RESERVOIRS AND SEALS FROM NORTH MAZOVIA AS A CANDIDATE SITE FOR CO<sub>2</sub>-STORAGE BASED ON DATA FROM DEEP BOREHOLES

ANNA FELDMAN-OLSZEWSKA<sup>1</sup>, TERESA ADAMCZAK-BIAŁY<sup>1</sup>, ANNA BECKER<sup>1</sup>

**Abstrakt.** Dane geologiczne i geofizyczne dotyczące osadów jury i triasu z 53 otworów wiertniczych rejonu północnego Mazowsza zostały przeanalizowane w kontekście możliwości bezpiecznego składowania CO<sub>2</sub> w głębokich poziomach wodonośnych. Najbardziej perspektywiczne zarówno ze względu na właściwości petrofizyczne, rozkład miąższości, jak i wykształcenie facjalne są osady najniższego odcinka jury środkowej (aalen dolny) oraz jury dolnej (formacje: borucicka, drzewicka, ostrowiecka, olsztyńska i dolny odcinek formacji zagajskiej). Spośród przeanalizowanych poziomów triasowych, piaskowce poziomu piaskowca trzciniowego wykazują porowatości spełniające kryteria dla składowania CO<sub>2</sub>, przy często zbyt niskich przepuszczalnościach. Poziomy uszczelniające dla zbiorników jurajskich stanowią odpowiednio utwory iłowcowo-mułowcowe profili: środkowego odcinka bajosu górnego, aalenu górnego, formacji ciechocińskiej oraz górnego odcinka formacji zagajskiej. Nie wszędzie w równym stopniu spełniają one wymagane kryteria miąższościowe, facjalne i petrofizyczne. Na całym obszarze osady triasu górnego (warstwy nidzickie oraz częściowo warstwy bartoszyckie) tworzą iłowcowo-mułowcowy poziom o dobrych parametrach uszczelniających i miąższości powyżej 100 m.

**Słowa kluczowe:** kryteria bezpiecznego geologicznego składowania CO<sub>2</sub>, poziomy zbiornikowe, poziomy uszczelniające, parametry petrofizyczne.

**Abstract.** Jurassic and Triassic sediments encountered in 53 deep wells from northern Mazovia were interpreted geologically and geophysically in terms of CO<sub>2</sub> storage potential. Reservoir horizons with the most favourable petrophysical properties, thickness patterns and facies were detected within the Middle Jurassic (Lower Aalenian) and Lower Jurassic (Borucice Fm., Drzewica Fm., Ostrowiec Fm., Olsztyn Fm. and lower part of the Zagaje Fm.). The Upper Triassic Schilfsandstein sandstone horizon has been characterized by porosities meeting the CO<sub>2</sub> storage criteria. The permeability however is too low in most cases. The thickness, facial and petrophysical criteria of the Jurassic sealing horizons of the middle part of the Upper Bajocian, Upper Aalenian, Ciechocinek Fm. and of the upper part of the Zagaje Fm. are not equally adequate throughout the area. The Upper Triassic Nidzica beds and partially Bartoszyce beds form a sealing horizon of good petrophysical properties and exceeding 100 m in thickness across the whole study area.

**Key words:** CO<sub>2</sub> storage criteria, reservoirs, seals, petrophysical parameters.

<sup>1</sup> Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa; e-mail: anna.feldman-olszewska@pgi.gov.pl, teresa.adamczak@pgi.gov.pl, anna.becker@pgi.gov.pl

## WSTĘP

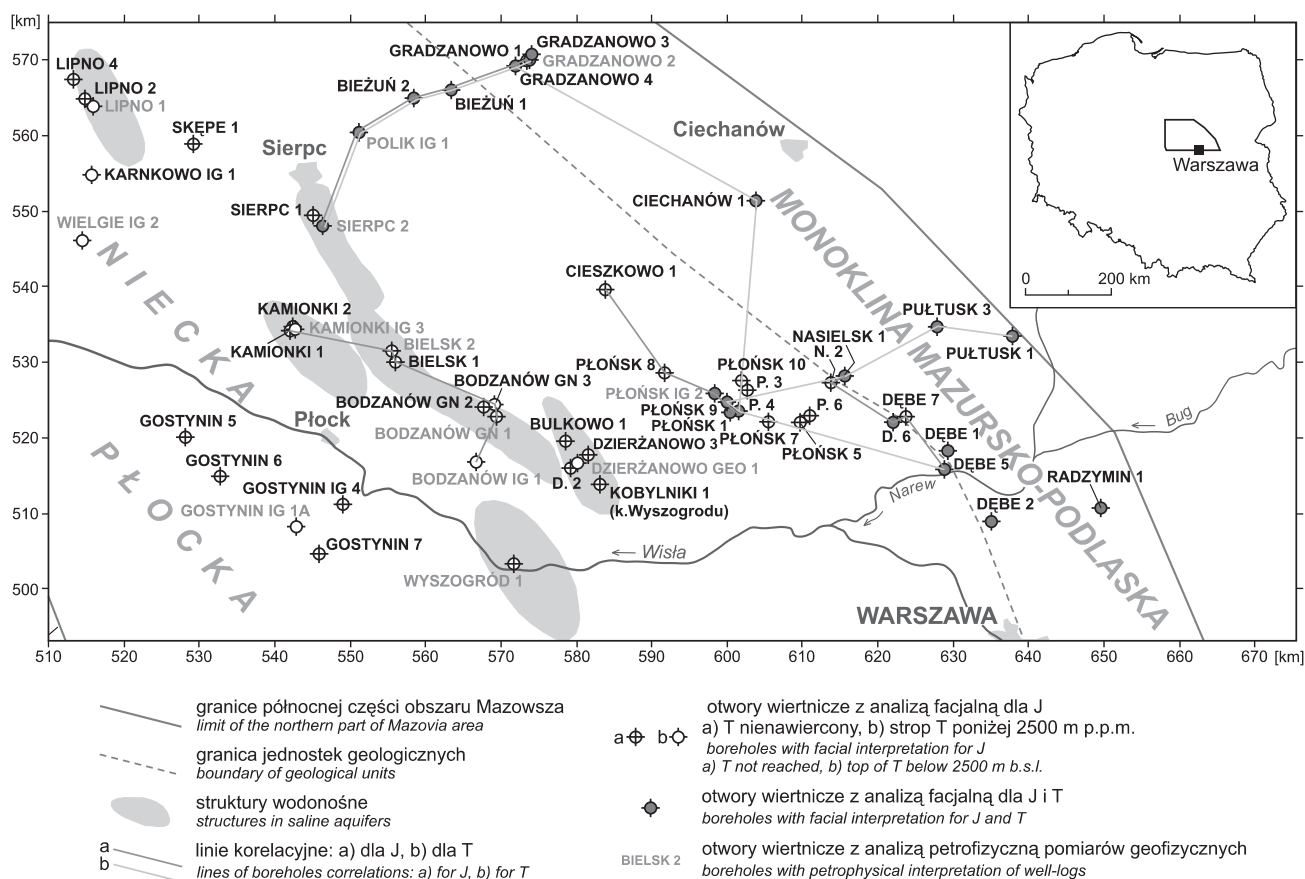
Trzeci etap badań w ramach programu „Rozpoznanie formacji i struktur do bezpiecznego geologicznego składowania CO<sub>2</sub> wraz z ich programem monitorowania”, uruchomionego przez Ministerstwo Środowiska, objął rejon Mazowsza. Wytypowany obszar jest rozpoznany ponad 100 głębokimi otworami wiertniczymi, choć nie są one na nim równomiernie rozmieszczone. Celem badań nad możliwością składowania CO<sub>2</sub> w strukturach geologicznych w tym rejonie były osady jury i triasu, a w najbardziej południowej części regionu również karbonu. W niniejszym artykule skoncentrowano się na obszarze północnego Mazowsza, dla którego perspektywiczne są zarówno utwory jury, jak i triasu.

Dla potrzeb projektu przeanalizowano 96 profili głębokich otworów wiertniczych z obszaru całego Mazowsza, z czego 53 w jego północnej części (fig. 1). We wszystkich nawiercono lub przewiercono utwory jury środkowej i dolnej, przy czym w 43 przewiercono przynajmniej jeden potencjalny poziom zbiornikowy i dla tych wierceń wykonano szczegółową analizę; 26 z tych otworów sięgnęło triasu lub

utworów starszych. W siedmiu profilach, zlokalizowanych w zachodniej części obszaru, strop triasu położony jest poniżej głębokości 2500 m, uznanej za głębokość graniczną możliwości składowania CO<sub>2</sub> w głębokich poziomach wodonośnych. Profile tych wierceń nie były analizowane pod kątem występowania potencjalnych poziomów zbiornikowych i uszczelniających w utworach triasu.

W celu geologicznego rozpoznania formacji i struktur odpowiednich do geologicznego składowania CO<sub>2</sub> przeanalizowano materiały archiwalne, krzywe profilowań geofizycznych oraz wykonano powtórne profilowanie zachowanych rdzeni wiertniczych. Pobrano również próby do badań petrofizycznych obejmujących pełne spektrum analiz porowatości i przepuszczalności. Badania te zostały zrealizowane przez zespół z Instytutu Nafty i Gazu w Krakowie pod kierunkiem G. Leśniaka.

Dla stworzenia obrazu rozkładu parametrów petrofizycznych w profilach otworów, wykonano interpretację dostępnych profilowań geofizyki wiertniczej. Po przeanalizowaniu



**Fig. 1. Lokalizacja otworów opracowanych z obszaru północnego Mazowsza**

Struktury wodonośne wg IGSMiE, jednostki geologiczne wg Dadleza i Marka (1983b) oraz Narkiewicza i Dadleza (2008)

Locality of the boreholes interpreted from the northern part of the Mazovia

Structures in saline aquifers after IGSMiE, geological units after Dadlez and Marek (1983b) and Narkiewicz and Dadlez (2008)

jakości i zakresu dostępnych danych, do analiz wybrano krzywe z 26 głębokich otworów wiertniczych z całego rejonu Mazowsza. Siedem z nich zlokalizowanych jest w jego północnej części, w obrębie linii korelacyjnych skonstruowanych dla jury i triasu. Są to: Bielsk 2, Bodzanów GN 1, Bodzanów IG 1, Gradzanowo 2, Płońsk IG 2, Polik IG 1 i Sierpc 2.

Podobnie jak przy poprzednich etapach programu, dla scharakteryzowania potencjału rejonu Mazowsza dla bezpiecznego składowania CO<sub>2</sub>, zastosowano poniższe kryteria zaproponowane przez Chadwicka i in. (2006):

- **poziom zbiornikowy** – kompleks piaskowcowy, o minimalnej miąższości 30 m, przykryty bezpośrednio przez poziom uszczelniający;
- **poziom uszczelniający** – kompleks iłowcowy lub iłowcowo-mułowcowy, o minimalnej miąższości 50 m, przykrywający bezpośrednio poziom kolektorski;
- przedział głębokościowy występowania poziomów zbiornikowych – 800–2500 m;
- porowatości piaskowców poziomów zbiornikowych – >10%;
- przepuszczalności utworów poziomów zbiornikowych – >100 mD;
- mineralizacja wód – >10 g/dm<sup>3</sup> (w niniejszym artykule kryterium nie było analizowane).

## ZARYS GEOLOGII OBSZARU

Obszar północnego Mazowsza w większości leży w obrębie jednostki strukturalnej zwanej niecką płocką, jedynie najbardziej wschodni i północno-wschodni jego kraniec należy do obszaru monokliny mazursko-podlaskiej (fig. 1). Rejony te w okresie jurajskim podlegały nieco odmiennej ewolucji, co wiąże się z obserwowanymi różnicami miąższości i facji. Obszar należący do monokliny mazursko-podlaskiej charakteryzuje się monoklinalnym zapadaniem się utworów jury środkowej i dolnej w kierunku południowo-zachodnim, czyli osi basenu. Jednocześnie w tym samym kierunku następuje wzrost miąższości osadów oraz procentowego udziału skał drobnoziarnistych w profilu. Na obszarze niecki płockiej, na trend obserwowany w północno-wschodniej części opisywanego obszaru nakłada się bardziej złożona ewolucja tektoniczna, której efektem jest obecność antyklinalnych struktur Lipna, Kamionek i Bodzanowa oraz rowów tektonicznych rejonu Płońsk. Strefy te wykazywały aktywność w dolnej i środkowej jurze (Dadlez, Marek, 1983a).

Konsekwencją odmiennej ewolucji jest różny podział litostratygraficzny obu wspomnianych rejonów. Charakterystykę litologiczno-stratygraficzną jury środkowej i dolnej

z rejonu niecki płockiej zawierają prace Ryll (1983) i Franczyk (1983). W prezentowanym artykule zastosowano nowy podział litostratygraficzny jury dolnej wprowadzony dla obszaru Niżu Polskiego przez Pieńkowskiego (2004).

Rejon północnego Mazowsza w triasie leżał na pograniczu tarasu o niewielkiej subsydencji na wschodzie oraz strefy bruzd o podwyższonej subsydencji na zachodzie (Szyperko-Teller i in., 1997; Gajewska i in., 1997a, b). Granica między oboma obszarami przebiega z NW na SE. Trias w tym rejonie położony jest na głębokości od 1600 do 4000 m p.p.m. Warstwy zapadają generalnie ze wschodu na zachód. W tym samym kierunku wzrasta również miąższość triasu, która w tym rejonie zawiera się w granicach od 450 do 1300 m. Wykształcenie triasu jest charakterystyczne dla strefy niezbyt odległej od wschodniego brzegu basenu (Szyperko-Teller i in., 1997; Gajewska i in., 1997a, b). Przez część późnego triasu omawiany obszar częściowo lub w całości pozbawiony był sedymentacji (Gajewska i in., 1997b). W niniejszej pracy oparto się na uaktualnionej stratygrafii triasu opracowanej przez Szyperko-Teller, Gajewską oraz Franczyk (1983).

## METODYKA

### ANALIZA ZMIENNOŚCI FACJALNEJ

W celu prześledzenia zmienności facjalnej, w pierwszym etapie przeprowadzono analizę jakościową dostępnych archiwalnych pomiarów geofizyki otworowej, głównie profilowania gamma, neutron-gamma, potencjałów samoistnych i oporności. Wyniki tej analizy posłużyły do zlokalizowania potencjalnych poziomów zbiornikowych i uszczelniających, spełniających przyjęte kryteria litologiczne i miąższościowe. Dodatkowych informacji dostarczyła analiza zachowanego materiału rdzeniowego, archiwalne opisy rdzeni pobranych

z wytypowanych poziomów, a także archiwalne ekspertyzy biostratygraficzne.

W drugim etapie, w celu przeanalizowania lateralnej ciągłości poszczególnych poziomów, skonstruowano dla obszaru północnego Mazowsza 8 linii korelacyjnych dla jury, z czego 4 zamieszczono w niniejszym artykule (fig. 2–5). Dla triasu skonstruowano 3 linie korelacyjne (fig. 6–8). Jedna linia jurajska oraz dwie triasowe zostały poprowadzone w kierunku SW–NE, czyli prostopadle do osi regionalnych jednostek tektonicznych. Dwie korelacje jurajskie zostały tak skonstruowane, by pokazać zmienność osadów w obrę-

bie antyklin Kamionek i Bodzanowa oraz strefy rowowej Płońska. Ponadto jedna linia jurajska i jedna triasowa przebiegają w kierunku NW–SE, czyli równoległe do osi jednostek.

### ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI PETROFIZYCZNYCH OKREŚLONYCH NA PODSTAWIE OTWOROWYCH POMIARÓW GEOFIZYCZNYCH

Regionalna ocena zdolności formacji jury środkowej, dolnej i triasu dla zatłaczania CO<sub>2</sub>, wymagała uzyskania informacji na temat właściwości petrofizycznych tych formacji, a także utworów stanowiących ich uszczelnienie. Nie wielki zakres rdzeniowania w większości wierceń, uniemożliwia oparcie ocen parametrów zbiornikowych wyłącznie na analizach laboratoryjnych prób skalnych. Z tego względu, obraz właściwości petrofizycznych osadów jury i triasu dla zdefiniowanych poziomów zbiornikowych i uszczelniających oparto na rezultatach interpretacji pomiarów geofizyki wiertniczej. Dane laboratoryjne wykorzystano do kalibracji danych karotażowych oraz do oceny poprawności uzyskiwanych wyników interpretacji profilowań geofizyki otworowej.

Badania geofizyczne w opracowanych otworach to archiwalne pomiary (często analogowe) zrealizowane w latach 1963–1995. Asortyment badań archiwalnych oraz ich jakość odbiegają od obecnego standardu jakości pomiarów geofizycznych. Posiadane dane pomiarowe to przede wszystkim

tw. krzywe połączone (ang. *composite logs*) utworzone w formacie LAS dla całego profilu badanego otworu. Stanowiły one materiał wyjściowy do zrealizowanych prac.

W ramach interpretacji pomiarów geofizyki wiertniczej opracowano: profile litologiczne z wydzieleniem warstw wodonośnych (potencjalne zbiorniki) oraz nieprzepuszczalnych (potencjalne uszczelnienia), profile zailenia, profile porowatości całkowitej i efektywnej. Przy określeniach litologii ograniczono wydzielane typy litologiczne do podstawowych, tj. piaskowców, wapieni, dolomitów, anhydrytów, margli, iłowców oraz mułowców.

Porowatość skał obliczono, wykorzystując formuły interpretacyjne wiążące porowatość neutronową skał z ich porowatością całkowitą (Szewczyk, 1998). W odniesieniu do piaskowców została określona w sposób pośredni również przepuszczalność, poprzez korelację statystyczną z porowatością całkowitą. Poprawkę na zailenie obliczono empirycznie przy wykorzystaniu poziomu naturalnego promieniowania gamma jako ilościowej miary zailenia (stosowano zależność liniową między tymi parametrami).

Metodyka interpretacji profilowań geofizycznych i danych geologicznych została szczegółowo omówiona (wraz z literaturą źródłową) przez Feldman-Olszewską i in. (2010).

Wyniki interpretacji profilowań geofizycznych, pod kątem rozkładu parametrów petrofizycznych, uzupełnione informacjami o porowatościach skał, pochodzącymi z archiwalnych badań na próbkach rdzeni oraz z badań porozymetrycznych zrealizowanych dla potrzeb tematu sekwestracyjnego w 2010 roku, przedstawiono na [figurach 9–11](#).

## CHARAKTERYSTYKA POZIOMÓW KOLEKTORSKICH I USZCZELNIAJĄCYCH

### ZMIENNOŚĆ FACJALNA

Poziomy kolektorskie zostały scharakteryzowane od najwyższych do najniższych wraz z charakterystyką przykrywających je kompleksów uszczelniających.

#### Jura

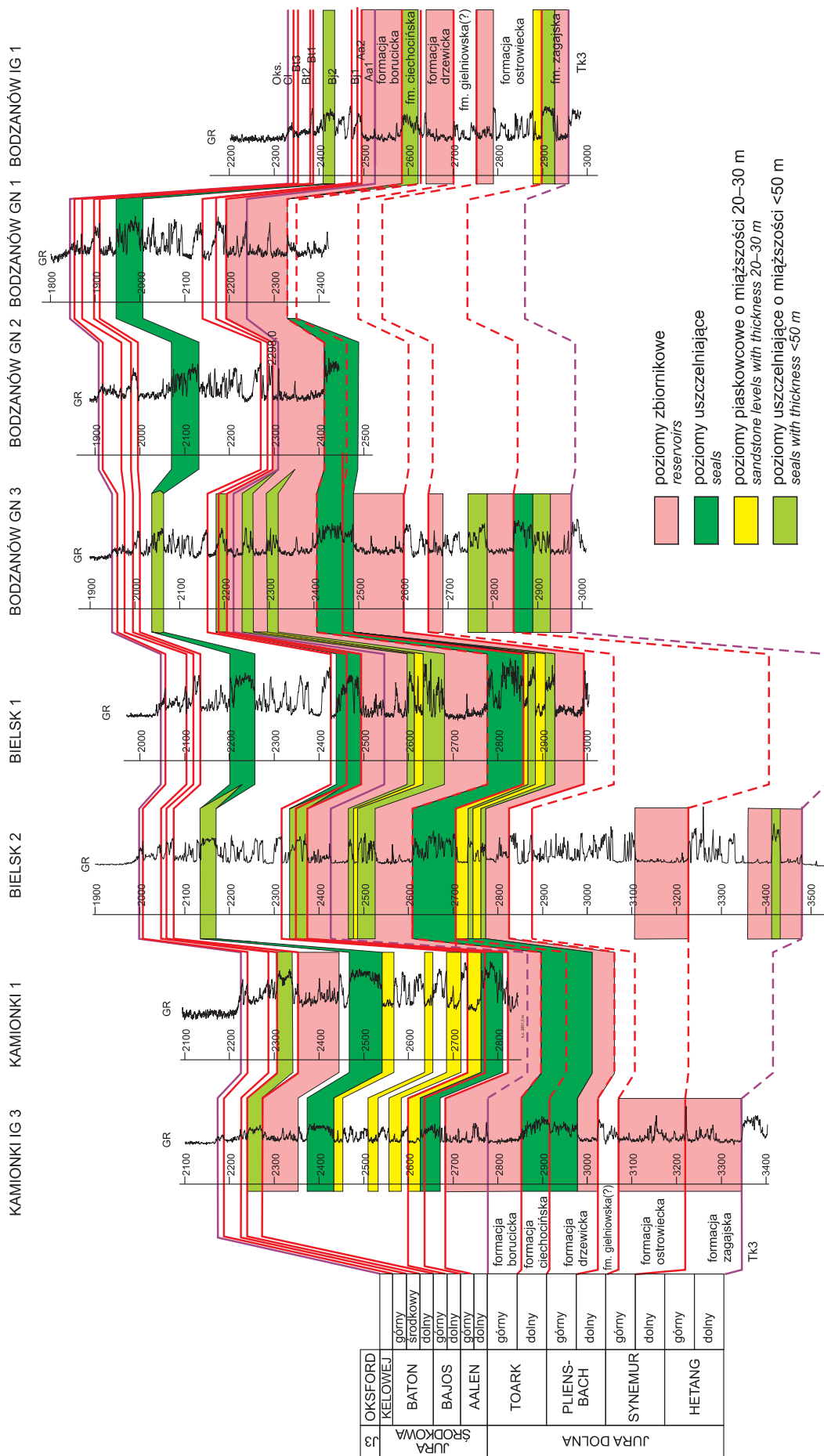
Ze względu na właściwości kolektorskie utworów jurajskich, obszar północnego Mazowsza należy podzielić na dwa rejony: południowo-zachodni wchodzący w obręb niecki płockiej oraz skrajnie północno-wschodni, włączany do monokliny mazursko-podlaskiej. Oba rejony charakteryzuje nieco odmienny profil jury środkowej i dolnej.

Najwyższy poziom zbiornikowy występuje jedynie w rejonie Kamionek, Bielska i Bodzanowa ([fig. 2](#)). Zbudowany jest on z dwóch połączonych kompleksów piaskowcowych położonych w profilu w bezpośrednim następstwie: aalenu dolnego (jura środkowa) oraz formacji borucickiej (toark górny – jura dolna). Miąższość takiego połączonego poziomu na obszarze poduszki Kamionek wynosi 171,0 m (z 14,5-metrową wkładką utworów drobnoziarnistych w ob-

rzebie aalenu dolnego), 90,0–201,5 m w obrębie poduszki Bodzanowa oraz 235,5–282,0 m (z 50,0–85,0-metrowym kompleksem skał mułowcowych i heterolitów w obrębie formacji borucickiej) w obniżeniu Bielska.

Aalen dolny charakteryzują nieliczne rdzenie z otworów Bodzanów GN 1, GN 2, Bielsk 1, 2 i Kamionki IG 3, z których zachowane w magazynach są jedynie rdzenie z dwóch ostatnich otworów. Są to piaskowce bardzo drobnoziarniste, o spoiwie ilastym, masywne, jasnoszare, z rozproszoną uwęgloną materią organiczną, czasami dolomityczne. Spotyka się wkładki piaskowców gruboziarnistych, o warstwowaniu przekątnym rynnowym oraz wkładki mułowców ciemnoszarych z rizoidami lub uwęglonymi szczątkami roślin. Materiał rdzeniowy wskazuje na fluwialną genezę tych osadów, jednak jest on bardzo fragmentaryczny i nie można wykluczyć, że w obrębie tego kompleksu występują wkładki pochodzenia morskiego. Sugeruje to płytkomorskie/estuarnie wykształcenie piaskowców aalenu dolnego w położonym w kierunku SW rejonie poduszki Wojszyc (Feldman-Olszewska, 2005 i w druku).

Formację borucicką w rejonie Kamionki–Bielsk–Bodzanów tworzą: (1) piaskowce drobnoziarniste, jasnoszare czę-



**Fig. 2. Korelacja poziomów zbiornikowych i uszczelniających jury między Kamionkami i Bodzanowem**

Cl – kelowej, Bt3 – baton górný, Bt2 – baton środkowy, Bt1 – baton dolny, Bt2 – aalen górný, Aa1 – aalen dolny, Aa2 – bajos górný, Bt1 – bajos dolny, Bt2 – baton dolny, Bt3 – baton górný; GR – profilowanie gamma; wszystkie głębokości w metrach

Jurassic reservoir and seal horizons correlation between Kamionki and Bodzanów

Cl – Callovian, Bt3 – Upper Bathonian, Bt2 – Middle Bathonian, Bt1 – Lower Bathonian, Bt2 – Upper Bathonian, Aa1 – Lower Aalenian, Aa2 – Upper Aalenian; GR – gamma ray log; all depths in meters

sto prawie białe, masywne lub ze smugami ilastymi albo węglistymi, z rozproszoną uwęgloną materią organiczną lub soczewkami węgla, oraz (2) piaskowce średnio- i gruboziarniste, o warstwowaniu przekątnym rynnowym. Miejscami występują wkładki mułowców, często węglistych. Są to twory pochodzenia fluwialnego.

Omówiony poziom zbiornikowy uszczelniony jest od góry przez osady drobnoziarniste aalenu górnego i prawdopodobnie najniższego odcinka bajosu dolnego. Poziom ten w zadawalającej miąższości występuje jedynie na obszarze poduszki Kamionek (45,0–52,0 m) oraz w rejonie Bielska (40,0–59,0 m). W obrębie poduszki Bodzanowa maleje on do 12,0–25,0 m. Tworzą go iłowce, łupki ilaste i mułowce masywne pochodzenia morskiego.

Na obszarze Bielsk–Bodzanów, powyżej opisanego poziomu uszczelniającego, występuje jeszcze jeden poziom, który tworzą łupki i mułowce ilaste środkowego odcinka bajosu górnego. Są to iłowce masywne o warstwowaniu albo laminacji soczewkowej, miejscami zbioturbowane, z *Planolites* isp., *Chondrites* isp. i *Teichichnus* isp. Miąższość tego poziomu zmienia się od 25 do 60 m.

Formacja borucicka na pozostałym obszarze północnego Mazowsza ma równie dobre parametry zbiornikowe. Jej miąższość wynosi 32,0–57,0 m. Niestety w rejonie tym formacja borucicka nie ma uszczelnienia o odpowiedniej miąższości; zazwyczaj nie przekracza ono kilku metrów, jest słabej jakości lub brak go w ogóle.

Drugi poziom zbiornikowy stwierdzono w obrębie formacji drzewickiej (plienbach górny – jura dolna), wydzielanej w zachodniej części omawianego obszaru. W rejonie Kamionek oraz Bielska kolektor stanowi jedynie dolny oraz środkowy odcinek formacji, natomiast na obszarze poduszki Bodzanowa obejmuje on prawie całą formację, bez jej najwyższego fragmentu. Miąższość poziomu piaskowcowego, stanowiącego potencjalny poziom zbiornikowy, wynosi od 45,0 (Kamionki IG 3) do 112,0 m (Bodzanów GN 1). W rejonie Sierpc–Polik–Gradzanowo ma on wartości rzędu 50,0–110,0 m (fig. 3). W zachowanym materiale rdzeniowym z otworów Bodzanów GN 1, GN 3, IG 1, Bielsk 2 i Polik IG 1 stwierdzono obecność: (1) piaskowców drobno- i średnioziarnistych lub średnio- i gruboziarnistych, jasnoszarych, często prawie białych, masywnych, z okrucami węgla oraz (2) piaskowców drobno- i bardzo drobnoziarnistych, masywnych lub o warstwowaniu przekątnym, konwolucyjnym, lub z bardzo licznymi klastami iłowca (niestateczne warstwowanie półsztywnie) oraz 15-centymetrową wkładką węgla (Polik IG 1), a także uwęgloną sieczką roślinną i muskowitem. Cechy te wskazują na fluwialną genezę opisywanego poziomu zbiornikowego.

Poniżej występuje kolejny poziom zbiornikowy, który tworzą piaskowce formacji ostrowieckiej, przy czym w różnych rejonach jej występowania, jako kolektor można wydzielić całą formację (rejon Kamionki–Sierpc–Polik–Biezuń–Gradzanowo), bądź jej część dolną (rejon Bielska) lub górną i dolną (poduszka Bodzanowa) (fig. 2, 3). Miąższość poziomu piaskowcowego wynosi odpowiednio 150,0–80,0 (w rejonie Gradzanowa w części środkowej występuje

5–12-metrowe przewarstwienie skał drobnoziarnistych), 120,0 oraz 22,0–39,5 (górze) i 21,0–59,0 m (dół). Nieliczne zachowane rdzenie z rejonu Kamionki–Bielsk–Bodzanów–Polik wskazują, że poziomy te tworzą piaskowce bardzo drobno- i drobnoziarniste oraz średnio- i gruboziarniste, masywne, o warstwowaniu przekątnym rynnowym lub ze smugami węglistymi, czasem z sieczką roślinną lub kaolinitem w porach. Cechy te wskazują, że odcinki formacji ostrowieckiej uznane za poziomy zbiornikowe mają fluwialną genezę.

W stropie formacji ostrowieckiej występuje formacja gielniowska zbudowana z iłowców, mułowców, heterolitów i podrzędnie piaskowców. Zarówno jej wykształcenie litologiczne, jak i miąższość wskazują, że nie może ona stanowić samodzielnego uszczelnienia dla występującego niżej kolektora. Może tylko tworzyć barierę spowalniającą przeciekanie dwutlenku węgla ku górze, w wyższe poziomy zbiornikowe.

Odpowiednikiem wiekowym formacji drzewickiej, gielniowskiej i ostrowieckiej jest formacja olsztyńska wydzielana na obszarze północno-wschodniego Mazowsza (oraz całego obszaru monokliny mazursko-podlaskiej). Większość tej formacji budują piaskowce, stanowiące dobry poziom zbiornikowy (fig. 4, 5). Miejscami notowane są nieciągłe, kilkumetrowe wkładki skał drobnoziarnistych. Ponadto w rejonie Nasielsk–Dębe–Płońsk, w przystropowych partiach formacji, występują mułowce i heterolity, o miąższości do kilkunastu metrów. Miąższość kolektora w obrębie formacji olsztyńskiej wynosi od 33,0 w najbardziej wschodniej części obszaru do 122,0 m w rejonie Płońska.

Poziomem uszczelniającym dla wszystkich trzech kolektorów omówionych powyżej (formacji drzewickiej, ostrowieckiej i olsztyńskiej) jest występująca na całym analizowanym obszarze formacja ciechocińska, często wraz z najwyższym odcinkiem formacji drzewickiej lub olsztyńskiej. Miąższość uszczelnienia zmienia się od 42,0 do 96,0 m. Jedynie w otworze Gradzanowo 3 (fig. 3) i Bodzanów GN 1 (fig. 2) spada ona do 20 m, a w najbardziej wschodniej części obszaru (Pułtusk) osiąga wartości około 30 m. Znaczny odcinek formacji ciechocińskiej wykształcony jest w postaci iłowców i mułowców ilastych, masywnych, barwy szarozielonej, rozsypujących się listeczkowo, z fragmentami uwęglonej flory. Występują w nich wkładki mułowców o laminacji soczewkowej oraz heterolitów o warstwowaniu falistym, a także piaskowców bardzo drobno- i drobnoziarnistych, o warstwowaniu smużystym, zmarszczkowym lub przekątnym rynnowym. Są to osady powstałe w rozległej zatoce brakicznej (Pieńkowski, 2004).

Najniższym jurajskim poziomem zbiornikowym jest dolny odcinek formacji zagajskiej. Poziom ten występuje na całym omawianym obszarze, przy czym odpowiednią grubość osiąga wszędzie poza najbardziej północną (rejon Polik–Gradzanowo) (fig. 3) i wschodnią (rejon Dębe–Radzymin) (fig. 5) częścią Mazowsza, gdzie spada ona do kilku metrów. Na pozostałym obszarze miąższość kolektora w obrębie formacji zagajskiej wynosi 29,0–152,0 m. Nieliczne rdzenie uzyskane z tego poziomu wskazują, że są to: (1) piaskowce drobno- i bardzo drobnoziarniste, jasnoszare prawie

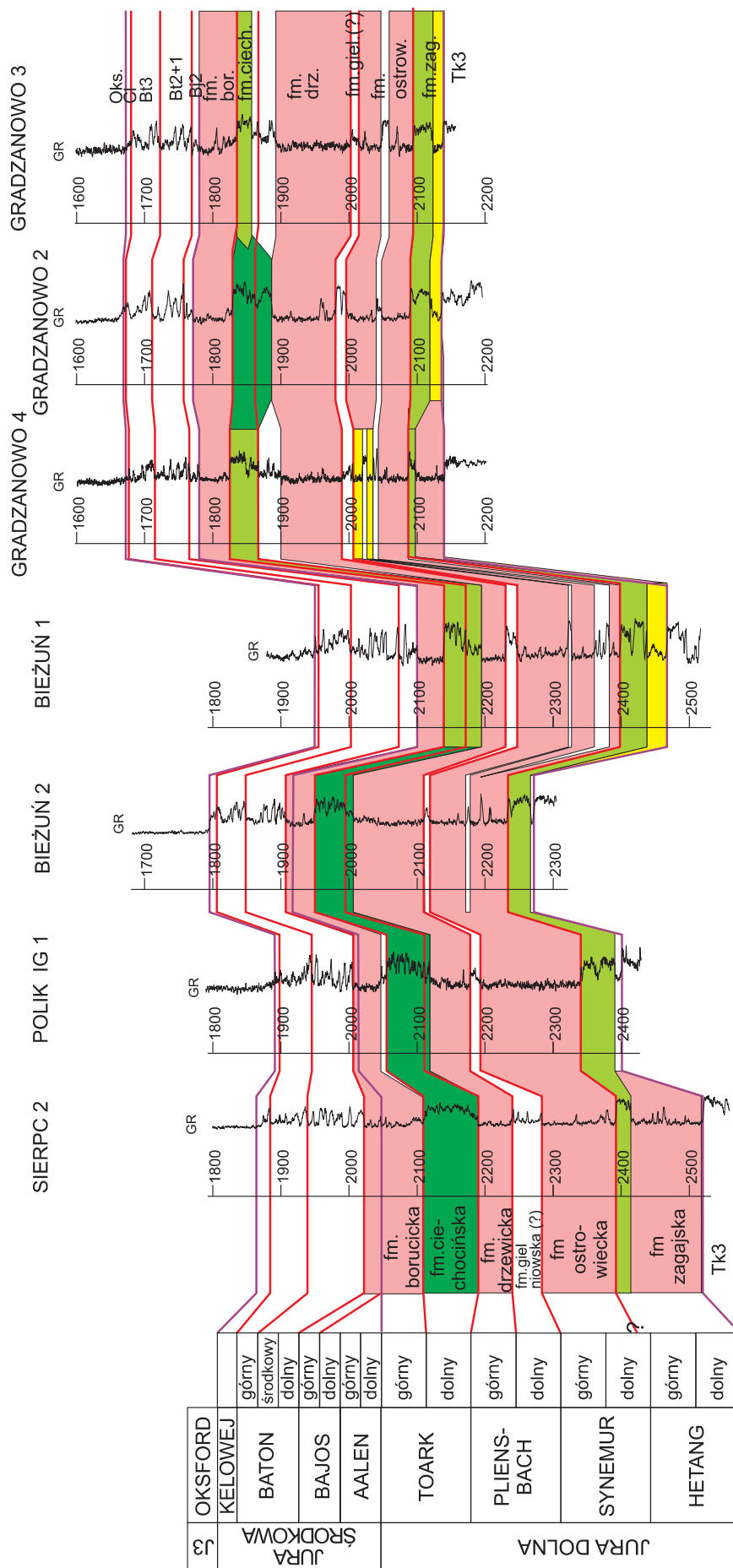
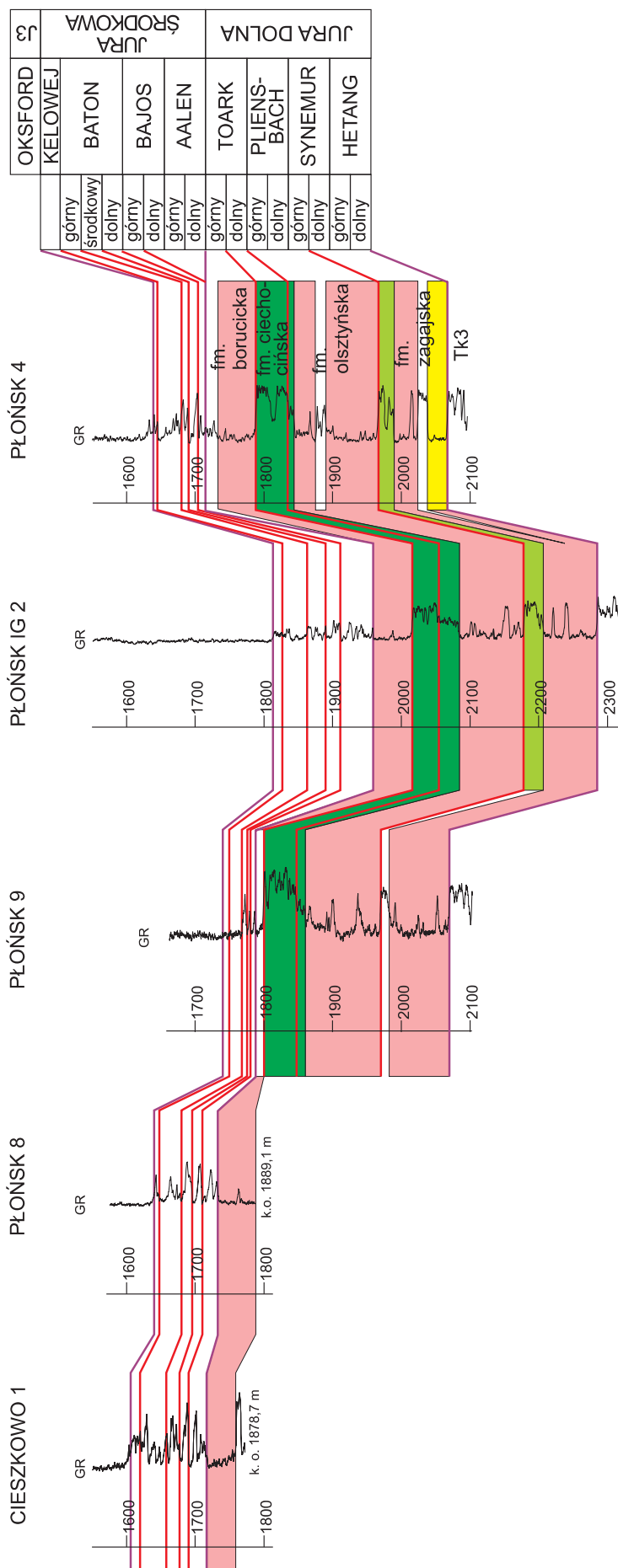


Fig. 3. Korelacja poziomów zbiornikowych i uszczelniających jury między Sierpcem i Gradzanowem

Objaśnienia jak na Fig. 2

Jurassic reservoir and seal horizons correlation between Sierpc and Gradzanowo

Explanations as on Fig. 2



**Fig. 4. Korelacja poziomów zbiornikowych i uszczelniających jury między Cieszkowem i Płońskiem**

Objaśnienia jak na [fig. 2](#)

Jurassic reservoir and seal horizons correlation between Cieszkowo and Płońsk

Explanations as on [Fig. 2](#)



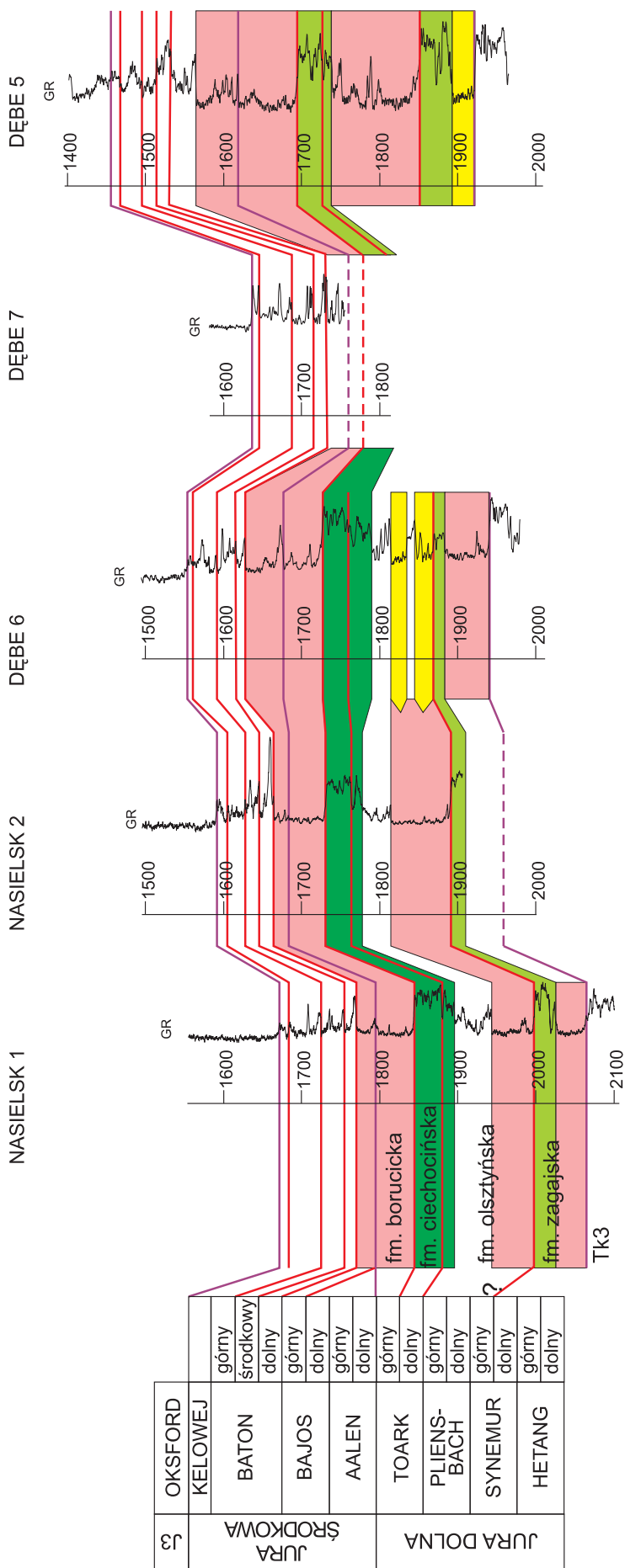


Fig. 5. Korelacja poziomów zbiornikowych i uszczelniających jury między Nasielskiem i Dębem

Objaśnienia jak na fig. 2

Jurassic reservoir and seal horizons correlation between Nasielsk and Dębe

Explanations as on Fig. 2

białe, o warstwowaniu smużystym, zmarszczkowym lub masywnym oraz (2) piaskowce średnio- i gruboziarniste jasnoszare, o warstwowaniu przekątnym rynnowym, ze smugami ilastymi i węglistymi lub masywnie, niekiedy z klastami ilastymi. Są to utwory powstałe w środowisku rzeczonym. Należy przy tym dodać, że w rejonie Kamionki–Bielsk–Bodzanów kolektor ten występuje na znacznej głębokości (poduszka Bodzanowa poniżej 2500 m, rejon Kamionki–Bielsk poniżej 3000 m).

Uszczelnieniem dla tego kolektora jest górny odcinek formacji zagajskiej (hetang–synemur dolny). Jest on zbudowany z: mułowców i iłowców masywnych, ciemnoszarych, z uwęgloną florą; heterolitów o warstwowaniu falistym oraz wkładek piaskowców o warstwowaniu zmarszczkowym. Są to osady jeziorno-bagienne oraz równi zalewowych. Tylko w przypadku poduszki Bodzanowa (fig. 2) poziom ten może być traktowany jako samodzielny poziom uszczelniający, w innych miejscach jego miąższość nie przekracza 30,0 m (fig. 3–5).

### Trias

Najwyższy regionalny poziom zbiornikowy triasu tworzą utwory piaskowca trzciniowego (Tk2b, trias górny). Poziom ten zbudowany jest z piaskowców średnioziarnistych, dobrze wysortowanych, szarych, średnio scementowanych, warstwowanych przekątnie lub masywnych, miejscami z sieżką roślinną, drobnymi ziarnami łyszczaków, nielicznymi otoczkami ilastymi. Są to utwory pochodzenia rzeczowego (Gajewska i in., 1997b). Wykształcenie i obraz geofizyczny sugerują dobre właściwości kolektorskie. Największą miąższość, sięgającą 40 m, poziom ten osiąga w rejonie Płońska i Nasielska (fig. 7). W rejonie Gradzanowa miąższość ta nie przekracza 30 m (fig. 6), zaś w okolicach Pułtusa 3 i Polika spada poniżej 30 m (fig. 6, 7). W rejonie Sierpca, Bieżunia i Pułtusa 1, w poziomie Tk2b, dominują utwory mułowcowo-ilaste, co powoduje, iż poziom ten został zaliczony do kompleksu uszczelniającego (fig. 6, 7). W profilach otworów wiertniczych Polik IG 1 i Sierpc 2 Tk2b zalega poniżej 2500 m (fig. 6).

Poziom piaskowcowy Tk2b jest na całym obszarze przykryty bezpośrednio poziomem uszczelniającym kajpru środkowego (warstwy nidzickie, Tk2d, trias górny), a w północnej i południowej części również kajpru górnego (warstwy bartoszyckie, Tk3, trias górny), wykształconych jako iłowce i mułowce z cienkimi wkładkami piaskowców dolomitycznych (fig. 6–8). W rejonie Płońska i Nasielska wkładka piaskowcowa rozdziela kompleks uszczelniający na dwa segmenty (fig. 7). Na całym obszarze uszczelnienie osiąga miąższość powyżej 100 m. W profilu otworu Sierpc 2 kompleks uszczelniający rozszerzony jest o warstwy gipsowe górne (fig. 6). Cały ten kompleks położony jest tu poniżej 2500 m.

Niższy poziom kolektorski tworzą piaskowcowo-mułowcowe, rzeczne utwory kajpru dolnego (Tk1, trias środkowy; Gajewska i in., 1997a). Poziom ten wykazuje zmienną miąższość w granicach 20–30 m. Obraz geofizyczny tego poziomu wskazuje na stosunkowo dobre właściwości kolek-

torskie. Występuje on jedynie w północnej części obszaru oraz w okolicy Pułtusa 1, przy czym między Sierpcem a Bieżuniem zalega poniżej 2500 m (fig. 6, 7). W rejonie Płońska i Nasielska Tk1 wykształcony jest jako mułowce i iłowce, tworzące wraz z poziomem warstw gipsowych dolnych (Tk2a, trias górny) kompleks uszczelniający (fig. 7). Warstwy gipsowe dolne (Tk2a) w rejonie Gradzanowa mają zbyt małą miąższość, aby utworzyć samodzielny kompleks uszczelniający dla piaskowców Tk1 (fig. 6).

Kolejny poziom piaskowcowy, o obrazie geofizycznym wskazującym na średnie właściwości kolektorskie, obejmuje najniższy górny pstry piaskowiec (Tp3, trias dolny). Poziom ten osiąga miąższość 30–40 m między Sierpcem a Bieżuniem oraz w rejonie Płońska, leży tam jednakże poniżej głębokości 2500 m (fig. 6, 7). We wschodniej części obszaru jedynie w otworze Ciechanów 1 jego miąższość przekracza 20 m (fig. 8).

Poziom ten przykryty jest zmiennymi litologicznie utworami wyższej części górnego pstręgo piaskowca (Tp3) oraz wapienia muszlowego (Tm), nie uznanymi za poziom uszczelniający (fig. 6–8).

Najniższy poziom kolektorski tworzą utwory wyższej formacji lidzbarskiej i najniższej formacji malborskiej (Tp2, trias dolny). Poziom ten zbudowany jest z piaskowców wapienistych, wapieni marglistych oraz wapieni oolitowych piaszczystych. Występują w nim również wkładki iłowców i iłowców marglistych. Są to utwory szelfu terygenicznouwęglanowego (Szyperko-Teller i in., 1997). Miąższość tego poziomu waha się w granicach 20–60 m (fig. 6–8). Zróżnicowanie litologiczne sugeruje słabe właściwości kolektorskie tego poziomu. Jedynie w otworach położonych najdalej na wschód i na południe znajduje się on powyżej granicznej głębokości 2500 m. Poziom ten nie posiada uszczelnienia w bezpośrednim nadkładzie.

W jednym otworze, Ciechanów 1 (fig. 8), jako najwyższy potencjalny poziom zbiornikowy wydzielono kajper górny (Tk3, trias górny). Jest on wykształcony w postaci dwóch warstw piaskowca przedzielonych warstwą iłowca. Cały poziom ma miąższość 60 m. Wykształcenie wskazuje na średnie właściwości kolektorskie. Poziom ma znikomą rozciągłość lateralną i nie posiada uszczelnienia w bezpośrednim nadkładzie.

W otworze Biezuń 1 (fig. 6) żaden poziom piaskowcowy oraz iłowcowy nie został uznany za potencjalny poziom kolektorski czy uszczelniający, ze względu na zbyt małą miąższość. W otworze tym zaobserwowano tektoniczne redukcje w profilu triasu, podobnie jak w otworach Ciechanów 1, Pułtusk 3 oraz Dęba 5 (z dokumentacji otworowych).

## WŁAŚCIWOŚCI PETROFIZYCZNE

### Jura

Właściwości petrofizyczne **aalenu dolnego** pomierzone na rdzeniach z rejonu Kamionki–Bodzanów są zazwyczaj dobre: porowatość wynosi 7,360–22,518%, przepuszczalność

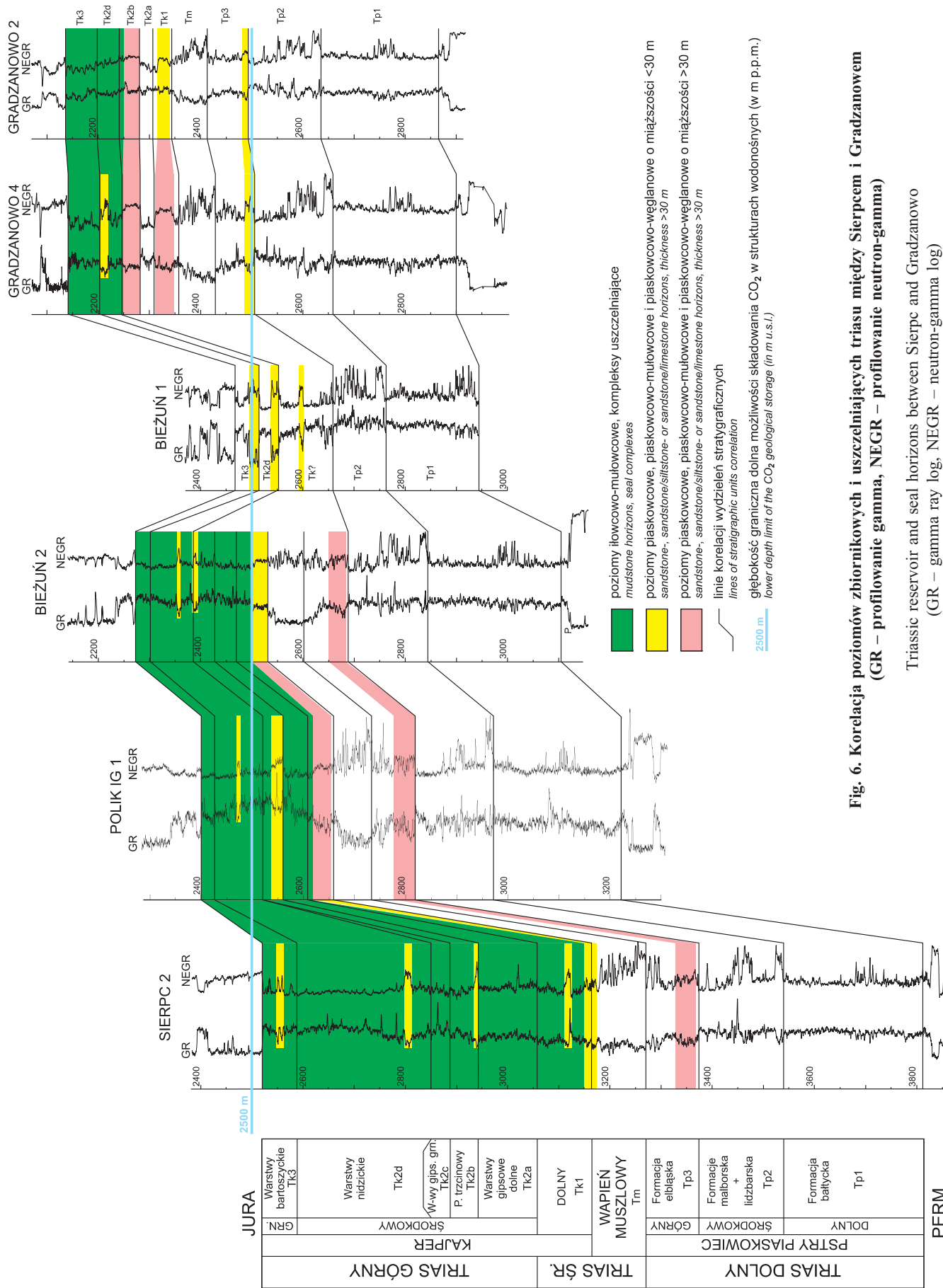


Fig. 6. Korelacja poziomów zbiornikowych i uszczelniających triasu między Sierpcem i Gradzanowem (GR – profilowanie gamma, NEGR – profilowanie neutron-gamma)

Triassic reservoir and seal horizons between Sierpc and Gradzanowo (GR – gamma ray log, NEGR – neutron-gamma log)

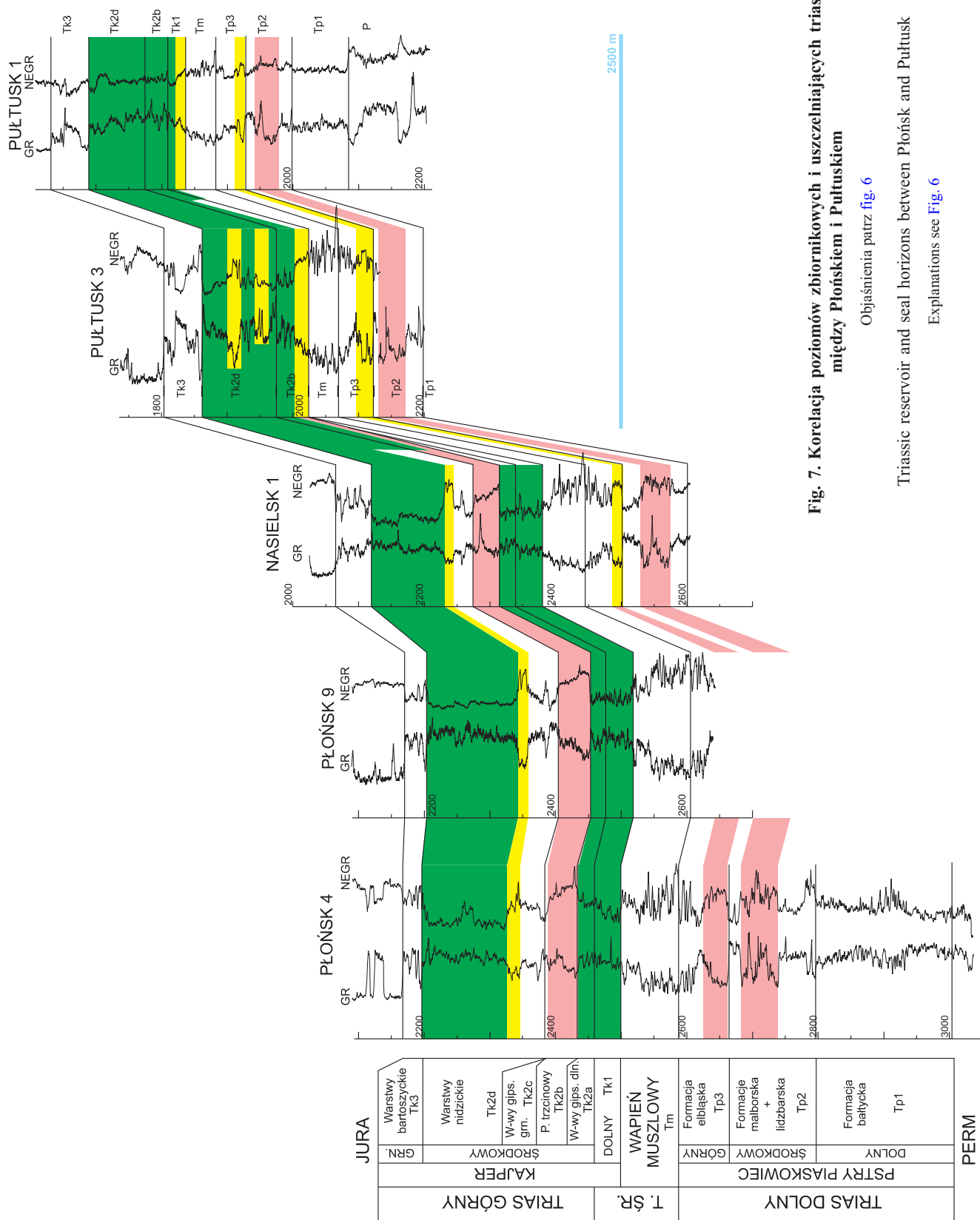


Fig. 7. Korelacja poziomów zbiornikowych i uszczelniających triasu między Płońskiem i Puktuskim

Objaśnienia patrz fig. 6

Triassic reservoir and seal horizons between Płońsk and Puktusk

Explanations see Fig. 6

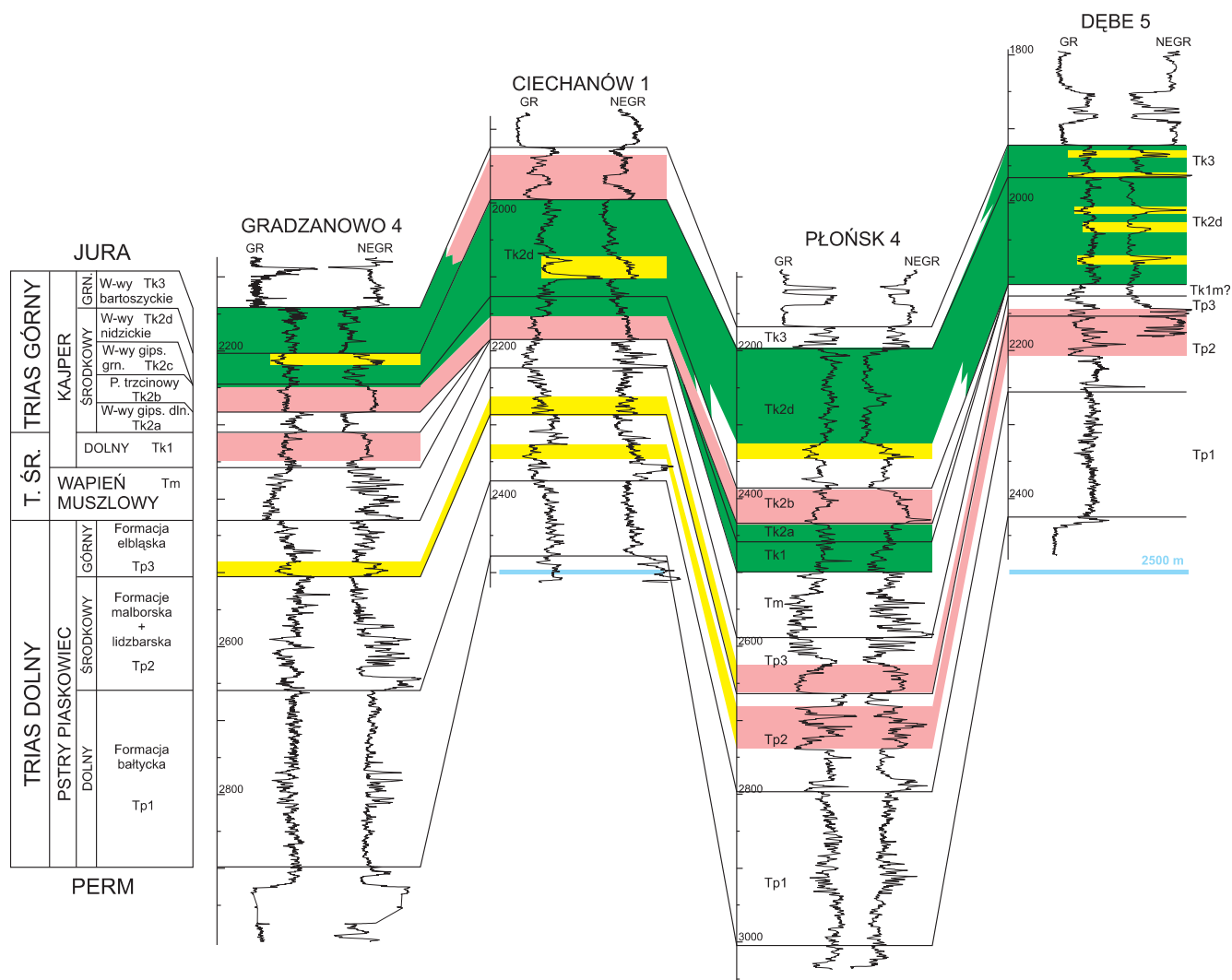


Fig. 8. Korelacja poziomów zbiornikowych i uszczelniających triasu między Gradzanowem i Dębe

Objaśnienia patrz [fig. 6](#)

Triassic reservoir and seal horizons between Gradzanowo and Dębe

Explanations see [Fig. 6](#)

pienowa zazwyczaj  $>300$  mD, pozioma  $>300,00-1099,34$  mD. Interpretacje krzywych geofizycznych w otworach tego rejonu potwierdzają występowanie interesujących z punktu widzenia sekwestracji  $\text{CO}_2$  parametrów petrofizycznych. Obserwuje się je w otworze Bodzanów GN 1 (2194–2240 m), w którym porowatości wynoszą od kilkunastu do 22%, zaś przepuszczalności są rzędu kilkudziesięciu–stukilkudziesięciu mD. Ich przydatność dla celów geologicznego składowania  $\text{CO}_2$  potwierdza obecność w nadkładzie (1948–2008 m) skał uszczelniających (część kompleksu bajosu górnego 1948–2008 m), o odpowiednich parametrach petrofizycznych i miąższości.

Również w otworze Bodzanów IG 1 stwierdza się korzystne wartości porowatości (od kilkunastu do 22%) w utworach

aałenu dolnego (2497,5–2527,0 m). Przepuszczalności tych utworów wynoszą kilkadziesiąt mD. Kompleks ten wyróżnia się odpowiednimi, kilkunastoprocentowymi wartościami porowatości także w otworze Bielsk 2. Posiada on również uszczelnienie w wyżej leżącym bajosie górnym. Niestety, przepuszczalności określone dla tego kompleksu wynoszą kilkadziesiąt mD i tym samym nie spełniają przyjętych kryteriów bezpiecznego składowania  $\text{CO}_2$ .

W rejonie Kamionek–Bodzanowa wykonano tylko jedną analizę rdzeni pod względem właściwości petrofizycznych łałenu górnego (Kamionki IG 3), która dała porowatość 2,19%, przy braku wyników przepuszczalności. Natomiast z poziomu uszczelniającego w obrębie górnego bajosu przebadano w tym rejonie kilka prób łałenców, dla

których uzyskano porowatości rzędu kilku procent. Przepuszczalności nie badano.

Korzystne z punktu widzenia sekwestracji CO<sub>2</sub> wartości parametrów petrofizycznych obserwuje się w obrębie **formacji borucickiej**. W rejonie Kamionek–Bielska–Bodzanowa porowatość pomierzona w próbkach skalnych wynosi 10,65–22,77%, przepuszczalność pionowa 0,39–>300 mD (zazwyczaj >100 mD), pozioma 30,0–>300 mD (zazwyczaj >150 mD). Analiza krzywych geofizycznych dla wiercenia Bodzanów GN 1 wykazała, że utwory tej formacji charakteryzują się kilkunastoprocentowymi porowatościami całkowitymi. Obliczone dla nich przepuszczalności są rzędu kilkudziesięciu–stulkudziesięciu mD (maksymalnie osiągają wartości 360 mD). W otworze Bodzanów IG 1, porowatości całkowite do 26% i kilkaset mD przepuszczalności, określone dla skał tej formacji na podstawie profilowań geofizycznych, również potwierdzają jej bardzo korzystne właściwości petrofizyczne. Nieco niższe wartości interesujących parametrów obserwuje się dla skał formacji borucickiej w Bielsku 2 – kilkunastoprocentowe porowatości i przepuszczalności do ponad 200 mD.

Piaskowce reprezentujące tę formację w otworze Sierpc 2 (fig. 9) również wyróżniają się odpowiednimi dla składowania CO<sub>2</sub> porowatościami całkowitymi – od kilkunastu do 30% i przepuszczalnościami od kilkudziesięciu do 1600 mD.

W rejonie Polika i Płońska porowatość piaskowców formacji borucickiej badana na rdzeniach wynosi 21,29–30,99%, przepuszczalności zazwyczaj nie badano, w jednym przypadku uzyskano wartość 899,7 mD. Wyniki interpretacji krzywych geofizycznych dla 33-metrowego kompleksu tych piaskowców w otworze Polik IG 1 (fig. 10) wskazują, że spełniają one przyjęte dla sekwestracji kryteria dotyczące głębokości zalegania i parametrów petrofizycznych. Ich porowatości wynoszą od kilkunastu do ponad 32%, zaś przepuszczalności od kilkudziesięciu do 3700 mD. W otworze Płońsk IG 2 obserwowane w formacji borucickiej (2059–2116 m) porowatości całkowite mieszczą się w przedziale 13–21%, zaś przepuszczalności są rzędu kilkudziesięciu do około 130 mD. W otworach Gradzanowo 2, Płońsk IG 2, Polik IG 1 i Sierpc 2, pomimo dobrych właściwości kolektorskich utworów formacji borucickiej, dyskwalifikujący jest brak dla nich uszczelnienia.

Perspektywiczne warunki dla geologicznego składowania dwutlenku węgla prezentuje **formacja drzewicka**. Parametry petrofizyczne dla prób skalnych z tego kolektora wykazują: porowatość 12,061–20,874%, przepuszczalność pionową 161,422–>300 mD, poziomą 46,92–1410,66 mD. Potwierdzają się one dla całego kolektora w otworze Polik IG 1, w którym w jej utworach obserwuje się porowatości z przedziału 13–32% i przepuszczalności rzędu kilkuset do 2400 mD. Podobne wyniki uzyskano z krzywych w otworze Bodzanów IG 1, gdzie porowatości wynoszą od kilkunastu do 28%, a przepuszczalności od kilkudziesięciu do kilkuset mD.

Dla piaskowców **formacji ostrowieckiej** wykonano nieliczne badania petrofizyczne skał, które dały wartości

porowatości od 14,55–27,98%, oraz przepuszczalności 0,4–1184,687 mD. Takie same wyniki, wskazujące na bardzo dobre właściwości kolektorskie, wyinterpretowano dla profilu tej formacji z otworu Polik IG 1 (2193–2340 m) – porowatości całkowite wynoszą od około 14 do 29%, a przepuszczalności od kilkudziesięciu do 1400 mD.

Kompleks tej formacji wraz z formacją drzewicką może być traktowany jako jeden kolektor, a ich wspólne uszczelnienie stanowi formacja ciechocińska.

Z poziomu zbiornikowego w obrębie **formacji olsztyńskiej** wykonano jedynie kilka analiz rdzenia z otworów Dębe 5 i 6 oraz Pułtusk 3. Uzyskano wyniki porowatości 9,00–24,82% oraz jeden wynik przepuszczalności równy 554,9 mD. Geofizyczny rozkład parametrów petrofizycznych w profilu otworu Sierpc 2 (fig. 9) wskazuje jednak na słabsze właściwości kolektorskie tej formacji. Uzyskano tu porowatości rzędu kilkunastu % i przepuszczalności od kilku do ok. 100 mD dla górnego kolektora (2189,5–2240 m), oraz odpowiednio od kilku do 23% i od kilku do 500 mD w dolnym kolektorze (2283,5–2392,5 m). Podobnie w wierceniu Płońsk IG 2 dla kolektora z głębokości 2184,5–2278,0 m porowatości całkowite są rzędu kilkunastu procent, zaś przepuszczalności w tej formacji są stosunkowo niskie, rzędu kilkunastu do około 75 mD. W obrębie formacji olsztyńskiej w rozkładzie parametrów petrofizycznych zaznacza się przejście od skał o dobrych właściwościach zbiornikowych, do wyżej zalegającego uszczelnienia (2155–2183 m). Odzwierciedla się ono na wyinterpretowanych krzywych niższymi porowatościami rzędu kilku procent oraz przepuszczalnością rzędu kilku mD.

Dla **formacji zagajskiej** nieliczne analizy wykonane na materiale rdzeniowym wskazują na wysoką porowatość piaskowców z poziomu zbiornikowego, rzędu 18,83–25,40%. Przepuszczalność mierzona była tylko w trzech przypadkach i dała bardzo skrajne wyniki: 15,219 oraz 2460,6 i 4186,2 mD. Górna, uszczelniająca część formacji zagajskiej nie ma takiej charakterystyki petrofizycznej. Analiza parametrów petrofizycznych określonych na podstawie badań geofizycznych dla tej formacji w otworze Sierpc 2 (2414–2520 m), wskazuje na dobre właściwości kolektorskie – porowatości rzędu kilkunastu % i przepuszczalności od kilkunastu do 600 mD. W otworze wiertniczym Płońsk IG 2 w obrębie formacji zagajskiej można wyróżnić utwory o właściwościach zarówno kolektorskich (2307–2385 m), jak i uszczelniających (2278–2307 m). Niestety, skały zbiornikowe mimo porowatości (kilkanaście procent) spełniających kryterium wymagane dla składowania CO<sub>2</sub>, osiągają wartości przepuszczalności nie przekraczające 50 mD. Także w otworze Bodzanów IG 1, wydziela się w obrębie tej formacji kompleksy skał zbiornikowych (2928–2960 m) i skał uszczelniających (2900–2928 m). Przy porowatościach kolektora do 29%, obserwuje się w nim jednocześnie stosunkowo korzystniejsze niż w otworze Płońsk IG 2 wartości przepuszczalności – kilkaset, a nawet ponad 1000 mD.

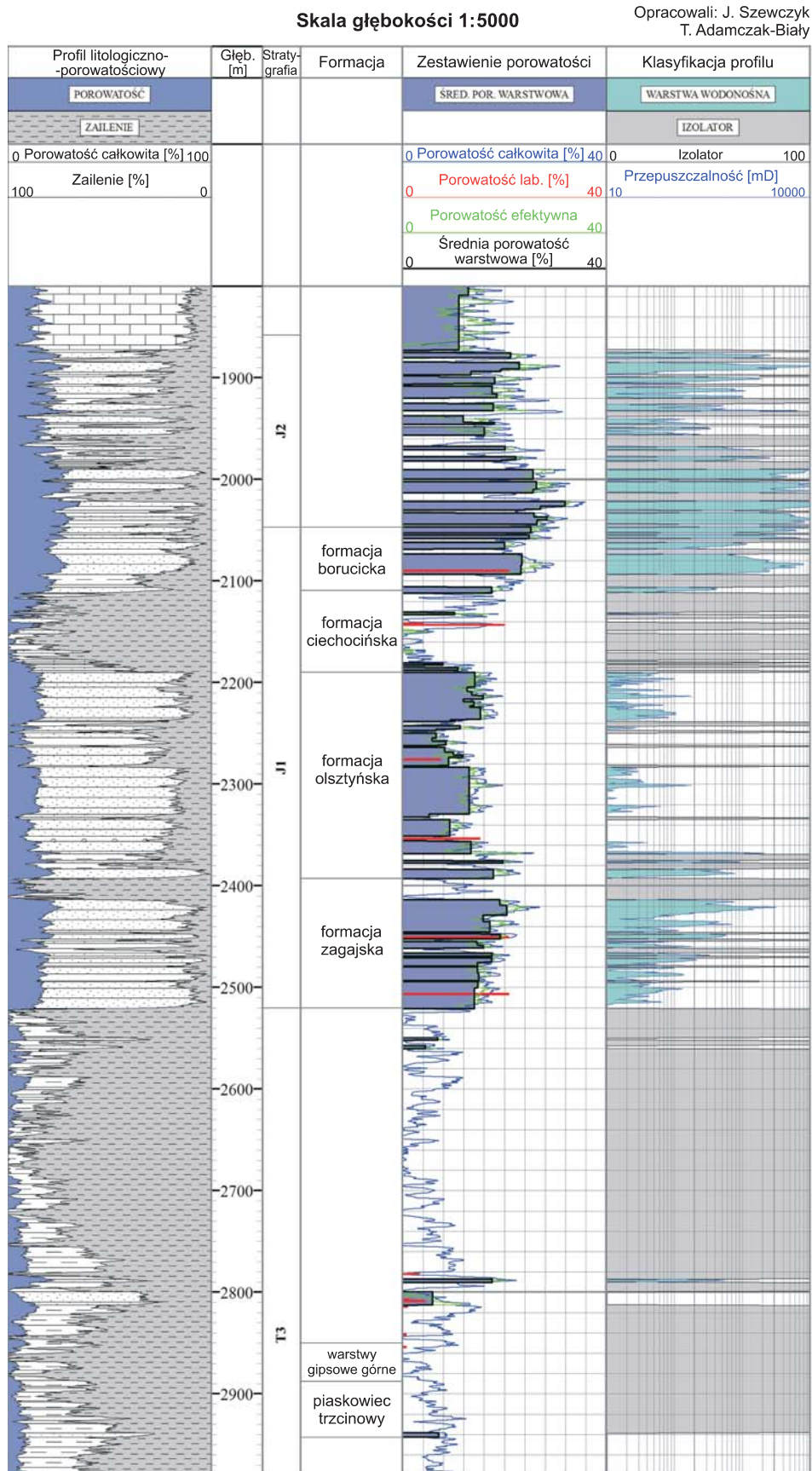
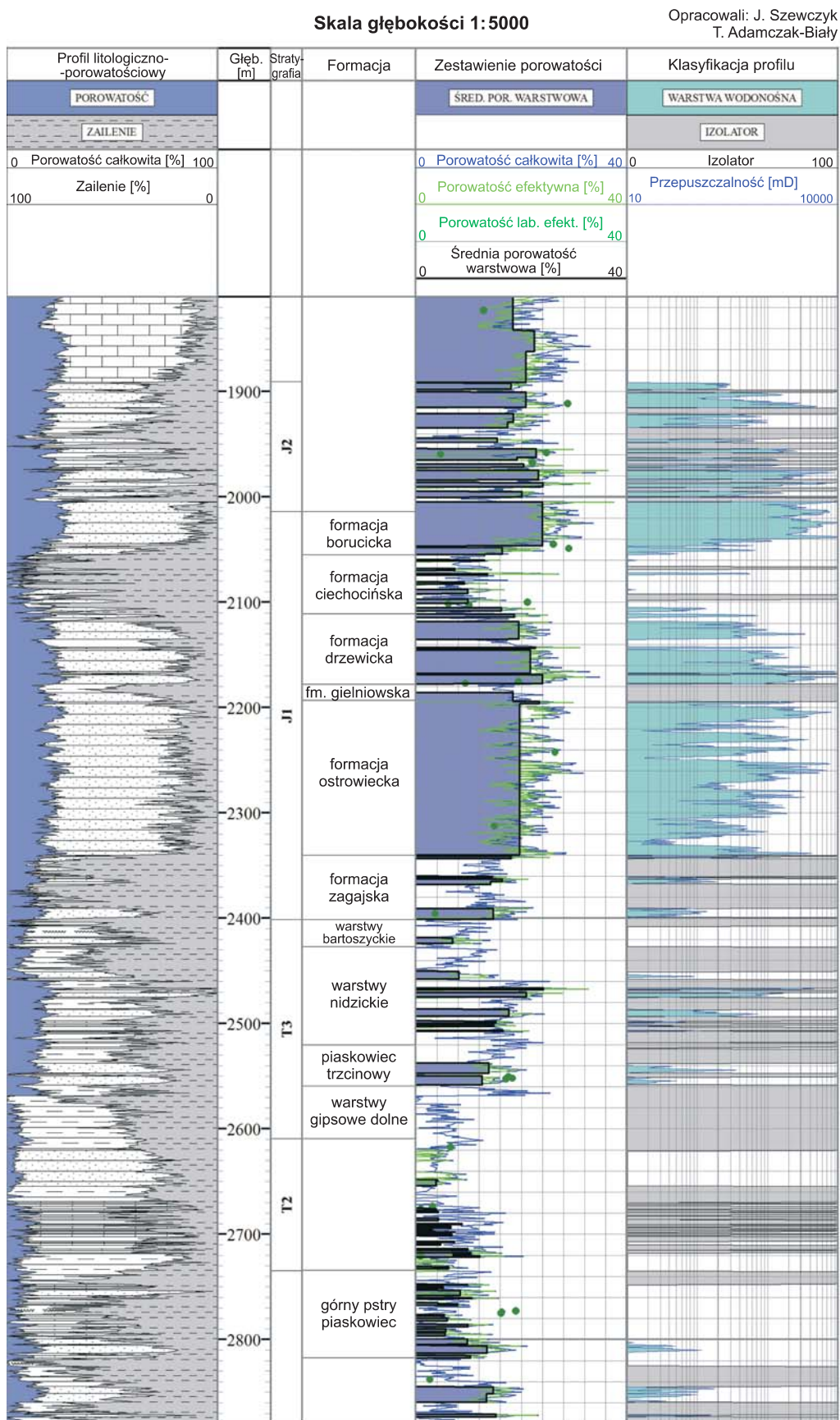


Fig. 9. Wyniki interpretacji litologii oraz parametrów petrofizycznych dla profilu otworu wiertniczego Sierpc 2

The results of log interpretation of lithology and petrophysical parameters in the Sierpc 2 borehole



**Fig. 10. Wyniki interpretacji litologii oraz parametrów petrofizycznych dla profilu otworu wiertniczego Polik IG 1**

The results of log interpretation of lithology and petrophysical parameters in the Polik IG 1 borehole



Parametry petrofizyczne uzyskane zarówno z bezpośrednich analiz rdzenia, jak i obliczone dla iłwcowo-mułowcowych skał **formacji ciechocińskiej** z rejonu północnego Mazowsza wskazują, że stanowi ona dobre uszczelnienie dla niżej zalegających kolektorów z formacji drzewickiej, ostrowieckiej, olsztyńskiej i zagajskiej. Dla iłwców wykonano kilka analiz petrofizycznych, dla których uzyskano wartości porowatości w zakresie 1,53–11,56%. W nielicznych przypadkach, gdy udało się wykonać badanie przepuszczalności, uzyskano wartość 0,001 mD. Dla heterolitu z formacji ciechocińskiej uzyskano odpowiednio wartości 15,1% i 0,159 mD. Dane archiwalne dla różnych odcinków formacji ciechocińskiej wykazują porowatość w zakresie 3,67–22,59% i przepuszczalność od <0,1 do 50,92 mD.

Równie zadawalające wyniki uzyskano z interpretacji krzywych geofizycznych. W otworze Sierpc 2 (fig. 9) parametry petrofizyczne obliczone dla skał iłwcowo-mułowcowych oraz miąższość formacji ciechocińskiej (2109,00–2189,50 m) potwierdzają jej przydatność jako uszczelnienia. Uszczelniające właściwości formacji ciechocińskiej potwierdzają się też w otworze Bodzanów IG 1. Utwory te są praktycznie nieprzepuszczalne, a ich porowatości (kilka, kilkanaście %) wyraźnie niższe od obserwowanych dla skał niżej zalegającej formacji drzewickiej. W otworze Płońsk IG 2 porowatości są rzędu kilku procent (do ok. 11%) i przepuszczalności bliskie 0 mD.

W otworze Polik IG 1 (fig. 10) miąższość tej formacji spełnia kryteria bezpiecznego składowania CO<sub>2</sub>, ale jej parametry petrofizyczne są zróżnicowane. Określone porowatości są bowiem rzędu kilku–kilkunastu procent. Wśród skał o bardzo dobrych parametrach uszczelniających identyfikuje się wkładki piaskowca, o stosunkowo wysokich wartościach przepuszczalności (kilkadziesiąt, a nawet 250 mD). Zróżnicowanie parametrów petrofizycznych obserwuje się w obrębie formacji ciechocińskiej również w otworze Bielsk 2. Przepuszczalności są bliskie 0 lub osiągają w cienkich warstwach piaskowca kilkadziesiąt mD. Wątpliwości, co do wystarczających właściwości uszczelniających tej formacji budzi jednak jej porowatości. W wyodrębniających się warstwach o wyższej porowatości ich wartości osiągają kilkanaście, a nawet ponad 20%.

### Trias

Dla obszaru północnego Mazowsza istnieje stosunkowo niewiele danych laboratoryjnych charakteryzujących właściwości petrofizyczne wytypowanych poziomów kolektorów triasu.

Wyniki interpretacji profilowań geofizycznych wskazują, że w rejonie północnego Mazowsza piaskowcowe kompleksy triasu odznaczają się relatywnie niskimi wartościami parametrów petrofizycznych, interesujących z punktu widzenia geologicznego składowania dwutlenku węgla. Z wytypowanych poziomów kolektorskich stosunkowo najkorzystniejsze warunki wykazują osady piaskowca trzciniowego (Tk2b).

W otworze Gradzanowo 2 (fig. 11) utwory Tk2b, które można uznać za kolektor (2250–2281 m), charakteryzują się porowatościami całkowitymi z przedziału 9–13%. Porowatość warstwowa określona dla nich wynosi 11,8%. Dla skał tych obserwuje się jednak stosunkowo niskie wartości przepuszczalności – od kilku do 30 mD. Zalegające powyżej warstwy nidzickie (2197–2241 m), odznaczają się porowatościami bliskimi 0% i praktycznie brakiem przepuszczalności. Takie właściwości petrofizyczne pozwalają uznać je za uszczelnienie dla kolektora wydzielonego w obrębie piaskowca trzciniowego.

W otworze Polik IG 1 (fig. 10) w przedziale głębokościowym związanym z piaskowcem trzciniowym obserwuje się dwa poziomy piaskowcowe, o interesujących parametrach zbiornikowych. Utwory z przedziału 2550–2558 m charakteryzują się porowatością warstwową 12,60% i przepuszczalnością od kilku do około 50 mD, zaś piaskowce z głębokości 2537,5–2547,0 m porowatością 13,90% i przepuszczalnością od kilku do 500 mD. Pomimo dobrych właściwości petrofizycznych, stosunkowo mała miąższość i głębokości zalegania utworów piaskowca trzciniowego w otworze Polik IG 1 (poniżej 2500 m), wskazują jednak ich nieprzydatność dla potrzeb sekwestracji.

Nieperspektywiczne (nieprzepuszczalne, o porowatościach rzędu kilku %) z punktu widzenia składowania CO<sub>2</sub> są utwory piaskowca trzciniowego także w otworze Sierpc 2 (fig. 9).

Dla rejonu Płońsk–Pułtusk istnieje najwięcej danych z analiz laboratoryjnych prób skalnych piaskowca trzciniowego. Z danych archiwalnych wynika, iż na tym obszarze piaskowce Tk2b wykazują porowatość rzędu 20–25% oraz zmienną przepuszczalność wahającą się od 14 do 275 mD, najczęściej oscylującą wokół 100 mD. Badania laboratoryjne przeprowadzone w ramach projektu wykazały w otworze Płońsk IG 2 porowatość rzędu 12–15%, przy niskiej przepuszczalności około 0,4 mD. Rezultaty interpretacji profilowań geofizycznych w otworze Płońsk IG 2 wskazują jeszcze niższe wartości parametrów petrofizycznych utworów piaskowca trzciniowego. Piaskowce z głębokości 2641–2665 m mają zaledwie kilkuprocentowe porowatości, a przepuszczalności oscylują wokół 0,1 mD. Tym samym, na podstawie nowych danych laboratoryjnych oraz właściwości petrofizycznych określonych na bazie pomiarów geofizycznych, można stwierdzić, że nie spełniają one kryteriów bezpiecznego składowania CO<sub>2</sub>.

Podobny obraz parametrów zbiornikowych uzyskuje się z dostępnych archiwalnych danych laboratoryjnych dla utworów Tk2b z rejonu Dębe. Porowatości piaskowców tego poziomu są rzędu 10–20%, przy jednoczesnym braku przepuszczalności.

W rejonie Sierpca–Gradzanowa stosunkowo dobrze scharakteryzowany jest, poprzez wyniki analiz laboratoryjnych na próbach rdzenia, poziom piaskowcowy górnego pstrego piaskowca (Tp3). Nowe dane laboratoryjne z otworu Gradzanowo 2 wykazały porowatość 17%.

Wartości uzyskane z analiz laboratoryjnych znajdują potwierdzenie w obrazie petrofizycznym uzyskanym na podstawie pomiarów geofizycznych w Gradzanowie 2 (fig. 11).

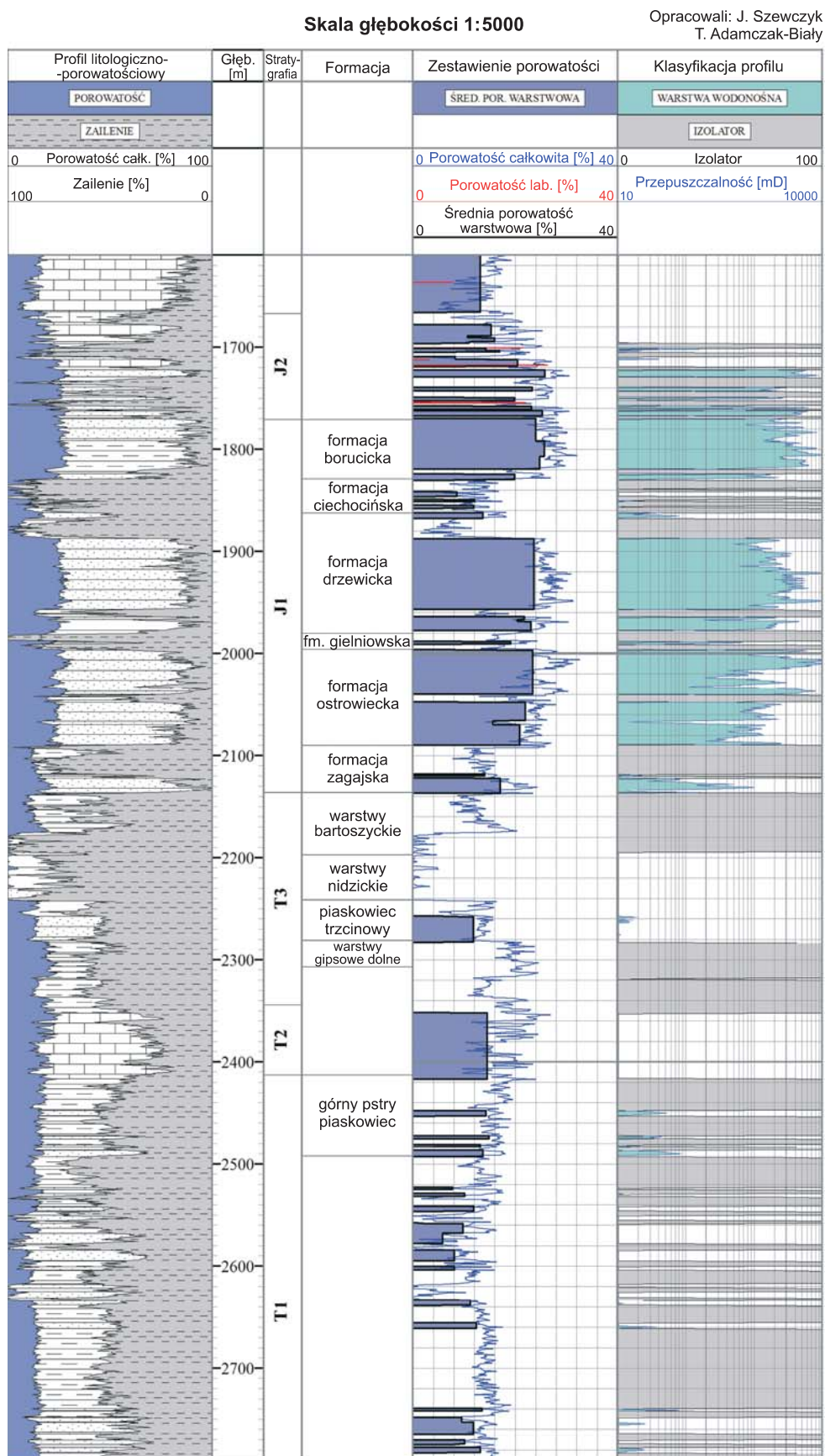


Fig. 11. Wyniki interpretacji litologii oraz parametrów petrofizycznych dla profilu otworu wiertniczego Gradzanowo 2

The results of log interpretation of lithology and petrophysical parameters in the Gradzanowo 2 borehole

W obrębie górnego pstrego piaskowca (2413–2492 m) wyróżnia się piaskowce o kilkunastoprocentowych porowatościach. Określone dla nich przepuszczalności osiągają maksymalnie do kilkudziesięciu mD.

Dla otworu Polik IG 1 porowatości utworów Tp3 (z materiałów archiwalnych) wynoszą 18–20%, a przepuszczalności 10–65 mD. Wyniki interpretacji profilowań geofizycznych również pozwalają wyróżnić w profilu tego otworu,

w obrębie poziomu górnego pstrego piaskowca (2734,5–2817,0 m), warstwy piaskowcowe o porowatościach do 18% i przepuszczalnościach rzędu kilkunastu, kilkudziesięciu mD. Warstwy skał o odpowiednich porowatościach charakteryzują się jednak i w tym otworze zbyt małą przepuszczalnością, małą miąższością i zalegają za głęboko dla celów sekwestracyjnych.

## WNIOSKI

W obrębie jury środkowej, a w szczególności jury dolnej, stwierdzono kilka poziomów o bardzo dobrych właściwościach zbiornikowych. Należą do nich piaskowce dolnego aalenu (jura środkowa) i formacji borucickiej (toark góry – jura dolna) oraz poziomy piaskowcowe w obrębie formacji drzewickiej, ostrowieckiej, olsztyńskiej i zagajskiej. Zarówno miąższości, jak i wartości porowatości oraz przepuszczalności tych utworów, uzyskane na podstawie analizy materiału rdzeniowego oraz interpretacji krzywych geofizycznych, wskazują, że poziomy te spełniają kryteria bezpiecznego składowania CO<sub>2</sub>. Bardzo szczegółowej analizie wymagają natomiast poziomy uszczelniające wydzielane w obrębie bajosu górnego, aalenu górnego, formacji ciechocińskiej, gielniowskiej i górnego odcinka formacji zagajskiej. Poziomy te często posiadają bardzo ubogą dokumentację właściwości petrofizycznych uzyskanych z materiału rdzeniowego. Wyniki interpretacji krzywych geofizycznych wskazują, że poziomy nie wszędzie spełniają warunki wymagane dla bezpiecznego składowania CO<sub>2</sub>.

Najbardziej perspektywicznym potencjalnym poziomem zbiornikowym w triasie jest poziom piaskowcowy piaskowca

trzciniowego (Tk2b, trias górny). Poziom ten ma największą rozciągłość lateralną i jest to jedyny poziom piaskowcowy triasu posiadający uszczelnienie bezpośrednio w nadkładzie. Dane archiwalne, wyniki laboratoryjnych pomiarów petrofizycznych oraz analiza pomiarów geofizyki wiertniczej, wskazują na zmienne właściwości kolektorskie osadów triasu północnego Mazowsza. Szczególnie charakterystyczną cechą jest częsty brak przepuszczalności przy korzystnych wartościach porowatości, zwłaszcza dla kolektorów w obrębie piaskowca trzciniowego. Na całym obszarze osady triasu górnego (głównie Tk2d, warstwy niższe) tworzą poziom uszczelniający, o miąższości powyżej 100 m. Wykorzystanie osadów triasu dla składowania CO<sub>2</sub> może być dodatkowo utrudnione przez istnienie deformacji nieciągłych w obrębie systemu.

Kolektory scharakteryzowane dla systemu jurajskiego wykazują lepszą charakterystykę facjalną i miąższościową oraz właściwości petrofizyczne, w porównaniu z poziomami zbiornikowymi wyróżnionymi w triasie.

## LITERATURA

- CHADWICK A., ARTS R., BERNSTONE C., MAY F., THIBEAU S., ZWEIGEL P. (red.), 2006 — Best practice for the storage of CO<sub>2</sub> in saline aquifers, observations and guidelines from the SACS and CO<sub>2</sub>STORE projects. Raport projektu CO<sub>2</sub>-STORE, dostępny na stronie: [www.co2store.org](http://www.co2store.org)
- DADLEZ R., MAREK S., 1983a — Tektonika. Kompleks cechsztyńsko-mezozoiczny. W: Budowa geologiczna niecki warszawskiej (płockiej) i jej podłoża. *Pr. Inst. Geol.*, **103**: 216–221.
- DADLEZ R., MAREK S., 1983b — Mapa jednostek strukturalnych kompleksu cechsztyńsko-mezozoicznego. W: Budowa geologiczna niecki warszawskiej (płockiej) i jej podłoża. *Pr. Inst. Geol.*, **103**: 7.
- FELDMAN-OLSZEWSKA A., 2005 — Środowiska sedymentacji w jurze środkowej Kujaw. Praca doktorska. Centr. Arch. Geol. PIG-PIB, Warszawa.
- FELDMAN-OLSZEWSKA A., 2012 — Wyniki badań sedymentologicznych utworów jury środkowej w otworach wiertniczych Wojszyce IG 1/1a, IG 3, IG 4. W: Wojszyce IG 1/1a, IG 3, IG 4 (red. A. Feldman-Olszewska). *Profile Głęb. Otw. Wiert. Państw. Inst. Geol.*, w druku.
- FELDMAN-OLSZEWSKA A., ADAMCZAK T., SZEWCZYK J., 2010 — Charakterystyka struktur Zaosia i Jeżowa pod kątem geologicznego składowania CO<sub>2</sub> na podstawie informacji z głębokich otworów wiertniczych. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **439**: 17–28.
- FRANCZYK M., 1983 — Stratygrafia i paleontologia. Retyk i jura dolna. W: Budowa geologiczna niecki warszawskiej (płockiej) i jej podłoża. *Pr. Inst. Geol.*, **103**: 124–138.
- GAJEWSKA I., SENKOWICZOWA H., SIKORSKA-JAWOROWSKA M., JAWOROWSKI K., 1997a — Trias środkowy. W: Epikontynentalny perm i mezozoik w Polsce (red. S. Marek, M. Pajchłowa). *Pr. Państw. Inst. Geol.*, **143**: 133–150.
- GAJEWSKA I., DECZKOWSKI Z., MALISZEWSKA A., MARCINKIEWICZ T., 1997b — Trias górny. W: Epikontynentalny perm i mezozoik w Polsce (red. S. Marek, M. Pajchłowa). *Pr. Państw. Inst. Geol.*, **143**: 151–194.
- NARKIEWICZ M., DADLEZ R., 2008 — Geologiczna regionalizacja Polski – zasady ogólne i schemat podziału w planie podkonozoicznym i podpermskim. *Prz. Geol.*, **56**, 5: 391–397.
- PIEŃKOWSKI G., 2004 — The epicontinental Lower Jurassic of Poland. *Pol. Geol. Inst. Spec. Papers*, **12**.

- RYLL A., 1983 — Stratygrafia i paleogeografia. Jura środkowa. *W: Budowa geologiczna niecki warszawskiej (płockiej) i jej podłoża. Pr. Inst. Geol.*, **103**: 138–148.
- SZEWCZYK J., 1998 — Kalibracja „starych” pomiarów neutronowych. *Materiały VII konf. Nauk.-tech.*: 322–333. Koninki.
- SZYPERKO-TELLER A., GAJEWSKA I., FRANCYK M., 1983 — Stratygrafia i paleogeografia. Trias dolny (pstry piaskowiec). *Wapień muszlowy i kajper. Retyk i jura dolna. W: Budowa geologiczna niecki warszawskiej (płockiej) i jej podłoża. Pr. Inst. Geol.*, **103**: 102–138.
- SZYPERKO-TELLER A., SENKOWICZOWA H., KUBERSKA M., 1997 — Trias dolny (pstry piaskowiec). *W: Epikontynentalny perm i mezozoik w Polsce (red. S. Marek, M. Pajchłowa). Pr. Państw. Inst. Geol.*, **143**: 83–132.

## SUMMARY

Fifty three boreholes (including 26 that reached Triassic deposits) were investigated in northern Mazovia as candidates for CO<sub>2</sub> storage. The top of the Triassic system lies beneath the depth of 2500 m b.s.l. in seven boreholes in the western part of the area. These boreholes were excluded from the analysis of the Triassic sequestration systems. Regional analysis of the distribution, thickness pattern and facies development of potential Jurassic and Triassic reservoir and seal horizons has been made based on geological interpretation of well logs, drill cores and lithological descriptions.

The significant thickness, good reservoir properties and adequate depth give sufficient grounds to select a number of sandstone levels as potential reservoirs for CO<sub>2</sub> storage within the Jurassic deposits. These are sandstone levels within the Lower Aalenian (Middle Jurassic) and the Borucice Fm (Upper Toarcian – Lower Jurassic) (both in the Kamionki –Bodzanów region) as well as within the Drzewica Fm. (Upper Pliensbachian), Ostrowiec Fm. (Sinemurian), Olsztyn Formation (Pliensbachian–Upper Sinemurian) and Zagaje Formation (Lower Sinemurian–Hettangian). The sealing horizons to those formations are fine-grained rocks of, respectively, the Upper Aalenian and middle part of the Upper

Bajocian, and the Ciechocinek Fm. (Lower Toarcian), as well as, in some areas, of the upper part of the Zagaje Fm. (Lower Sinemurian–Hettangian).

Sandstone-dominated horizons were found within the Bartoszyce beds and Schilfsandstein (Upper Triassic), lower Keuper (Middle Triassic) and the upper and middle Buntsandstein (Lower Triassic). The sandstone horizon of the Schilfsandstein, attaining 40 m in thickness, is the only one covered directly by a sealing horizon. Sandy sediments of fluvial origin composing this horizon have been interpreted as a favourable reservoir facies. Porosity measured on samples and interpreted from well logs exceeded usually the required minimum of 10%, but the permeability often did not reach 100 mD.

Interpretation of geophysical logs from the deep wells in the study area included the construction of Middle–Lower Jurassic and Triassic lithological sections, identification of aquifers and impermeable levels, as well as mudding and total porosity profiles. As a result, a picture of petrophysical properties of the Jurassic and Triassic sediments for defined reservoirs and seals has been created based on available laboratory data and the results of interpretation of well logs.