

Potencjał geotermalny utworów węglanowych górnej jury w rejonie Tarnowa

Geothermal potential of the Upper Jurassic carbonate formations in the Tarnów area

Mariusz Miziołek, Andrzej Urbaniec, Kinga Filipowska-Jeziorek, Robert Bartoń,
Bogdan Filar, Agnieszka Moska, Tadeusz Kwilosz

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

STRESZCZENIE: W artykule zaprezentowano wyniki analizy sejsmicznej i otworowej dla utworów jury górnej z rejonu usytuowanego na południe i południowy wschód od Tarnowa, której celem było określenie potencjału geotermalnego tego obszaru. Przeprowadzona analiza geologiczno-złożowa wykazała, że skały węglanowe górnej jury są dobrym kolektorem wód geotermalnych, a najbardziej perspektywiczne do uzyskania większych wydajności są strefy uskokowo-szczelinowe oraz strefy pograżonego paleokrasu. Świadczą o tym opróbowania przeprowadzone w otworach wiertniczych w interwale skał górnourajskich, które wykazały przyływy wód termalnych o wydajnościach do 30 m³/h i temperaturze rzędu 50–80°C. Duża część z tych opróbowań związana jest bądź to ze strefami spękań i uskoków, bądź też z przypowierzchniową strefą rozwoju paleokrasu. Wspomniane utwory górnej jury zalegają w obszarze badań na głębokości od 1600 m do ponad 3000 m p.p.m. W ich nadkładzie występują węglanowe utwory kredy górnej, klastyczne utwory miocenu (autochtonicznego i jednostki zgłobickiej) oraz utwory jednostek tektonicznych Karpat. Zakres przeprowadzonych badań pozwolił na rozpoznanie budowy geologicznej oraz warunków złożowych analizowanego rejonu. Było to podstawą do wytypowania obszaru perspektywicznego, zlokalizowanego we wschodniej części obszaru badań, w obrębie którego można spodziewać się wyższych temperatur oraz możliwości uzyskania większych wydajności wód termalnych, koniecznych do zasilania obiektów energetycznych, ciepłowniczych czy też rekreacyjnych. W rejonie tym na podstawie danych sejsmicznych wyinterpretowano obecność skomplikowanego systemu uskoków, w większości o przebiegu z NW na SE. Dla wytypowanego obszaru perspektywicznego przedstawiono szczegółową charakterystykę parametrów złożowych, istotnych w kontekście poszukiwania i eksploatacji wód geotermalnych.

Słowa kluczowe: skały węglanowe, górna jura, energia geotermalna.

ABSTRACT: The article presents the results of a seismic and well analysis conducted for the Upper Jurassic formations in the area south and southeast of Tarnów, aimed at determining the geothermal potential of this area. A geological and reservoir analysis has shown that the Upper Jurassic carbonate rocks are a good collector of geothermal water, and the fault and fracture zones as well as the buried paleokarst zones are the most promising for higher yields. Tests conducted in wells in the interval of the Upper Jurassic rocks, showed thermal water flows of up to 30 m³/h and temperatures in the range of 50–80°C. A large number of these tests are either associated with zones of faults and fractures, or with the near-surface paleokarst zone. These Upper Jurassic sediments occur in the study area at depths ranging from 1600 meters to more than 3000 meters below sea level. In their overburden are carbonate formations of the Upper Cretaceous, clastic sediments of the Miocene (autochthonous and the Zgłobice Unit) and formations of the tectonic units of the Carpathians. The scope of the study helped determine the geological structure and reservoir conditions of the analyzed region. This was fundamental to the selection of a prospective area, located in the eastern part of the study area, within which higher temperatures and the possibility of higher thermal water yields, necessary for power, heating or recreational facilities, can be expected. In this area, the presence of a complex fault system, mostly running NW-SE, was interpreted from seismic data. A detailed characterization of reservoir parameters relevant to geothermal water exploration and exploitation is presented for the selected prospective area.

Key words: carbonate rocks, Upper Jurassic, geothermal energy.

Autor do korespondencji: M. Miziołek, e-mail: mariusz.miziolek@inig.pl

Artykuł nadesłano do Redakcji: 13.01.2023 r. Zatwierdzono do druku: 09.05.2023 r.

Wstęp

Duże zainteresowanie odnawialnymi źródłami energii, wynikające zarówno z aktualnej sytuacji energetycznej na świecie, jak i ze stale rosnącej społecznej świadomości ekologicznej, sprawia, że pozyskanie ciepła geotermalnego na potrzeby komunalne czy też przemysłowe jest obecnie jednym z bardziej istotnych celów, uwzględnionych w politykach surowcowych wielu krajów Unii Europejskiej. Wykorzystanie energii geotermalnej do wspomnianych celów jest również uzasadnione ze względu na opłacalność ekonomiczną takiego przedsięwzięcia. W związku z aktualną sytuacją gospodarczą i polityczną w Europie, a zwłaszcza wynikającym z tego lawinowym wzrostem cen energii, trwają intensywne poszukiwania możliwości obniżenia kosztów pozyskiwanej energii, zarówno elektrycznej, jak i ciepłej.

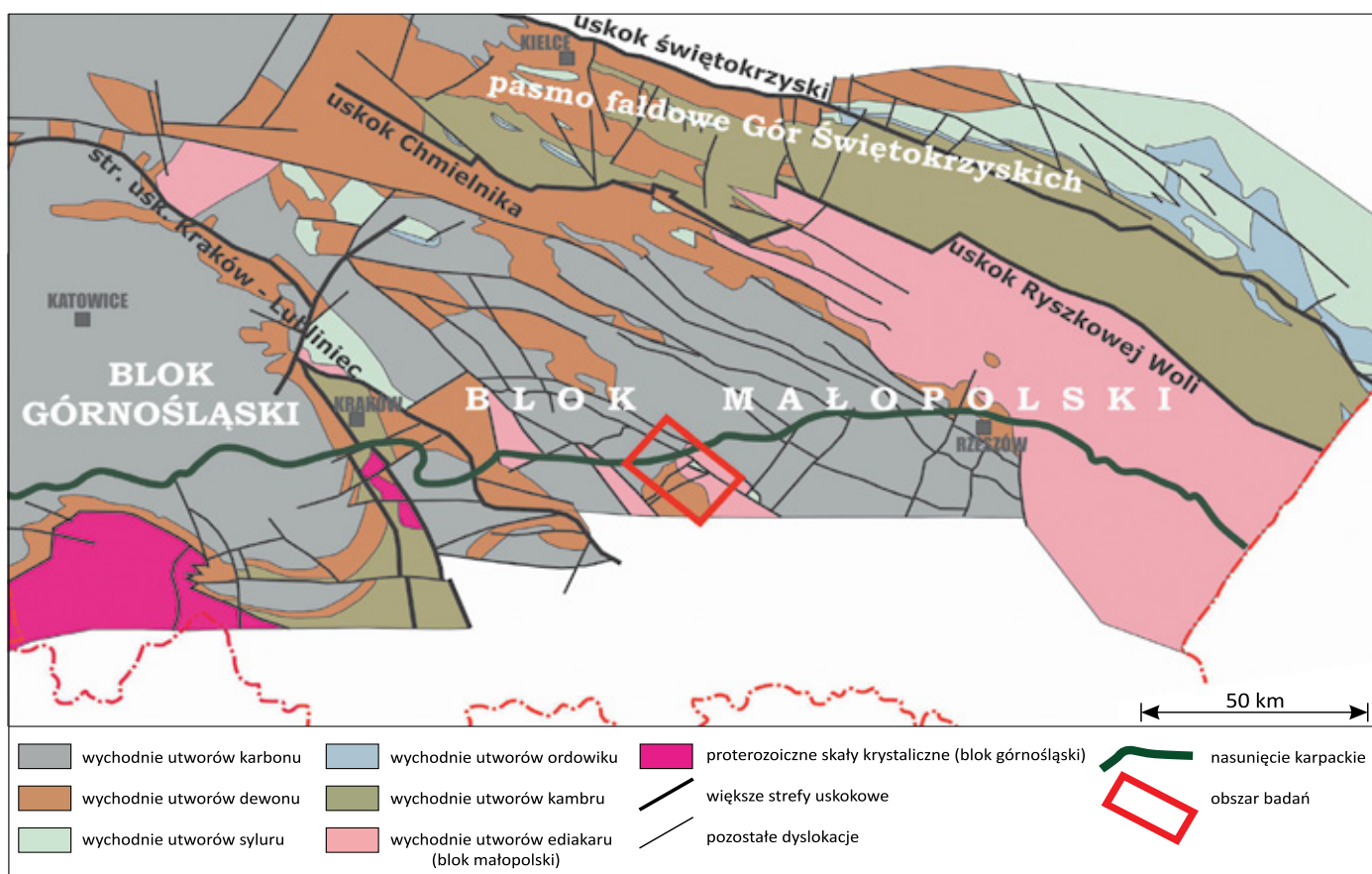
Energia geotermalna uznawana jest za najbardziej stabilną i bezpieczną dla środowiska. Zdaniem wielu autorów Polska należy do krajów posiadających bogate zasoby wód geotermalnych o niskiej i średniej entalpii (Igliński et al., 2010; Kapuściński i Rodzoch, 2010; Bujakowski, 2015; Kaniuczak et al., 2016; Hajto, 2018). Pod względem ekonomicznym

szczególnie interesujące wydaje się wykorzystanie istniejącej infrastruktury w postaci adaptacji opuszczonych odwiertów naftowych do celów eksploatacji ciepła geotermalnego (*vide* Barbacki, 2000; Bu et al., 2012; Templeton et al., 2014; Uliasz-Misiak i Dubiel, 2015; Tomaszewska et al., 2018; Zhu et al., 2019; Tran et al., 2020; Kudrewicz et al., 2022).

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań związanych z rozpoznaniem budowy geologicznej oraz warunków złożowych utworów węglanowych górnej jury pod kątem możliwości eksploatacji energii geotermalnej w rejonie zlokalizowanym na południowy wschód od Tarnowa. Wyniki te uzyskano na podstawie wnikliwej inwentaryzacji dostępnych danych otworowych oraz szczegółowej interpretacji połączonych danych sejsmicznych 3D i 2D.

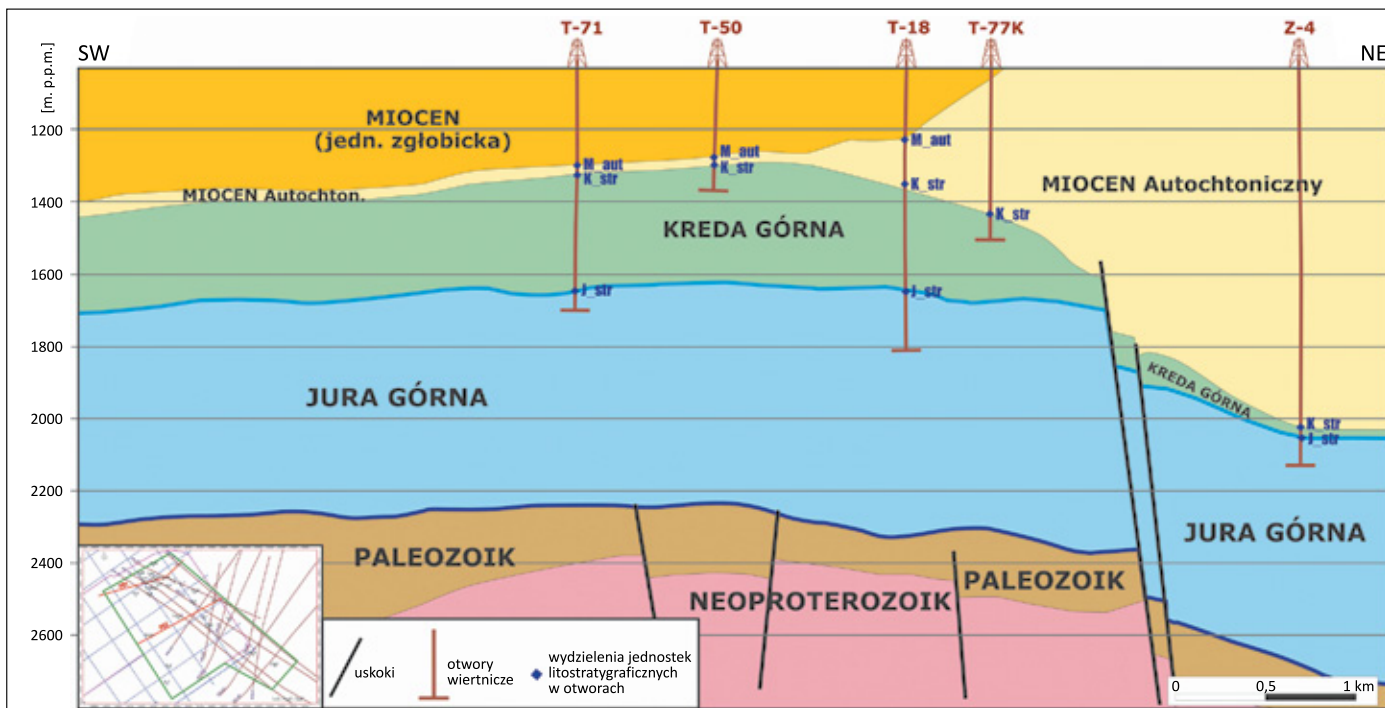
Charakterystyka geologiczna rejonu badań

Obszar badań usytuowany jest w południowej części zapadliska przedkarpackiego i brzeżnej części Karpat, a w odniesieniu do najstarszych pięter strukturalnych – na obszarze bloku małopolskiego (rysunek 1).



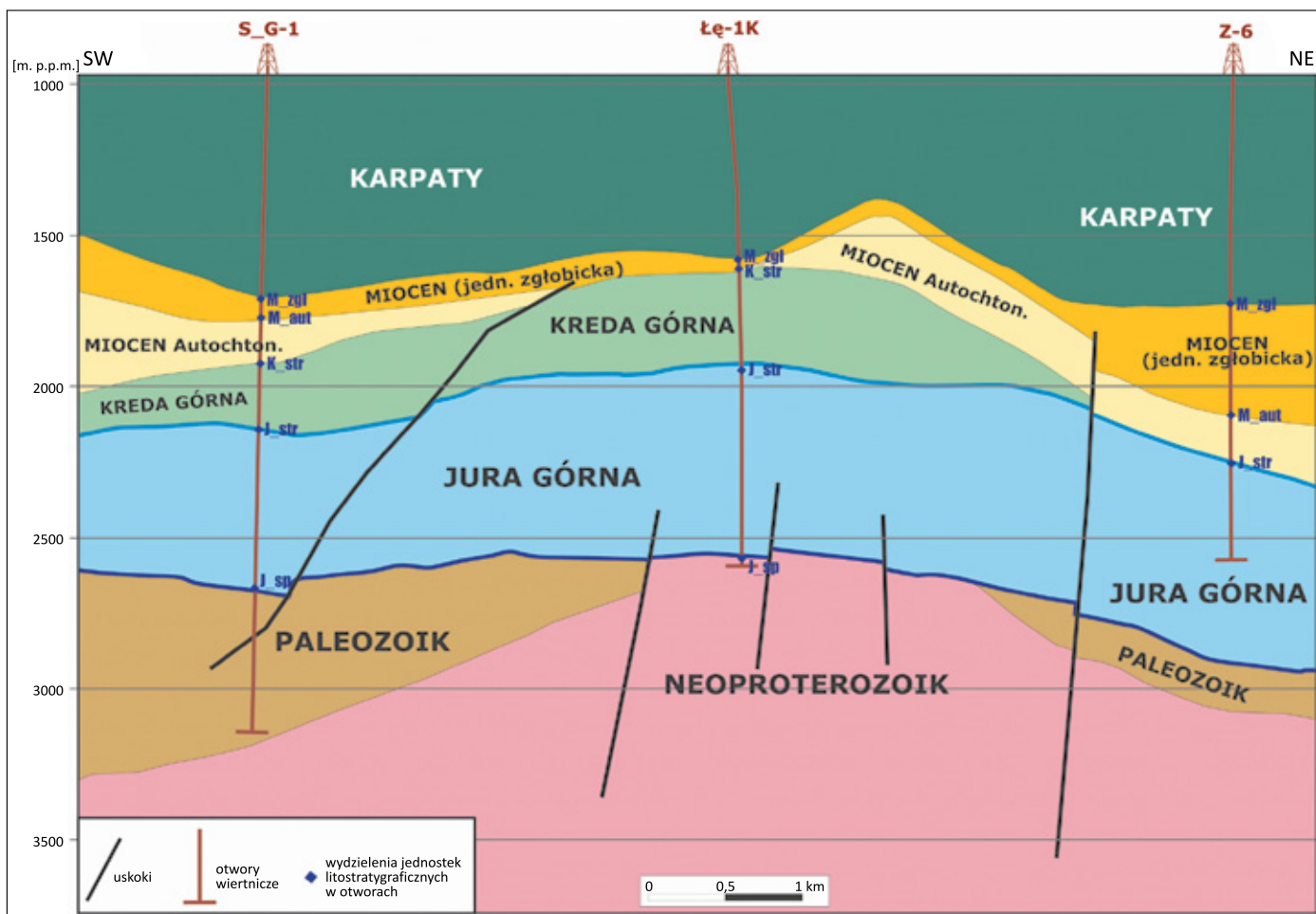
Rysunek 1. Lokalizacja obszaru badań na tle głównych jednostek tektonicznych Polski pod pokrywą permsko-mezozoiczną i kenozoiczną (według Żelaźniewicza et al., 2011, uzupełnione)

Figure 1. Location of the study area against the main tectonic units of Poland under the Permian-Mesozoic and Cenozoic cover (according to Żelaźniewicz et al. 2011, modified)



Rysunek 2. Przekrój geologiczny (PG1) w rejonie Tarnowa (część północna obszaru badań)

Figure 2. Geological cross-section (PG1) in the area of Tarnów (northern part of the study area)



Rysunek 3. Przekrój geologiczny (PG2) w rejonie Tarnowa (część środkowa obszaru badań)

Figure 3. Geological cross-section (PG2) in the area of Tarnów (central part of the study area)

W profilu geologicznym obszaru badań występują utwory różnego wieku, poczynając od czwartorzędu aż po neoproterozoik (rysunki 2, 3). Informacje dotyczące głębszego podłoża (tj. utworów neoproterozoiku oraz paleozoiku) są na ogół dosyć skąpe i uzyskiwane były przede wszystkim na podstawie interpretacji badań sejsmicznych 2D i 3D, jak również z pojedynczych głębokich otworów wiertniczych.

Najstarsze utwory rozpoznane w otworach wiertniczych na obszarze bloku małopolskiego to seria skał anchimetamorficznych zaliczanych do ediakaru (vide Buła et al., 2008; Jachowicz-Zdanowska, 2011), reprezentowana głównie przez sekwencję skał drobnoklastycznych silnie zdiagenezowanych i w niewielkim stopniu przeobrażonych procesami metamorfizmu regionalnego.

Utwory paleozoiku w obszarze badań reprezentowane są głównie przez dewon i karbon, lokalnie stwierdzono również występowanie utworów syluru (Moryc, 2006, Buła i Habryn, 2008). Utwory syluru reprezentowane są przez serię ciemnoszarych i szarozielonkawych łupków i mułowców z fauną graptolitową i niekiedy wkładkami margli. Utwory dewonu dolnego, o miąższości rzędu kilku do kilkunastu metrów, to kompleks złożony z przeławicających się iłowców, mułowców i piaskowców, a znacznie rzadziej wkładek zlepieńców o słabym stopniu wysortowania. Zasadniczą część profilu paleozoiku stanowi kompleks utworów węglanowych, zaliczanych do środkowego–górnego dewonu i dolnego karbonu, reprezentowany przez szarobeżowe, brunatne, rzadziej różowawe wapienie dolomityczne i dolomity, często organodetrytyczne i amfiporowe, z przewarstwieniami margli, margli dolomitycznych i wapieni marglistych. W niższej części profilu tego kompleksu węglany są często zailone lub też występują cienkie wkładki skał ilastych.

Zasięg utworów triasu jest silnie zróżnicowany i znacznie ograniczony (Moryc, 1971, 2014; Urbaniec et al., 2013, 2020), gdyż utwory te w dużym stopniu objęte zostały procesami erozji. W omawianym rejonie utwory triasu występują głównie w osiowej strefie rowu tektonicznego Wojnicza (Urbaniec et al., 2021a), gdzie jak dotąd pozostają w zasadzie nierozpoznane wiertniczo i interpretowane są przede wszystkim na podstawie analizy obrazu sejsmicznego. Reprezentują one przypuszczalnie trias dolny, który na obszarze przedgórze Karpat rozwinięty jest w facjach klastycznych, ilasto-piaszczystych, a lokalnie także zlepieńcowych.

Kompleks jurajski reprezentowany jest głównie przez węglanową serię górnej jury o dosyć zmiennej miąższości. Ponadto w SE części obszaru badań występują również osady klastyczne jury środkowej. Profil węglanowej serii jury górnej, uznawanej za najbardziej perspektywiczną pod względem zasobów wód geotermalnych w analizowanym rejonie, rozpoczyna kompleks mikrytowych osadów wapienno-marglistych, dosyć dobrze

udokumentowanych mikrofaunistycznie, określane jako seria gąbkowo-globuligerinowa (Gutowski et al., 2007). Wyżej w profilu utworów jury górnej występuje silnie zróżnicowana facjalnie i litologicznie seria osadów wapiennych, dolomitycznych i marglistych o bardzo dużej miąższości. W obrębie tego kompleksu, biorąc pod uwagę kryteria litofacjalne, wyróżniono kilka litofacji (Gutowski et al., 2007; Urbaniec, 2021): detrytycznych wapieni gąbkowych, biohermową, marglisto-wapienną oraz koralowcowo-onkolitową. Wyżej w profilu występują utwory zaliczone do serii muszłowcowo-oolitowej dolnej, reprezentowane przez płytkowodne osady węglanowe, w tym charakterystyczne wapienie organodetrytyczne, oolitowe, onkolitowe i muszłowce.

Najmłodszy kompleks osadowy mezozoiku w obszarze badań reprezentują utwory górnej kredy (turonu i senonu), wykształcone w postaci pelitycznych wapieni z bułami i soczewkami czarnych krzemieni, przechodzących ku górze w monotonną pod względem litofacjalnym serię osadów węglanowych, takich jak margle, wapienie margliste i gezy. Utwory te generalnie osadzały się w dość dużym przedziale czasowym – od turonu po mastrycht (Heller i Moryc, 1984; Urbaniec et al., 2021b).

Znaczną masę osadów miocenu autochtonicznego w obszarze badań stanowią klastyczne utwory zaliczane do formacji skawińskiej (Urbaniec et al., 2021a), reprezentowane przez serię iłowców i mułowców, miejscami marglistych, z przeławiczeniami piaskowców. Utwory te zalegają transgresywnie na różnych ogniwach stratygraficznych i przykryte są na ogół przez utwory siarczanowe. Ich miąższość jest silnie zróżnicowana. W sąsiedztwie brzegu Karpat i w paleodolinach miąższość utworów formacji skawińskiej znacznie wzrasta, nawet do ponad 1000 m (Urbaniec et al., 2021a). Wiek utworów formacji skawińskiej na podstawie badań nanoplanktonu wapiennego określono na wczesny baden, a jej najwyższej części nawet na wczesny serrawal (późny baden) (Andreyeva-Grigorovich et al., 1999, 2003).

Wyżej w profilu zalega seria ewaporatowa badenu, której geneza związana jest z tzw. badeńskim kryzysem salinarnym. W płytszej części basenu ewaporacyjnego miała miejsce sedymentacja utworów siarczanowych (gipsów i anhydrytów), natomiast w głębszej partii basenu ewaporacyjnego, usytuowanej bardziej na południe, tj. wzdłuż ówczesnego brzegu Karpat, dominowała sedymentacja facji chlorkowej (Peryt et al., 1998; Bąbel, 2004, 2005; Bukowski, 2011). Utwory siarczanowe zaliczane są do formacji z Krzyżanowic, a utwory chlorkowe do formacji z Wieliczki (Alexandrowicz et al., 1982; Olszewska, 1999). Zgodnie z badaniami nanoplanktonu wapiennego ewaporaty występują w dolnej części poziomu NN6, a tym samym ich wiek szacowany jest na późny baden (Gaździcka, 1994; Peryt, 1999).

Zróznicowany pod względem litologicznym i facjalnym kompleks utworów silikoklastycznych zalegających powyżej serii ewaporatowej w całości zaliczany jest do formacji z Machowa (Alexandrowicz et al., 1982). Jej wiek datuje się najczęściej na późny baden i sarmat (Oszczypko, 1998; Olszewska, 1999; Dziadzio et al., 2006; Garecka i Olszewska, 2011; Oszczypko-Clowes et al., 2012).

Wzdłuż czoła Karpat występuje stosunkowo wąska strefa zbudowana z utworów miocenu sfałdowanego, w której obrębie wyróżnia się jednostkę stebnicką oraz pasmo łusek zgłobickich (Kotlarczyk, 1985; Połtowicz, 1997, 2004; Żelaźniewicz et al., 2011). Jednostki te tworzą rodzaj wąskiego, zapadającego na południe klina, a ich powierzchnie odklucia związane są najczęściej z dolno- i środkowomiocenijskimi osadami chemicznymi (Oszczypko, 2006). W obszarze badań występują głównie utwory zaliczane do jednostki zgłobickiej, które w generalnym ujęciu stanowią serię osadów klastycznych (lokalnie również ewaporatowych) badenu i sarmatu dolnego o zróżnicowanym stopniu deformacji, przynajmniej częściowo przemieszczonych i nasuniętych na autochtoniczne osady tego samego wieku (Połtowicz, 1997, 2004).

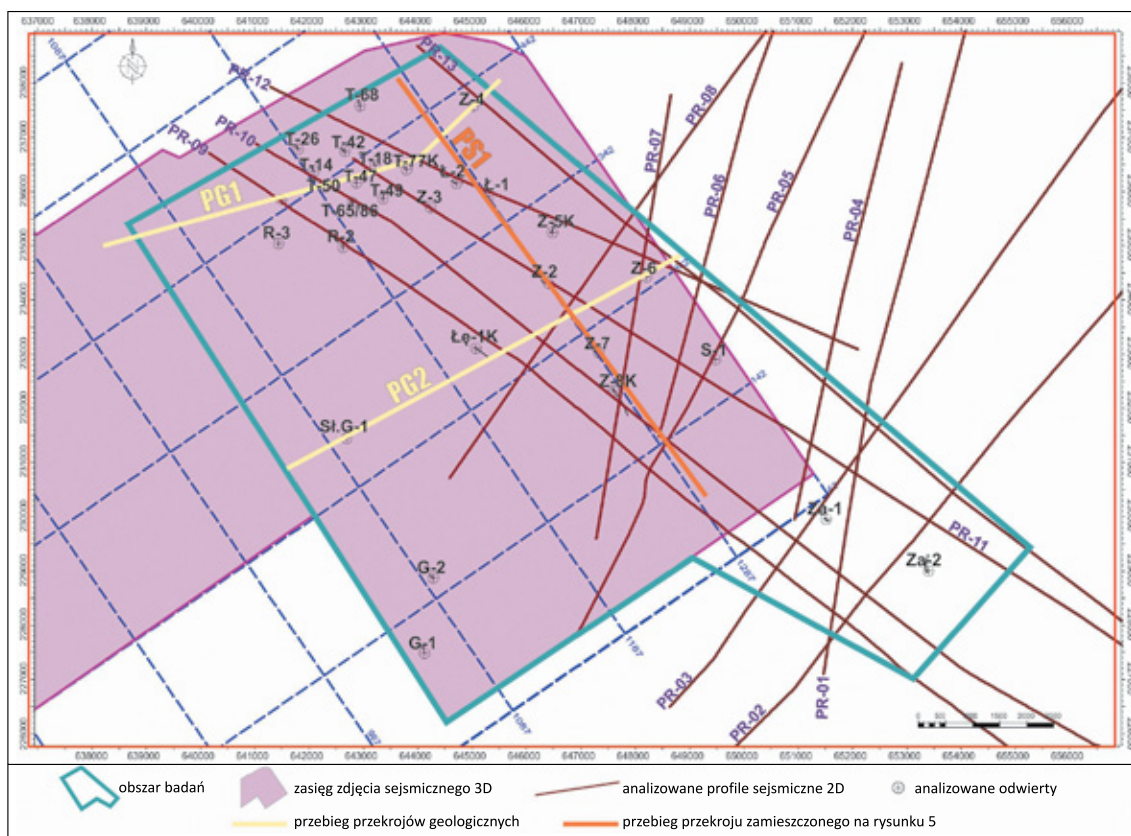
Profil litostratygraficzny w obszarze badań kończą utwory zaliczane do trzech jednostek tektonicznych Karpat zewnętrznych: śląskiej, podśląskiej i skolskiej (Żytko et al., 1989). Pod

względem litologicznym utwory te reprezentowane są głównie przez piaskowce, mułowce, łupki oraz margle, należące do kilku ogniw litostratygraficznych od górnej kredy po oligocen, z największym udziałem warstw inoceramowych, hieroglifyowych i krośnieńskich (w SE części obszaru badania całkowita miąższość tych utworów osiąga około 2900 m).

Dane sejsmiczne i otworowe

W celu lepszego odzwierciedlenia budowy geologicznej utworów mezozoiku w analizowanym obszarze badań konieczne było połączenie interpretacji zdjęcia sejsmicznego 3D z interpretacją przylegających od strony wschodniej i południowo-wschodniej profili sejsmicznych 2D (rysunek 4). Do interpretacji strukturalnej wykorzystano dane sejsmiczne pochodzące z dwóch tematów sejsmicznych, tj. zdjęcia sejsmicznego 3D z roku 1997, przetworzonego ponownie w Geofizyce Kraków SA w roku 2007, oraz 13 profili sejsmicznych 2D w wersji po reprocessingu wykonanym w roku 2016 (rysunek 4).

Lokalizację otworów wiertniczych na tle zasięgu interpretacji danych sejsmicznych 2D i 3D przedstawiono na rysunku 4. Bezpośrednio w obszarze interpretacji zlokalizowanych jest 36



Rysunek 4. Lokalizacja obszaru badań na tle zasięgu zdjęcia sejsmicznego 3D, profili 2D oraz analizowanych głębokich otworów wiertniczych

Figure 4. Location of the study area on the background of the 3D seismic survey, 2D seismic sections and analyzed deep wells

otworów wiertniczych dowiercających co najmniej do utworów mezozoicznych. Rozmieszczenie otworów w obrębie obszaru interpretacji jest dosyć nierównomierne, największe ich zagęszczenie znajduje się w części północnej interpretowanego rejonu, jednak są to odwierty płytsze, kończące wiercenie w utworach kredy górnej lub co najwyżej w przystropowej partii kompleksu jurajskiego. W części południowej obszaru badań zlokalizowane są pojedyncze otwory wiertnicze, jednak w większości są to odwierty głębokie, osiągające utwory paleozoiku lub neoproterozoiku.

Interpretacja strukturalna

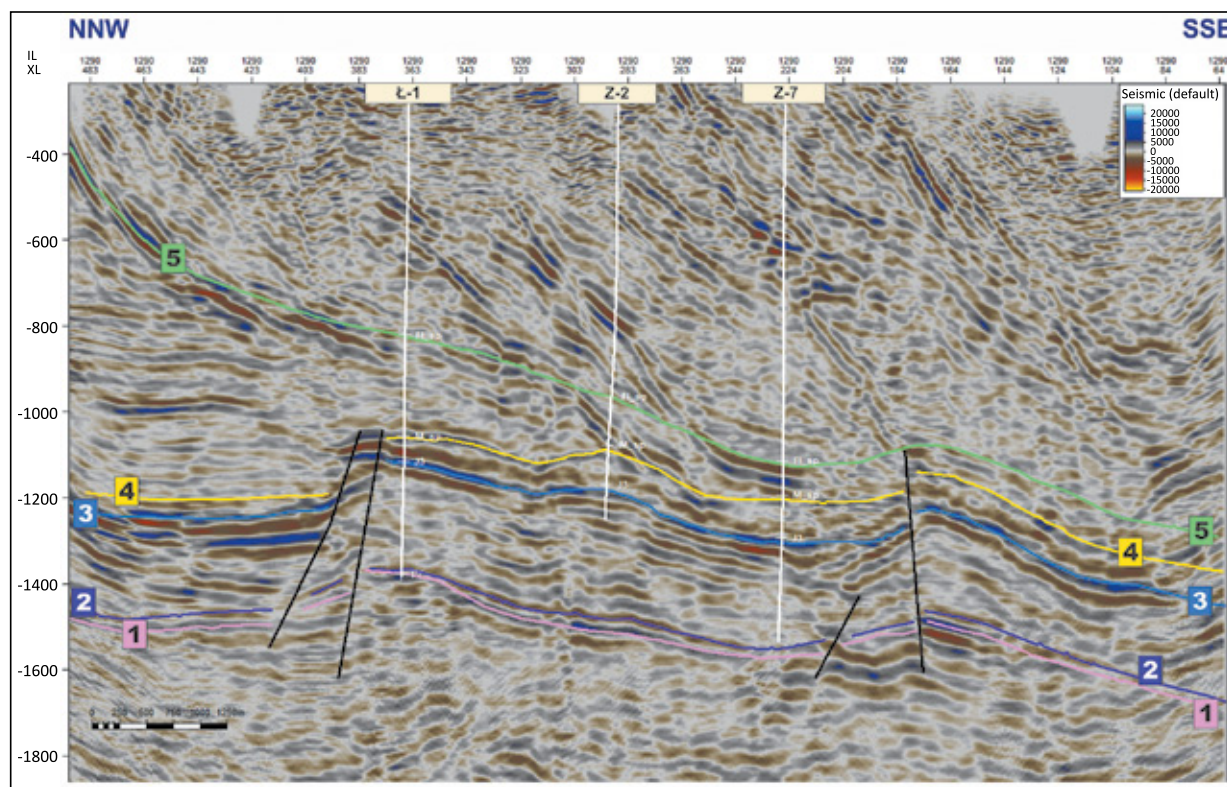
Interpretację strukturalną wykonano na danych sejsmicznych w wersji migracji czasowej po składaniu z wykorzystaniem oprogramowania Petrel firmy Schlumberger. Korelacją objęto pięć głównych regionalnych granic sejsmicznych, które dokumentują budowę geologiczną utworów wszystkich pięter strukturalnych (rysunek 5):

- spąg utworów fliszowych jednostek karpackich;
- spąg utworów miocenu;
- strop kompleksu węglanowego górnej jury – jako podstawowy horyzont do dalszych interpretacji serii zbiornikowej;

- spąg kompleksu węglanowego górnej jury (który na zdecydowanej większości obszaru, z wyjątkiem części SE, jest jednocześnie powierzchnią stropową utworów paleozoiku);
- strop neoproterozoiku.

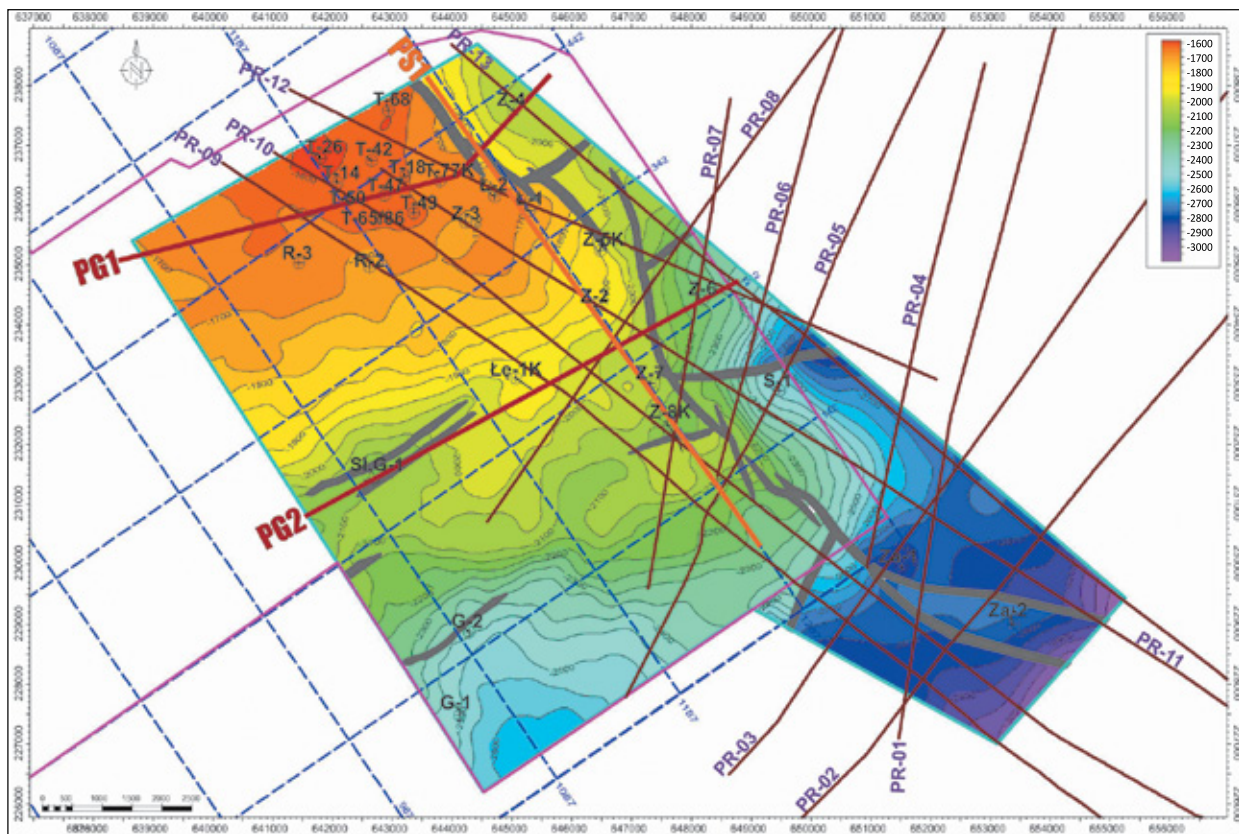
Wszystkie interpretowane granice sejsmiczne posłużyły do konstrukcji modelu prędkości na potrzeby konwersji czasowo-głębokościowej wolumenu sejsmicznego. Korelacją objęto również płaszczyzny ważniejszych dyslokacji w utworach mezozoicznych, niezbędnych do poprawnego odtworzenia budowy strukturalnej analizowanego rejonu.

Opracowane mapy strukturalne stropu i spągu utworów górnej jury (rysunki 6 i 7) stanowiły podstawę do dalszych szczegółowych analiz w kontekście wyznaczenia najbardziej perspektywicznego rejonu występowania wód geotermalnych. W generalnym ujęciu powierzchnia stropowa utworów górnej jury o charakterze erozyjnym obniża się stopniowo w kierunku południowym, poczynając od głębokości około 1600 m w części północnej do ponad 3000 m p.p.m. w strefie na SE od otworu Za-2 (rysunek 6). W planie strukturalnym tej powierzchni uwagę zwraca jej znaczne zróżnicowanie morfologiczne, przejawiające się obecnością stref obniżonych i wyniesionych, często ograniczonych powierzchniami uskokowymi. Ponadto w części wschodniej obszaru badań widoczny jest charakterystyczny i dosyć skomplikowany ciąg strukturalny (system)

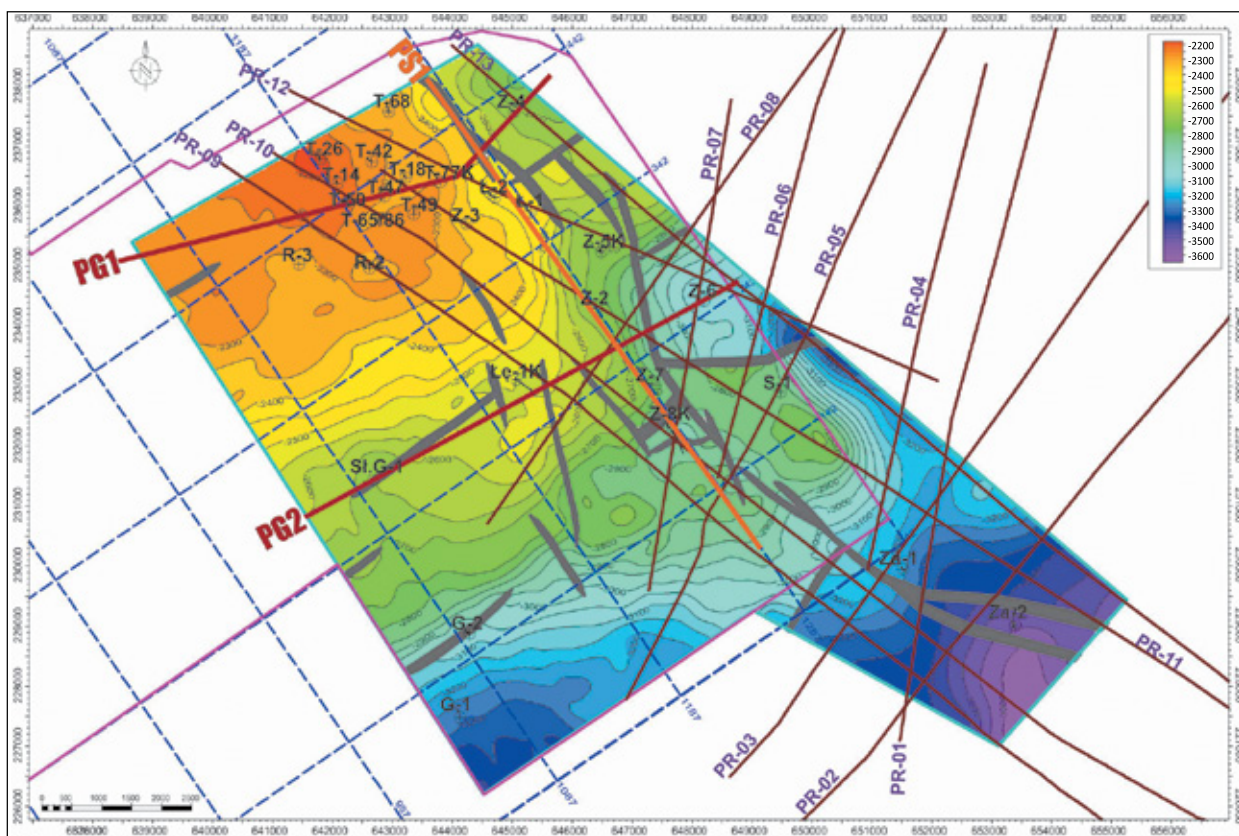


Rysunek 5. Czasowy przekrój sejsmiczny PS1 z wyinterpretowanymi granicami: 1 – strop neoproterozoiku, 2 – spąg jury górnej, 3 – strop jury, 4 – spąg miocenu, 5 – spąg jednostek karpackich

Figure 5. Seismic section PS1 in time domain with interpreted horizons: 1 – top of Neoproterozoic, 2 – base of Upper Jurassic, 3 – top of Jurassic, 4 – base of Miocene, 5 – base of Carpathian units



Rysunek 6. Mapa strukturalna stropu utworów jury górnej w obszarze badań (autorzy: K. Filipowska-Jeziorek i A. Urbaniec)
Figure 6. Depth structural map of the top of Upper Jurassic complex in the study area (authors: K. Filipowska-Jeziorek and A. Urbaniec)



Rysunek 7. Mapa strukturalna spągu utworów jury górnej w obszarze badań (autorzy: K. Filipowska-Jeziorek i A. Urbaniec)
Figure 7. Depth structural map of the base of Upper Jurassic complex in the study area (authors: K. Filipowska-Jeziorek and A. Urbaniec)

złożony z szeregu dyslokacji, w większości o przebiegu z NW na SE, które generalnie zrzucają utwory mezozoiczne w kierunku NE.

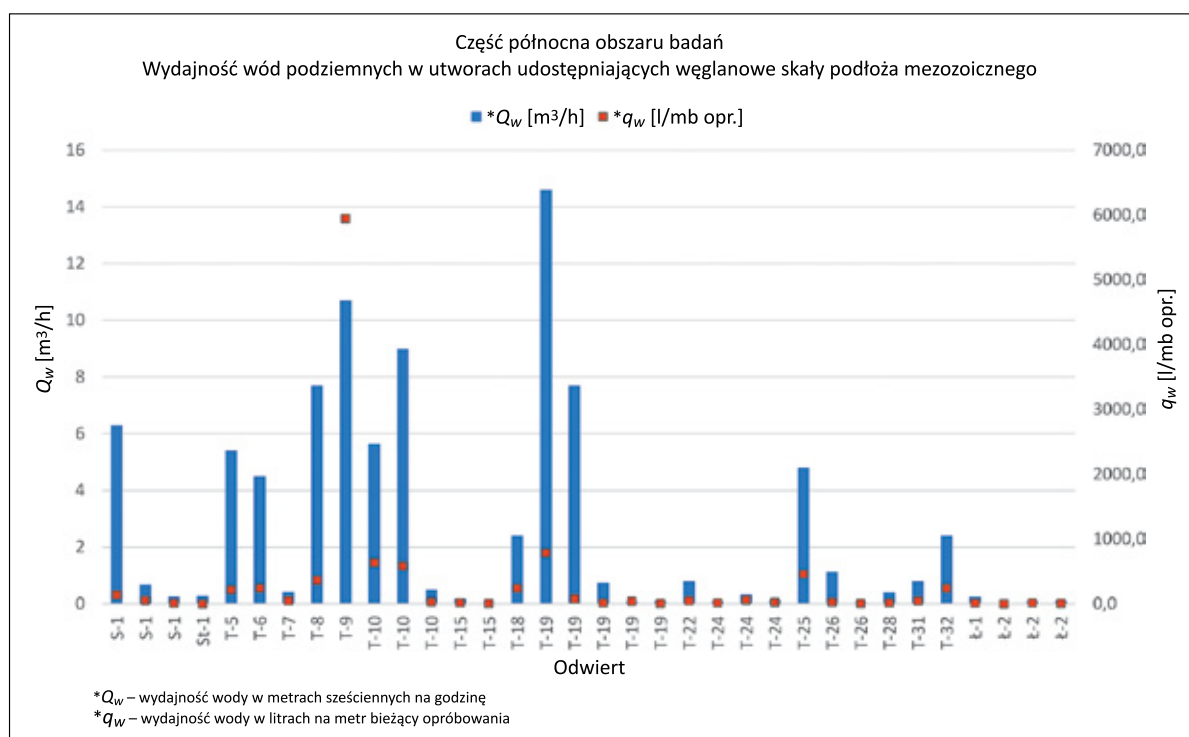
Na podstawie przeprowadzonej analizy część wschodnią obszaru badań, wraz ze wspomnianą strefą rozwoju dyslokacji, uznano za najbardziej perspektywiczną w kontekście potencjalnej eksploatacji zasobów geotermalnych. W związku z intensywnym rozwojem procesów tektonicznych można się tutaj spodziewać większego rozwoju szczelinowości, co potwierdzają wydajności przyływów solanki uzyskiwane w odwiertach zlokalizowanych w tej strefie. Co więcej, dane otworowe wskazują również na intensywny rozwój w omawianym rejonie procesów paleokrasu.

Analiza wielkości przyływów wód złożowych na podstawie wyników opróbowań w odwiertach

W rejonie badań odwiercono dotąd kilkadziesiąt otworów wiertniczych, których celem było odkrycie lub eksploatacja akumulacji węglowodorów. W większości z tych otworów próby złożowe przeprowadzono w utworach węglanowych górnej jury; w ich wyniku uzyskiwano zarówno przyływy gazu ziemnego, jak i przyływy wód złożowych. Opróbowania te wykonano zarówno w niezarurowanych odcinkach otworów (poprzez zapuszczenie próbników złoża), jak też w interwałach udostępnionych poprzez perforacje w odcinkach zarurowanych.

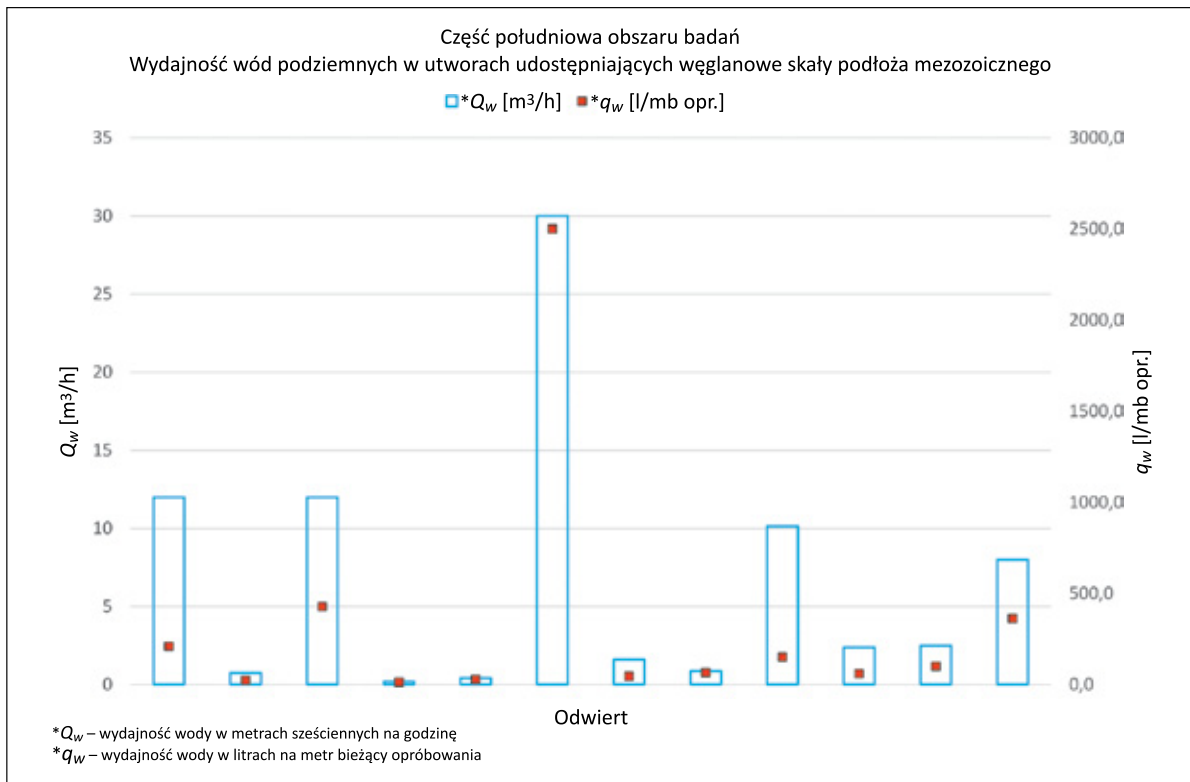
W sumie opróbowania zostały przeprowadzone w 49 otworach (wliczając w to otwory leżące również w pobliżu strefy badań), z czego dużą grupę (12 odwiertów) stanowią otwory zlokalizowane bezpośrednio w rejonie udokumentowanych złóż węglowodorów (głównie złoża T-J). Przyływy solanek o zróżnicowanych wydajnościach z utworów jury górnej, niekiedy zgazowanych lub z objawami gazu, uzyskano z 46 opróbowań wykonanych na 25 odwiertach, co zostało przedstawione na rysunkach 8 i 9. Uzyskane wydajności zawierały się w przedziale od 0,042 m³/h do 30,0 m³/h. Największe przyływy osiągnięto w przypadku odwiertów: Z-2 – 30 m³/h, Z-5K – 10,15 m³/h, T-9 – 10,7 m³/h, T-19 – 14,6 m³/h. Wśród uzyskiwanych wydajności największą grupę stanowiły wydajności poniżej 2 m³/h (38 przypadków, co stanowi ponad 58,7% wszystkich opróbowań). W grupie o wydajnościach 2–10 m³/h stwierdzono 13 opróbowań, co stanowi około 28,3% wszystkich prób. Na grupę o wydajnościach powyżej 10 m³/h składało się 6 opróbowań. Na rysunku 10 przedstawiono rozkład przestrzenny otrzymanych wydajności przyływu solanek.

Interwały miąższościowe objęte opróbowaniami w poszczególnych odwiertach były bardzo zróżnicowane i wynosiły od 1,8 m do 370 m, przy czym średnia wyniosła 29,1 m. Analiza wykazała, że najczęściej interwałów opróbowań (29) ma miąższość poniżej 20 m i stanowią one około 63% wszystkich opróbowań. Natomiast bardziej miąższe interwały opróbowań (tj. powyżej 60 m) stanowią niewiele ponad 6,5% wszystkich opróbowań.

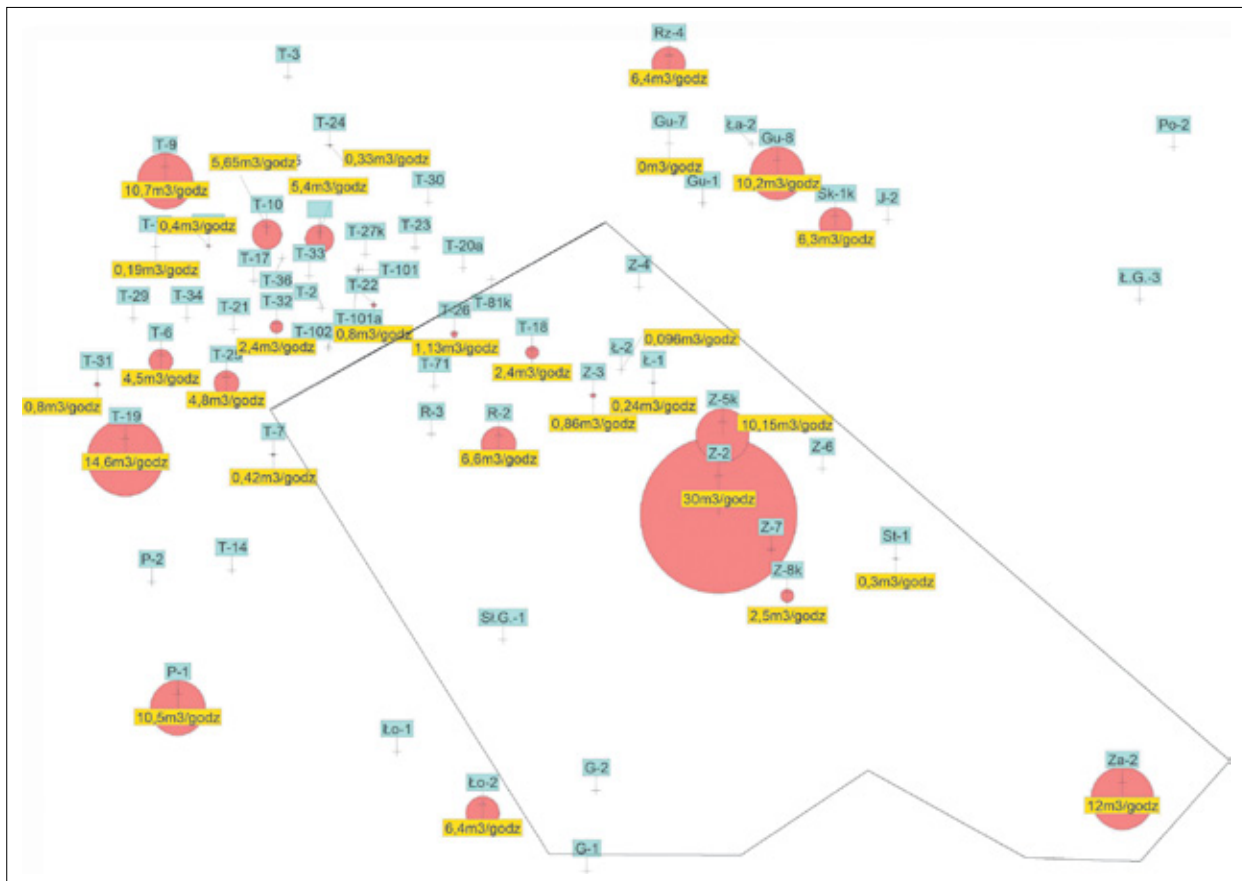


Rysunek 8. Wydajności przyływów wód złożowych w skałach podłoża mezozoicznego w części północnej obszaru badań

Figure 8. Flow rates of reservoir water in Mesozoic basement rocks in the northern part of the study area



Rysunek 9. Wydajności przyływów wód złożowych w skałach podłoża mezozoicznego w części południowej obszaru badań
 Figure 9. Flow rates of reservoir water in Mesozoic basement rocks in the southern part of the study area



Rysunek 10. Mapa wydajności przyływów wód złożowych w analizowanych odwiertach [m³/h]
 Figure 10. Map of flow rates of reservoir water in the analyzed wells

Analiza miąższości interwałów opróbowań i wydajności przyływów wykazała, że nie ma prostej zależności pomiędzy miąższością opróbowania a wydajnością przyływu wody. Przykładowo w wyniku opróbowania szerokiego interwału w otworze St-1 (370 m) uzyskano przyływ o wydajności wody zaledwie $0,28 \text{ m}^3/\text{h}$, podczas gdy w otworze T-9, w którym opróbowany interwał wynosił jedynie 1,8 m, osiągnięto wydajność $10,7 \text{ m}^3/\text{h}$. Na rysunkach 8 i 9 przedstawiono wydajności odwiertów w litrach w przeliczeniu na metr bieżący opróbowania (l/mb). Największe wartości stwierdzono w otworach T-9 ($5944,4 \text{ l/mb}$), Z-2 (2500 l/mb), T-19 (785 l/mb) oraz T-10 (634 l/mb). Wśród analizowanych otworów dominują te o wydajnościach poniżej 60 l/mb opróbowania (60% wszystkich opróbowań). Analizując z kolei usytuowanie interwałów opróbowania w stosunku do powierzchni stropowej górnej jury, można zauważyć, że usytuowanie interwału opróbowania względem stropu jury nie wpływa znacząco na uzyskiwaną wydajność. Daje się natomiast zaobserwować związek pomiędzy wydajnością a położeniem otworów względem stref uskokowych oraz stref rozwoju paleokrasu. Duże wydajności wody uzyskano w otworach położonych w pobliżu szerokiej strefy dyslokacyjnej we wschodniej części obszaru badań, takich jak: Z-5k ($10,15 \text{ m}^3/\text{h}$), Z-2 ($30 \text{ m}^3/\text{h}$), Za-1 ($12 \text{ m}^3/\text{h}$), Za-2 ($12 \text{ m}^3/\text{h}$), Z-7 ($9 \text{ m}^3/\text{h}$), Z-8K ($8 \text{ m}^3/\text{h}$).

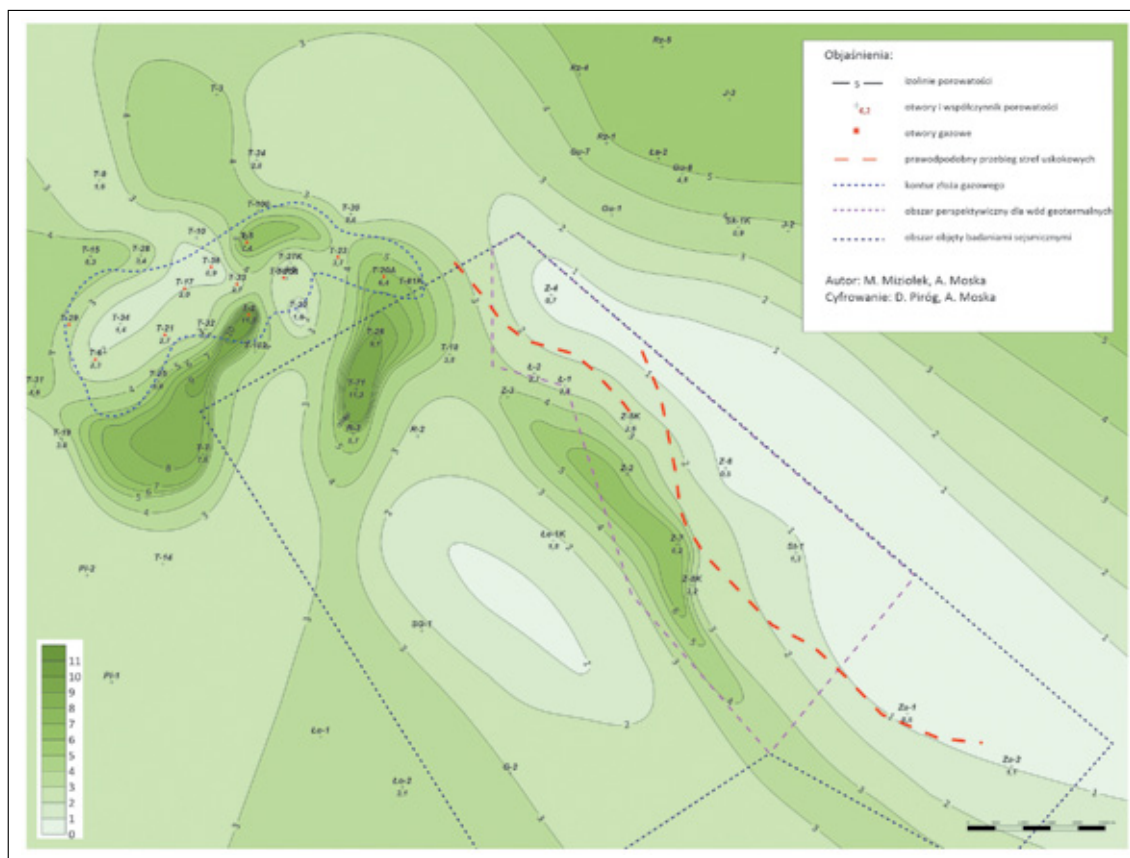
W otworach usytuowanych w partiach wyniesień strukturalnych otrzymano wydajności od $0,19 \text{ m}^3/\text{h}$ do $14,6 \text{ m}^3/\text{h}$. Natomiast w strefach skłonów, niezwiązanych ze strefami uskokowymi, osiągnęto wydajności do kilku metrów sześciennych na godzinę. Na tej podstawie można uznać, że decydujący wpływ na wielkość wydajności ma obecność szczelin, kawern czy też form paleokrasu, które nawet lokalnie mogą istotnie wpływać na zwiększenie wydajności przepływu. W niektórych przypadkach większa wydajność może być też efektem opróbowania bardziej porowatych wapieni biohermalnych lub też oolitowych.

Określenie parametrów petrofizycznych utworów górnourajskich w rejonie badań

Porowatość skał węglanowych w rejonie badań ma wieloraki i dość skomplikowany charakter (Miziołek i Filar, 2019). Można się tutaj spodziewać takich typów porowatości jak:

- porowatość intergranularna;
- porowatość szczelinowa;
- kawernistość związana ze strukturami krasowymi.

Badania porowatości laboratoryjnej skał węglanowych wykonano łącznie w 40 odwiertach, w których próbki pobierane



Rysunek 11. Mapa średnich wartości porowatości utworów górnej jury (na podstawie badań laboratoryjnych)

Figure 11. The average porosity map of the Upper Jurassic formation (calculated on the basis of laboratory measurements)

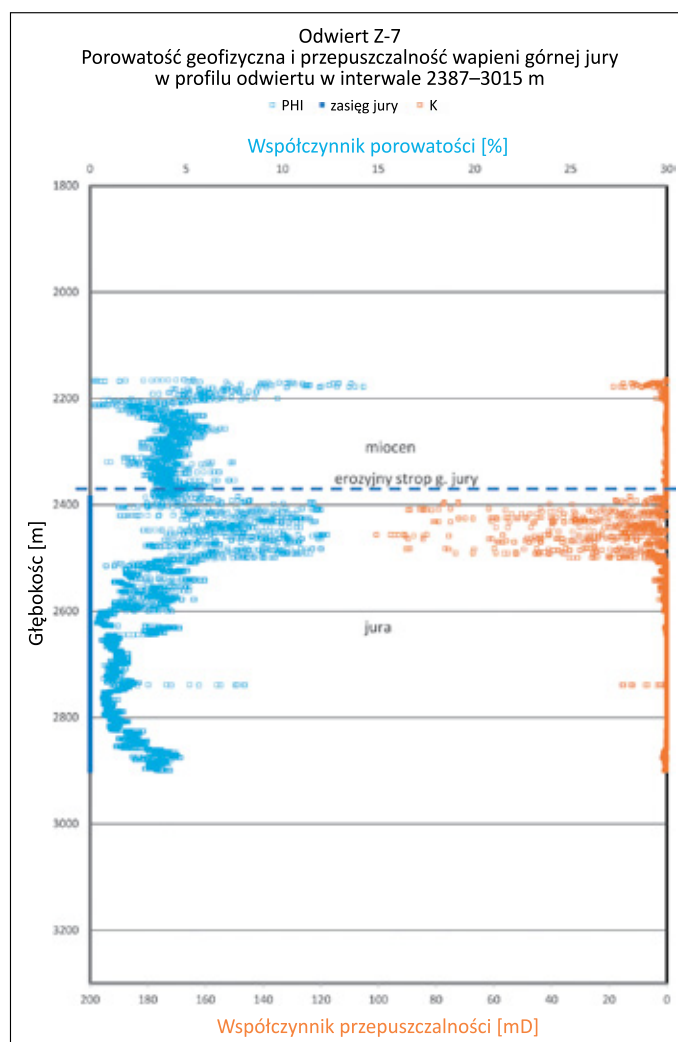
były z różnych interwałów górnej jury, przy czym większość pobrana została z wyższej części jej profilu. W przypadku poszczególnych próbek porowatość zmieniała się generalnie w zakresie od 0,0% do 25,46%, a obliczona średnia porowatość dla poszczególnych otworów kształtowała się w zakresie od 0,46% do 11,48%.

Analiza interwałów opróbowań i wartości porowatości wskazuje, że największe porowatości są związane z przystropową częścią profilu utworów górnej jury, co należy wiązać z rozwojem procesów szczelinowatości oraz zjawiskami krasowymi, podobnie jak w innych rejonach przedgórzia Karpat (Miziołek i Filar, 2019; Miziołek et al., 2022). Przestrzenny rozkład obliczonych średnich porowatości przedstawiono na rysunku 11. Najwyższe wartości porowatości występują w rejonie złoża węglowodorów T-J, gdzie można spodziewać się porowatości rzędu 4–11%. Wyższych wartości porowatości, rzędu 3–6%, można też spodziewać się w strefie wyniesienia strukturalnego o przebiegu z NW na SE, pomiędzy Z-3 a Z-8. Najniższe wartości porowatości (1–2%) należy wiązać ze strefą obniżenia strukturalnego, zlokalizowanego w SE części obszaru badań.

Należy podkreślić, że zarówno porowatość szczelinowa, jak i kawernistość w skałach węglanowych najczęściej nie są ujmowane w wartościach porowatości uzyskiwanych z analiz laboratoryjnych. W związku z tym, uwzględniając obecność szczelin i form krasowych, wartości tych porowatości należałoby zwiększyć o około 2 punkty procentowe. Na rysunku 12 przedstawiono przykład rozkładu porowatości w profilu utworów górnej jury w otworze Z-7 uzyskany na podstawie interpretacji profilowań geofizyki otworowej. Taki rozkład porowatości w profilu pionowym jest typowy dla utworów jurajskich w analizowanym rejonie. W wyższej części profilu utwory węglanowe jury charakteryzują się największą porowatością ze względu na obecność kawern i szczelin. Ku dołowi profilu porowatość związana z procesami wietrzeniowo-krasowymi ulega zmniejszeniu, natomiast obecna jest porowatość pierwotna lub epigenetyczna (związana np. z procesami dolomityzacji), która jednak jest zazwyczaj niewielka.

Przepuszczalność skał węglanowych

Przepuszczalność skał węglanowych wyznaczona metodami laboratoryjnymi charakteryzowała się bardzo dużą zmiennością (co jest typowe dla tego rodzaju skał) i wynosiła od 0 do blisko 825 mD. W większości przypadków w próbkach stwierdzano brak przepuszczalności, natomiast w pozostałych kształtowała się ona na poziomie kilku lub kilkunastu milidarcy. Sporadycznie w niektórych próbkach, zwłaszcza w przypadku obecności szczelin, przepuszczalność rosła do większych wartości, jak np. w otworze Ł-1, w którym stwierdzono 824,9 mD. Przepuszczalność interpretowana z danych geofizycznych



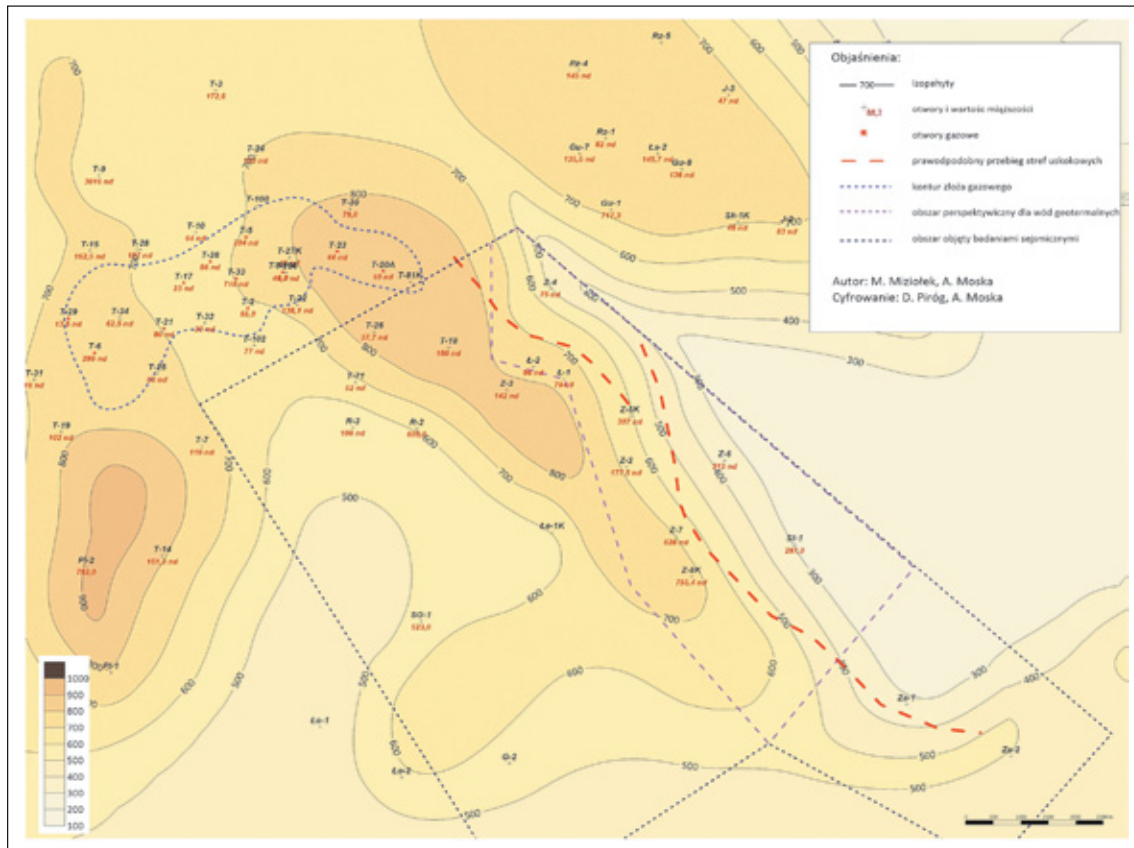
Rysunek 12. Współczynnik porowatości geofizycznej i przepuszczalności w profilu utworów jury górnej w odwiercie Z-7

Figure 12. The geophysical porosity and permeability coefficient in the Upper Jurassic profile, in the Z-7 well

zawierała się w przedziale od 0,1 mD do 13,6 mD, jednak nie uwzględnia ona przepuszczalności związanych z występowaniem szczelin i większych struktur krasowych. W strefach zeszczelinowań i rozwoju paleokrasu, a także w obrębie wapieni biohermalnych oraz rafowych można spodziewać się zdecydowanie wyższych wartości przepuszczalności, rzędu kilkuset milidarcy, a nawet kilku darcy.

Mięszkość utworów górnej jury

Mięszkość utworów górnej jury w rejonie badań charakteryzuje się dosyć dużą zmiennością (rysunek 13). Wyraża się ona wyraźnym wzrostem miąższości w części północno-wschodniej obszaru badań (od 600 m do blisko 800 m) oraz redukcją miąższości w części zachodniej i południowo-wschodniej do blisko 400 m w rejonie otworu SG-1 oraz około 300 m w rejonie otworu St-1, gdzie utwory te zostały w dużej części usunięte erozyjnie.



Rysunek 13. Mapa miąższości utworów węglanowych górnej jury

Figure 13. The thickness map of the Upper Jurassic carboniferous formation

Temperatury wód złożowych

Do analiz wykorzystano głównie wgłębne pomiary temperatur złożowych wykonane podczas opróbowania otworów, gdyż autorzy nie dysponowali ciągłymi profilowaniami temperatury w odwiertach. Punktowe pomiary temperatury wykonano w większości w otworach z rejonu udokumentowanego złoża gazu ziemnego, zarówno w strefie nasyconej gazem (w 9 otworach), jak i w strefie zawodnionej (w 2 otworach). W strefie gazowej temperatury wynosiły od 55,85°C do 58,85°C (w interwale 1655–1760 m). Natomiast w strefie zawodnionej pomierzone temperatury wynosiły 56°C i 61°C – na głębokościach odpowiednio 1833 m i 1791,5 m. Obliczona średnia temperatura złożowa wynosi 57,5°C. Poza obszarem złoża pomiary wykonano jedynie w 3 otworach, w których z różnych głębokości uzyskano temperatury: 54°C (T-31, głębokość 1870,6 m), 64°C (Z-4, głębokość 2400 m) oraz 74,42°C (Z-7, głębokość 2618 m).

Na podstawie dostępnych pomiarów temperatury obliczony został stopień geotermiczny. Do jego wyznaczenia przyjęto następujące parametry: h – głębokość stałych temperatur (przyjęto 20 m), T_{sr} – temperatura 9,1°C (na głębokości 20 m), wykorzystując następujące wzory:

$$T = T_{sr} + (H - h) \cdot g \quad (1)$$

gdzie:

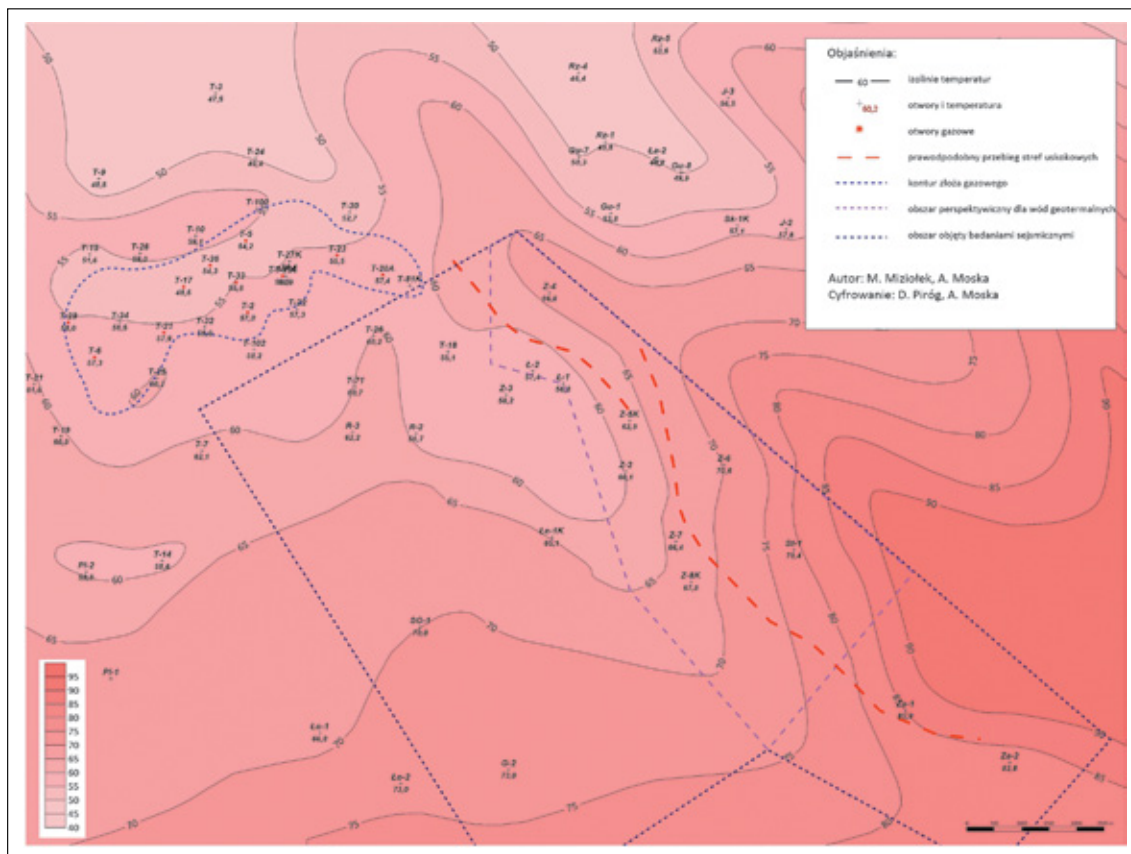
T – temperatura wody na głębokości H [°C],
 T_{sr} – średnia roczna temperatura powietrza [°C],
 H – głębokość występowania poziomu wodnego [m],
 h – głębokość strefy stałych temperatur [m],
 g – stopień geotermiczny [m],

stąd:

$$g = (H - h) / (T - T_{sr}) \quad (2)$$

W rejonie złoża gazu stopień geotermiczny w strefie zawodnionej zawierał się w przedziale od 33,9 m do 38,7 m (wartość średnia wynosi 35,4 m). W przypadku pozostałych otworów obliczony stopień geotermiczny był wyższy i wynosił od 39,8 m do 42,8 m, a średni 41,3 m (a więc o 17% wyższy od stopnia geotermicznego z rejonu złoża). Obliczone stopnie geotermiczne wykorzystano do kalkulacji prawdopodobnej temperatury w pozostałych otworach nawiercających utwory górnej jury. Do obliczeń temperatury wykorzystano wzór (1). Mając na uwadze zróżnicowany stopień geotermiczny, przyjęto zasadę, że w przypadku otworów z rejonu złoża do obliczeń zostanie zastosowana wartość 35,4 m, natomiast w przypadku pozostałych otworów: 41,3 m.

Wyniki obliczeń temperatury wykorzystano do konstrukcji mapy temperatur w stopie utworów węglanowych górnej jury (rysunek 14).



Rysunek 14. Mapa rozkładu temperatur wód geotermalnych w rejonie badań obliczonych na podstawie stopni geotermicznych
Figure 14. The map of the temperature distribution of the geothermal waters in the study area, calculated on the basis of geothermal degrees

Rozkład temperatur obliczony na podstawie przyjętych stopni geotermicznych przedstawia się następująco: w rejonie złoża gazu wody geotermalne w stropowej partii górnej jury mają temperatury w zakresie od około 48°C do 60°C. W obszarze tym temperatury 45–60°C odpowiadają zakresowi głębokości 1350–1800 m p.p.m. Wyższe temperatury, w zakresie 60–100°C, występują na nieco większych głębokościach, rzędu od 1600 m do 2900 m p.p.m. Reasumując, należy stwierdzić, że temperatura wód geotermalnych w rejonie badań wzrasta w kierunku S i SE zgodnie z trendem zapadania stropu utworów górnej jury.

Skład chemiczny wód złożowych

W rejonie badań wykonywane były liczne analizy wód złożowych. Wody znajdujące się w utworach górnej jury w północno-zachodniej części obszaru badań charakteryzują się mineralizacją w zakresie od 83,7 g/l do 222,35 g/l. Ciężar właściwy wód złożowych zmienia się w przedziale 1,06–1,20 g/cm³. W rejonie złoża gazu średnia mineralizacja wód złożowych wynosi 104,85 g/l, a średni ciężar właściwy 1,07 g/m³.

W składzie chemicznym dominują jony: Cl⁻ (59,86 g/l) i Na⁺ (36,05 g/l), w drugiej kolejności występują jony: Ca²⁺ (3,35 g/l), SO₄²⁻ (1,87 g/l) i HCO₃⁻ (1,16 g/l), a w podrzędnych ilościach jony: Br⁻ (0,12 g/l), Fe³⁺ (0,30 g/l), SiO₃⁻ (0,07 g/l), J⁻ (0,015 g/l).

Nieco odmienną mineralizacją oraz ciężarem właściwym charakteryzują się wody geotermalne z południowo-wschodniej części obszaru badań. Średnia mineralizacja wynosi 132,08 g/l, a ciężar właściwy 1,09 g/cm³. Skład chemiczny wód jest podobny jak w rejonie północno-zachodnim, natomiast różni się nieco zawartością poszczególnych składników. W składzie dominują jony: Cl⁻ (74,01 g/l), Na⁺ (53,74 g/l), w mniejszych ilościach występują jony: Ca²⁺ (3,54 g/l), SO₄²⁻ (1,98 g/l), HCO₃²⁻ (1,52 g/l). W ilościach podrzędnych występują jony: Mg²⁺ (0,79 g/l), Br⁻ (0,24 g/l), Fe³⁺ (0,16 g/l), SiO₃²⁻ (0,12 g/l) i J⁻ (0,02 g/l).

Wysokość mineralizacji wód geotermalnych jest istotna, gdyż w przypadku zagospodarowania wód wpływa ona na dobór materiałów do uzbrojenia otworu i urządzeń powierzchniowych mających kontakt z wodą. Duża mineralizacja utrudnia, a czasami wręcz uniemożliwia wydobycie i eksploatację gorących wód oraz podnosi koszty instalacji geotermalnych (Zięba i Grzesiak, 2010).

Charakterystyka obszaru perspektywicznego

Na podstawie przeprowadzonych analiz za najbardziej perspektywiczną w kontekście potencjalnej eksploatacji zasobów geotermalnych uznano wschodnią część obszaru badań (rysunki 11, 13, 14). Głównymi kryteriami, jakimi kierowano się przy wyborze tego obszaru, były temperatura, wydajność wody uzyskiwana w czasie opróbowań oraz obecność stref dyslokacji.

Wytypowany obszar perspektywiczny charakteryzuje się następującymi parametrami:

- skałą zbiornikową są utwory węglanowe górnej jury, w tym wapienie organodetrytyczne i biohermalne;
- miąższość całkowita serii skał zbiornikowych wynosi 300–800 m;
- głębokość stropu górnej jury zmienia się od 1650 m p.p.m. do 2900 m p.p.m.;
- porowatość intergranularna wg badań laboratoryjnych wynosi 0,5–6,2%, średnia ważona to 2,28%;
- występowanie porowatości szczelinowej i krasowej podwyższa wielkość porowatości o 2%;
- przepuszczalność skał zbiornikowych: matryca wapieni i dolomitów charakteryzuje się stosunkowo niską przepuszczalnością, sięgającą do kilkunastu miliardarcy. W wiązku z tym w przepływie wody przez górotwór główną rolę odgrywają spękania, szczeliny i uskoki, których przepuszczalność sięga od kilkuset miliardarcy do kilku darcy;
- zakres temperatur w stropie utworów górnej jury powinien zawierać się w przedziale ok. 57–90°C;
- ciśnienie złożowe wg wyników opróbowań skał górnej jury zmienia się w zakresie od 15,19 MPa do 32,89 MPa w zależności od głębokości opróbowania;
- wydajność wody uzyskana z odwiertów zawiera się w przedziale 0,09–30 m³/h;
- mineralizacja wód złożowych zmienia się w zakresie 83,7–222,35 g/l, przy średniej 132,08 g/l;
- w składzie chemicznym wód geotermalnych dominują jony Cl⁻, Na⁺, w drugim rzędzie występują jony Ca²⁺, SO₄²⁻, HCO₃⁻;
- w wytypowanym obszarze obecne są liczne strefy uskoku, stwarzające możliwość uzyskania dużych przyływów wód geotermalnych.

Analizowane utwory górnej jury były również wskazywane jako jeden z kilku perspektywicznych poziomów dla pozyskania wód geotermalnych przez innych autorów zajmujących się tą tematyką (np. Hajto, 2011; Papiernik et al., 2013; Bujakowski i Barbacki, 2016).

Podsumowanie i wnioski

W artykule przedstawiono wyniki analizy sejsmicznej i otworowej dla utworów jury górnej z centralnej części przedgórza Karpat w aspekcie rozpoznania ich potencjału geotermalnego. Przeprowadzona analiza geologiczno-złożowa wykazała, że skały węglanowe górnej jury są dobrym kolektorem wód geotermalnych w tym rejonie. Wydajności wód uzyskane podczas wierceń otworów naftowych sięgały od kilku do kilkudziesięciu metrów sześciennych na godzinę (maksymalnie do 30 m³/h), a wody miały temperaturę w zakresie od 54°C do 74°C i mineralizację rzędu 84–222 g/m³. Głębokość występowania tych wód zawiera się w przedziale 1650–2900 m p.p.m., a uśredniona temperatura złożowa w stropie utworów górnej jury wynosi około 70°C. Wody geotermalne w obszarze badań występują zarówno w obrębie przestrzeni porowej, jak i w szczelinach oraz strukturach związanych z paleokrasem. Najbardziej perspektywiczne do uzyskania większych wydajności są strefy uskokowo-szczelinowe oraz strefy pograżonego paleokrasu. Przeprowadzona analiza wskazuje, że warunki geologiczno-złożowe uznać można za sprzyjające w kontekście pozyskania wód geotermalnych zarówno do celów ciepłowniczych, jak i rekreacyjnych. Dużym utrudnieniem w eksploatacji może być jednak wysoka mineralizacja wód, co będzie wymagało zastosowania odpowiednich materiałów oraz dobrania sposobu wymiany i poboru ciepła z gorących wód termalnych.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Możliwości wykorzystania istniejącej infrastruktury odwiertowej dla pozyskania odnawialnej energii geotermalnej z utworów podłoża mezozoicznego w brzeżnej części Karpat*, praca INiG – PIB; nr zlecenia: 0068/SR/2022, nr archiwalny: DK-4100-0056/2022.

Literatura

- Alexandrowicz S.W., Garlicki A., Rutkowski J., 1982. Podstawowe jednostki litostratygraficzne miocenu zapadliska przedkarpackiego. *Kwartalnik Geologiczny*, 26(2): 470–471.
- Andreyeva-Grigorovich A.S., Oszczytko N., Savitskaya N.A., Ślącza A., Trofimovich N.A., 2003. Correlation of Late Badenian salts of the Wieliczka, Bochnia and Kalush areas (Polish and Ukrainian Carpathian Foredeep). *Annales Societatis Geologorum Poloniae*, 73(2): 67–89.
- Andreyeva-Grigorovich A.S., Oszczytko N., Ślącza A., Savitskaya N.A., Trofimovich N.A., 1999. The age of the Miocene salt deposits of the Wieliczka, Bochnia and Kalush areas (Polish and Ukrainian Carpathian Foredeep). *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego*, 387: 85–86.
- Barbacki A.P., 2000. The Use of Abandoned Oil and Gas Wells in Poland for Recovering Geothermal Heat. *Proceedings World Geothermal Congress, Kyushu-Tohoku, Japan*, 28.05–10.06.2000.
- Bąbel M., 2004. Badenian evaporite basin of the northern Carpathian Foredeep as a drawdown salina basin. *Acta Geological Polonica*, 54: 313–337.

- Bąbel M., 2005. Event stratigraphy of the Badenian selenite evaporites (Middle Miocene) of the northern Carpathian Foredeep. *Acta Geologica Polonica*, 55: 9–29.
- Bu X., Ma W., Li H., 2012. Geothermal energy production utilizing abandoned oil and gas wells. *Renewable Energy*, 41: 80–85. DOI: 10.1016/j.renene.2011.10.009.
- Bujakowski W., 2015. Geologiczne, środowiskowe i techniczne uwarunkowania projektowania i funkcjonowania zakładów geotermalnych w Polsce. *Studia, Rozprawy, Monografie*, 193: 1–173, Wyd. Inst. Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków.
- Bujakowski W., Barbacki A., 2016. Triasowy zbiornik wód termalnych w północnej strefie Tarnowa – parametry hydrogeotermalne i perspektywy wykorzystania. *Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk*, 92: 325–336.
- Bukowski K., 2011. Badeńska sedymentacja salinarna na obszarze między Rybnikiem a Dębicą w świetle badań geochemicznych, izotopowych i radiometrycznych. *Rozprawy i Monografie*, 236: 1–184, Wydawnictwa AGH w Krakowie.
- Buła Z., Habryn R. (red.), 2008. Atlas geologiczno-strukturalny paleozoicznego podłoża Karpat zewnętrznych i zapadliska przedkarpackiego; 1: 300000. *Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa*.
- Buła Z., Żaba J., Habryn R., 2008. Regionalizacja tektoniczna Polski – Polska południowa (blok górnośląski i małopolski). *Przegląd Geologiczny*, 56(10): 912–920.
- Dziadzio P., Maksym A., Olszewska B., 2006. Sedymentacja utworów miocenu we wschodniej części zapadliska przedkarpackiego. *Przegląd Geologiczny*, 54(5): 413–420.
- Garecka M., Olszewska B., 2011. Correlation of the Middle Miocene deposits in SE Poland and western Ukraine based on foraminifera and calcareous nannoplankton. *Annales Societatis Geologorum Poloniae*, 81: 309–330.
- Gaździcka E., 1994. Nannoplankton stratigraphy of the Miocene deposits in Tarnobrzeg area (northeastern part of the Carpathian Foredeep). *Geological Quarterly*, 38: 553–570.
- Gutowski J., Urbaniec A., Złonkiewicz Z., Bobrek L., Świątek B., Gliniak P., 2007. Stratygrafia górnej jury i dolnej kredy środkowej części przedpola polskich Karpat. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego*, 426: 1–26.
- Hajto M., 2011. Potencjał geotermalny w rejonie zewnętrznych Karpat Zachodnich. *Technika Poszukiwań Geologicznych, Geotermia, Zrównoważony Rozwój*, 91–2.
- Hajto M., 2018. Potencjał geotermalny Polski oraz możliwości adaptacji międzynarodowej klasyfikacji zasobów geotermalnych UNFC-2009. *Nafta-Gaz*, 74(12): 898–904. DOI: 10.18668/NG.2018.12.04.
- Heller I., Moryc W., 1984. Stratygrafia utworów kredy górnej przedgórza Karpat. *Biuletyn Instytutu Geologicznego*, 346: 63–108.
- Igliński B., Buczkowski R., Cichosz M., Piechota G., 2010. Technologie geoenergetyczne. Monografia. *Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, Toruń*: 1–170.
- Jachowicz-Zdanowska M., 2011. Organic microfossil assemblages from the late Ediacaran rocks of the Małopolska Block, south-eastern Poland. *Geological Quarterly*, 55(2): 85–94.
- Kaniuczak J., Nazarkiewicz M., Hajduk E., Gąsior J., Właśniewski S., 2016. Geotermia a ochrona zasobów środowiska. *Polish Journal for Sustainable Development*, 20: 77–84. DOI: 10.15584/pjsd.2016.20.9.
- Kapuściński J., Rodzoch A., 2010. Geotermia niskotemperaturowa w Polsce i na świecie. *Wydawnictwo Borgis, Warszawa*.
- Kotlarczyk J., 1985. An outline of the stratigraphy of Marginal Tectonic Units of the Carpathian Orogen in the Rzeszów–Przemyśl area. [W:] Kotlarczyk J. (ed.), *Geotraverse Kraków–Baranów–Rzeszów–Przemyśl–Komańcza–Dukla. Guide to excursion 4. XIII Congress of the Carpathian–Balkan Geological Association, Cracow, Poland*: 21–32.
- Kudrewicz R., Papiernik B., Hajto M., Machowski G., 2022. Subsalt Rotliegend Sediments – A New Challenge for Geothermal Systems in Poland. *Energies*, 15(3), 1166. DOI: 10.3390/en15031166.
- Miziołek M., Filar B., 2019. Paleokras w utworach górnej jury podłoża zapadliska przedkarpackiego i jego znaczenie złożowe. *Nafta-Gaz*, 75(6): 330–343. DOI: 10.18668/NG.2019.06.04.
- Miziołek M., Filipowska-Jeziorek K., Urbaniec A., Filar B., Łaba-Biel A., 2022. Możliwości identyfikacji stref rozwoju paleokrasu w rejonach złóż węglowodorów z obszaru przedgórza Karpat. *Nafta-Gaz*, 78(7): 485–502. DOI: 10.18668/NG.2022.07.01.
- Moryc W., 1971. Trias przedgórza Karpat środkowych. *Rocznik Polskiego Towarzystwa Geologicznego*, 41(3): 419–486.
- Moryc W., 2006. Budowa geologiczna podłoża miocenu w rejonie Kraków–Pilzno. Część I. Prekambr i paleozoik (bez permu). *Nafta-Gaz*, 62(5): 197–216.
- Moryc W., 2014. Perm i trias przedgórza Karpat polskich. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego*, 457: 43–67.
- Olszewska B., 1999. Biostratygrafia neogenu zapadliska przedkarpackiego w świetle nowych danych mikropaleontologicznych. *Prace Państwowego Instytutu Geologicznego*, 168: 9–28.
- Oszczypko N., 1998. The Western Carpathian Foredeep – development of the foreland basin in front of the accretionary wedge and its burial history (Poland). *Geologica Carpathica*, 49: 1–18.
- Oszczypko N., 2006. Powstanie i rozwój polskiej części zapadliska przedkarpackiego. *Przegląd Geologiczny*, 54(5): 396–403.
- Oszczypko-Clowes M., Lelek D., Oszczypko N., 2012. Sarmatian paleoecological environment of the Machów Formation based on the quantitative nannofossil analysis – case study from Sokołów area (Polish Carpathian Foredeep). *Geologica Carpathica*, 63(4): 267–294.
- Papiernik B., Machowski G., Hajto M., Oszczypko N., 2013. Rozdział 9. Charakterystyka podstawowych parametrów hydrotermalnych potencjalnych zbiorników wód węglnych Karpat Wschodnich. [W:] Atlas geotermalny Karpat Wschodnich. *Wydawnictwo Akademii Górniczo-Hutniczej, Kraków*.
- Peryt D., 1999. Calcareous nannoplankton assemblages of the Badenian evaporites in the Carpathian Foredeep. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego*, 387: 158–161.
- Peryt T., Jasionowski M., Karoli S., Petrichenko O.I., Poberegiński A.V., Turchinov I.I., 1998. Correlation and sedimentary history of the Badenian gypsum in the Carpathian Foredeep (Ukraine, Poland and Czech Republic). *Przegląd Geologiczny*, 46: 729–732.
- Połtowicz S., 1997. Grawitacyjna tektonika jednostki zgłobickiej między Brzeskiem a Wojniczem w świetle wyników badań sejsmicznych. *Geologia (kwartalnik AGH)*, 23(3): 307–329.
- Połtowicz S., 2004. Jednostki stebnicka i zgłobicka w budowie Karpat Polskich. *Geologia (kwartalnik AGH)*, 30(1): 85–120.
- Templeton J.D., Ghoreishi-Madiseh S.A., Hassani F., Al-Khawaja M.J., 2014. Abandoned petroleum wells as sustainable sources of geothermal energy. *Energy*, 70(1): 366–373. DOI: 10.1016/j.energy.2014.04.006.
- Tomaszewska B., Sowizdzał A., Chmielowska A., 2018. Rozważania nad koncepcją adaptacji otworów ponaftowych do celów geotermalnych – przykłady rozwiązań światowych. *Technika Poszukiwań Geologicznych, Geotermia, Zrównoważony Rozwój*, 1: 119–129.
- Tran N., Fross J., Mykleby K., Roff J., Teodoru C., 2020. The Economics of Low Enthalpy Geothermal Resources: A Case Study for Small Heat Harnessing Concept in Oklahoma. *Proceedings, 45th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California*, 10–12.02.2020, SGP-TR-216.

- Uliasz-Misiak B., Dubiel S., 2015. Problemy rekonstrukcji odwiertów geotermalnych. *Przegląd Górniczy*, 7: 55–61.
- Urbaniec A., 2021. Charakterystyka litofacyjna utworów jury górnej i kredy dolnej w rejonie Dąbrowa Tarnowska–Dębica w oparciu o interpretację danych sejsmicznych i otworowych. *Prace Naukowe Instytutu Nafty i Gazu – Państwowego Instytutu Badawczego*, 232: 1–240. DOI: 10.18668/PN2021.232.
- Urbaniec A., Bartoń R., Bajewski Ł., Wilk A., 2020. Wyniki interpretacji strukturalnej utworów triasu i paleozoiku przedgórze Karpat opartej na nowych danych sejsmicznych. *Nafta-Gaz*, 76(9): 559–568. DOI: 10.18668/NG.2020.09.01.
- Urbaniec A., Filipowska-Jeziorek K., Bartoń R., Wilk A., 2021a. Charakterystyka serii zlepieńcowo-olistostromowej z obszaru paleodoliny Szczurowej–Wojniczka na podstawie interpretacji obrazu sejsmicznego. *Nafta-Gaz*, 77(11): 709–724. DOI: 10.18668/NG.2021.11.01.
- Urbaniec A., Łaba-Biel A., Kwietniak A., Fashagba I., 2021b. Seismostratigraphic Interpretation of Upper Cretaceous Reservoir from the Carpathian Foreland, Southern Poland. *Energies*, 14(22): 7776. DOI: 10.3390/en14227776.
- Urbaniec A., Polakowski T., Sierant H., Wąsiel M., 2013. Rola utworów triasu w mezo-paleozoicznym systemie naftowym przedgórze Karpat w rejonie Dąbrowa Tarnowska–Mielec–Dębica. *Wiadomości Naftowe i Gazownicze*: 1(177): 4–7.
- Zhu Y., Li K., Liu Ch., Mgijimi M.B., 2019. Geothermal Power Production from Abandoned Oil Reservoirs Using In Situ Combustion Technology. *Energies*, 12, 4476. DOI: 10.3390/en12234476.
- Zięba Z., Grzesiak E., 2010. Wpływ składu chemicznego wody geotermalnej na koszty eksploatacji systemu ciepłowniczego w Pyrzycach. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, 8(1): 39–45.
- Żelaźniewicz A., Aleksandrowski P., Buła Z., Karnkowski P.H., Konon A., Oszczytko N., Ślącza A., Żaba J., Żytko K., 2011. Regionalizacja tektoniczna Polski. *Komitet Nauk Geologicznych PAN, Wrocław*.
- Żytko K., Zając R., Gucik S., Ryłko W., Oszczytko N., Garlicka I., Nemčok J., Eliaš M., Menčík E., Stranik Z., 1989. Map of the tectonic elements of the Western Outer Carpathians and their foreland. [W:] Poprawa D., Nemcok J. (eds.). *Geological Atlas of the Western Outer Carpathians and their foreland. Państwowy Instytut Geologiczny Warszawa/GUDŠ Bratislava/Uug Praha*.



Dr inż. Robert BARTOŃ
Adiunkt w Zakładzie Sejsmiki
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: robert.barton@inig.pl



Mgr inż. Bogdan FILAR
Starszy specjalista badawczo-techniczny;
Kierownik Zakładu Podziemnego Magazynowania Gazu
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: bogdan.filar@inig.pl



Dr Agnieszka MOSKA
Specjalista inżynierijno-techniczny w Zakładzie
Podziemnego Magazynowania Gazu
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: agnieszka.moska@inig.pl



Dr Tadeusz KWIŁOSZ
Adiunkt w Zakładzie Podziemnego Magazynowania
Gazu
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: tadeusz.kwilosz@inig.pl



Mgr Mariusz MIZIOŁEK
Starszy specjalista badawczo-techniczny w Zakładzie
Podziemnego Magazynowania Gazu
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: mariusz.mizolek@inig.pl



Dr Andrzej URBANIEC
Adiunkt; Kierownik Zakładu Sejsmiki
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: andrzej.urbaniec@inig.pl



Inż. Kinga FILIPOWSKA-JEZIOREK
Główny specjalista inżynierijno-techniczny
w Zakładzie Sejsmiki
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: kinga.filipowska-jeziorek@inig.pl