

ZNACZENIE BADAŃ PODHALAŃSKIEGO SYSTEMU GEOTERMALNEGO DLA EKSPLOATACJI WÓD GEOTERMALNYCH

STRESZCZENIE

Badania i prace związane z realizacją geotermalnego projektu ciepłowniczego przyniosły wiele nowych informacji o podhalańskim systemie geotermalnym. Wśród tych badań były m.in. studia warunków termicznych, paleotermicznych i schłodzenia wymienionego systemu podczas jego ewolucji; badania wtórnej mineralizacji diagenetycznej i hydrotermalnej; analizy stanu termodynamicznego układów wody geotermalne – skały zbiornikowe. Studia były prowadzone przy wykorzystaniu wyników badań materiału skalnego i pomiarów wykonanych w kilku otworach wiertniczych. Obejmowały one m.in. badania mineralogiczne (mikroskopowe, rentgenograficzne, określenie stopnia przeobrażenia termicznego minerału mieszanopakietowego illit – smektyt, badania homogenizacji inkluzji fluidalnych, badania mineralizacji wtórnej); badania składu chemicznego i stanu termodynamicznego wód złożowych; pomiary geofizyki wiertniczej.

Badania mają ważny aspekt poznawczy, przedstawiając wiele zagadnień wcześniej nieporuszanych lub traktowanych marginalnie. Niektóre rozważane zagadnienia i wnioski posiadają także istotne znaczenie praktyczne dla optymalnej eksploatacji złoża wód geotermalnych dla potrzeb zagospodarowania zawartego w nich ciepła.

SŁOWA KLUCZOWE

System geotermalny, temperatury, stan termodynamiczny wód, eksploatacja, Podhale

* * *

WPROWADZENIE

Od lat 1980. prowadzone są na Podhalu badania i prace inwestycyjne ukierunkowane na zagospodarowanie wód geotermalnych w ciepłownictwie i do celów rekreacyjnych (Sokołowski i in. 1992). Objęły one dotychczas:

Recenzował prof. dr hab. inż. Maciej Pawlikowski

Artykuł wpłynął do Redakcji 17.07.2009 r., zaakceptowano do druku 13.10.2009 r.

- budowę i pracę Doświadczalnego Zakładu Geotermalnego PAN Bańska – Biały Dunajec (1987–1994, od 1995 r. Laboratorium Geotermalnego IGSMiE PAN),
- budowę sieci ciepłowniczej (przez PEC Geotermia Podhalańska S.A. od 1994 r.),
- badania i monitoring złoża oraz prace nad wszechstronnym zastosowaniem ciepła geotermalnego (realizowane przez Laboratorium Geotermalne IGSMiE PAN),
- budowę pięciu ośrodków rekreacyjnych (od 2001 r., bardziej intensywnie od 2006 r.).

Dzięki wykonaniu kilku głębokich otworów oraz innym badaniom uzyskano wiele bezpośrednich danych dotyczących różnorodnych aspektów podhalańskiego systemu geotermalnego. W artykule przedstawiono wyniki niektórych badań oraz wynikające z nich wnioski mające znaczenie m.in. dla eksploatacji wód geotermalnych. Zagadnienia te zostały obszernie przedstawione w odrębnej pracy (Kępińska 2006). Dla potrzeb artykułu wykorzystano rezultaty niektórych badań systemu Podhala (np. Kępińska 2001, 2006; Cebulak i in. 2004; Pawlikowski i in. 1997; Pawlikowski, Mazurek 2000). Koncentrowały się one na materiale skalnym i pomiarach otworowych z wierceń: Poronin PAN-1, Biały Dunajec PAN-1, Biały Dunajec PGP-2, Bańska IG-1, Bańska PGP-1, Chochołów PIG-1, Furmanowa PIG-1, Bukowina Tatrzańska PIG/PNiG-1, Zakopane IG-1, Skocznia IG-1. Obejmowały one:

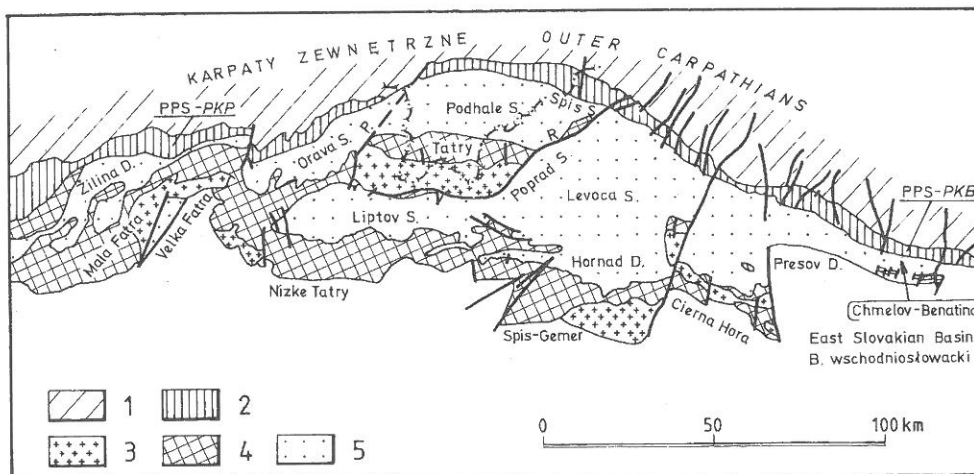
- badania i analizy warunków termicznych i paleotermicznych (w tym m.in. profilowania geofizyczne temperatur w głębinach, pomiary temperatur podczas testów złożowych, badania stopnia diagenety minerału illit-smektyt dla określenia paleotemperatur, badania inkluzji fluidalnych dla określenia temperatur ich homogenizacji),
- badania mikroskopowe i rentgenograficzne mineralizacji wtórnej z serii eocenu środkowego i triasu środkowego zawierających wody geotermalne oraz z fliszu podhalańskiego (paleogen) i mezozoicznych serii niewodonośnych,
- analizy składu chemicznego i stanu termodynamicznego wód geotermalnych.

1. PODHALAŃSKI SYSTEM GEOTERMALNY – CHARAKTERYSTYKA

Geologia. Podhalański system geotermalny jest jednym z kilku systemów o wspólnej genezie, które znajdują się w otoczeniu Tatr. Sąsiaduje z położonymi na Słowacji systemami Orawy (Skoruszyny) na zachodzie i Spiszu (Magury Spiskiej) na wschodzie. Po południowej stronie Tatr znajduje się system Liptova, a nieco dalej ku wschodowi – systemy Popradu i Levoczy (rys. 1). System budują dwa główne elementy geologiczno-strukturalne (rys. 2):

- formacja paleogenu składająca się z fliszu podhalańskiego (eocen górny – oligocen) stanowiącego pokrywę geotermalnych poziomów wodonośnych oraz z serii eocenu węglanowego (eocen środkowy – górny), która stanowi stropowy fragment skał zbiornikowych wód geotermalnych. Grubość serii paleogenu dochodzi do 2,5–3,2 km,
- formacje mezozoiczne (trias dolny – jura – kreda śr.) zawierające poziomy wód geotermalnych. Jak wykazały wiercenia, serie mezozoiczne osiągają grubość ponad 2,5 km.

Skały zbiornikowe wód geotermalnych. System zawiera kilka poziomów wód geotermalnych. Skałami zbiornikowymi są dla nich wapień i dolomity triasu, piaskowce i skały



Rys. 1. Położenie geotermalnego systemu podhalańskiego w obrębie paleogeńskiego basenu Karpat Wewnętrznych (na podstawie Sotak and Janocko 2003)

1 – Zewnętrzne Karpaty fliszowe (kreda – paleogen), 2 – pieniński pas skałkowy (jura – kreda), 3 – skały krystaliczne (paleozoik), 4 – serie osadowe (płaszczowiny) Karpat Wewnętrznych (trias, jura, kreda), 5 – paleogeński basen Karpat Wewnętrznych, P – uskoc Prosečna, R – uskoc Ružbachów, PPS – pieniński pas skałkowy

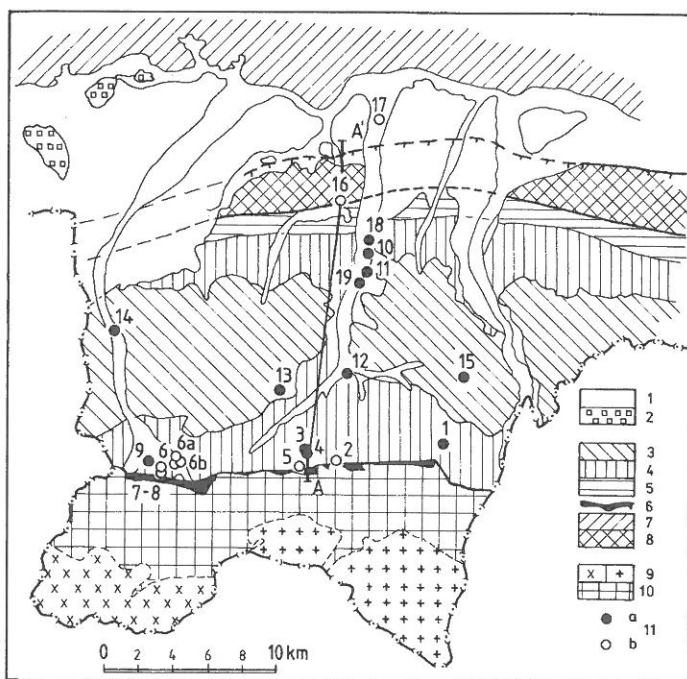
Fig. 1. Location of the Podhale geothermal system within the Central Carpathian Paleogene Basin (based on Sotak and Janocko 2003)

1 – Outer Flysch Carpathians (Cretaceous – Paleogene), 2 – Pieniny Klippen Belt (Jurassic – Cretaceous), 3 – crystalline rocks (Paleozoic), 4 – sedimentary series (nappes) of the Inner Carpathians (Triassic, Jurassic, Cretaceous), 5 – the Inner Carpathian Paleogene Basin, P – Prosečno fault, R – Ružbachy fault, PKB – Pieniny Klippen Belt

węglanowe jury oraz utwory eocenu węglanowego (Sokołowski S. 1973; Sokołowski J. i in. 1992; Małecka 1981). Skały te należą głównie do jednostek regłowych krizniańskich.

Główny podhalański poziom wód geotermalnych występuje bezpośrednio poniżej fliszu. Jest związany z wapieniami i dolomitami triasu środkowego, miejscami z piaskowcami jury jednostki regłowej krizniańskiej, a w jego stropowej partii znajdują się węglanowe utwory eocenu środkowego. Poziom ten jest rozprzestrzeniony w całym systemie i kontynuuje się na terenie Słowacji. Obniża swój strop generalnie z południa na północ, od około 1000 m p.p.t. w rejonie Zakopanego do 2050–2700 m p.p.t. w rejonie Białego Dunajca i Bańskiej. Jest on najlepiej poznany od strony geologiczno-złożowej, posiada korzystne parametry złożowe i eksploatacyjne. Jest już od kilkunastu lat eksploatowany (a w Zakopanem na Antałówce od ponad trzydziestu lat, chociaż z przerwami) i na nim bazować będzie również dalsze wykorzystanie wód i energii geotermalnej.

W systemie znajdują się też głębsze poziomy wód geotermalnych. W części przytatrzańskiej związane są z wapieniami i dolomitami triasu środkowego serii krizniańskiej oraz z podobnymi litologicznie skałami jednostki o nieustalonej przynależności (otwór Zakopane



Rys. 2. Szkic podhalańskiego systemu geotermalnego i lokalizacja otworów wiertniczych (geologia na podstawie Małeckiej 1982; lokalizacja otworów wiertniczych wg danych PIG, PAN, PEC Geotermia Podhalańska S.A.)

Otwory geotermalne: 1 – produkcyjne, 2 – chłonne, 3 – nieeksploatowane; 4 – inne odwierty
Czwartorzęd: 1 – holocen, 2 – torfowiska wysokie. Paleogen: 3 – warstwy chochołowskie, 4 – warstwy zakopiańskie, 5 – warstwy szaflarskie, 6 – eocen numulitowy; 7 – jednostka magurska (kreda – paleogen), 8 – pieniński pas skałkowy (jura – kreda). Tatry: 9 – masyw krystaliczny (paleozoik), 10 – serie osadowe (trias, jura, kreda), 11 – otwory wiertnicze: a – geotermalne, b – pozostałe. A–A' – linia przekroju (ryc. 4)

Otwory: 1. Zazadnia IG-1, 2. Jaszczurówka-1, 3. Zakopane IG-1, 4. Zakopane-2, 5. Skocznia IG-1, 6. Hruby Regiel IG-2, 6a. Hruby Regiel-2, 6b. Hruby Regiel-3, 7. Staników Żleb S-1, 8. Staników Żleb S-2, 9. Siwa Woda IG-1, 10. Bańska IG-1, 11. Biały Dunajec PAN-1, 12. Poronin PAN-1, 13. Furmanowa PIG-1, 14. Choczołów PIG-1, 15. Bukowina Tatrzańska PIG/PNiG-1, 16. Maruszyna IG-1, 17. Nowy Targ PIG-1, 18. Bańska PGP-1, 19. Biały Dunajec PGP-2

Fig. 2. A sketch of the Podhale geothermal system and location of wells (geology based on Małeczka 1982; location of wells according to the databases of PIG, PAN, PEC Geotermia Podhalańska S.A.)

Wells: 1 – production, 2 – injection, 3 – not in use; 4 – other wells
Quaternary: 1 – Holocene, 2 – high peat moss. Paleogene: 3 – Choczołów Beds, 4 – Zakopane Beds, 5 – Szaflary Beds, 6 – Nummulitic Eocene, 7 – Magura Unit (Cretaceous – Paleogene), 8 – Pieniny Klippen Belt (Jurassic-Cretaceous). The Tatra Mts.: 9 – crystalline massif (Palaeozoic), 10 – sedimentary series (Triassic, Jurassic, Cretaceous), 11 – wells: a – geothermal, b – others. A–A' – line of cross-section (fig. 4)
Names of wells: 1. Zazadnia IG-1, 2. Jaszczurówka-1, 3. Zakopane IG-1, 4. Zakopane-2, 5. Skocznia IG-1, 6. Hruby Regiel IG-2, 6a. Hruby Regiel-2, 6b. Hruby Regiel-3, 7. Staników Żleb S-1, 8. Staników Żleb S-2, 9. Siwa Woda IG-1, 10. Bańska IG-1, 11. Biały Dunajec PAN-1, 12. Poronin PAN-1, 13. Furmanowa PIG-1, 14. Choczołów PIG-1, 15. Bukowina Tatrzańska PIG/PNiG-1, 16. Maruszyna IG-1, 17. Nowy Targ PIG-1, 18. Bańska PGP-1, 19. Biały Dunajec PGP-2

IG-1; Sokołowski S. 1973). W północnej części systemu są to natomiast piaskowce i wapienie triasu jednostki reglowej niższej lub wierzchowej (?) stwierdzonej w otworze Bańska IG-1 w głębokości 4132–5261 m (Sokołowski J. 1992). Z serii tych uzyskano niewielkie przepływy wód podczas wstępnych opróbowań w trakcie wiercenia tego otworu i bezpośrednio po jego zakończeniu, jednakże ich właściwości zbiornikowe są słabo rozpoznane. Wymienione poziomy oddzielone są od głównego poziomu przez serie słabo przepuszczalne: w południowym fragmencie systemu mułowcowo-iłowcowe utwory hetangu, retyku i kajpru (otwór Zakopane IG-1; Sokołowski S. 1973), a w północnym marglisto-mułowcowe skały kredy – najwyższej jury jednostki Bańskiej (Sokołowski J. 1992).

Pokrywa skał zbiornikowych wód geotermalnych. Pokrywę skał zbiornikowych wód geotermalnych stanowi gruba (do 2,5–3 km) formacja fliszu podhalańskiego. Posiada ona dobre właściwości izolacyjne, cechując się słabą wodonością, ograniczoną do maksymalnie 80–100 m w partiach przypowierzchniowych (Chowaniec 2002). Obecność wgłębnych wód geotermalnych i konwekcja cieplna w zalegających poniżej skałach zbiornikowych zaznacza się we fliszu jako efekt termiczny nadkładu (ang. *thermal blanket effect*), wyraźny zwłaszcza w rejonie otworów Bańska IG-1 i Biały Dunajec PAN-1, gdzie wskutek „podgrzania” skał nadkładu przez krążącą poniżej wodę ich temperatura jest nawet do około 10°C wyższa niż wynikająca z gradientu geotermicznego (Kepińska 2001).

Tektonika. System Podhala posiada złożoną tektonikę wyrażoną jako układ uskoków powstałych wskutek przemieszczania i nasuwania płaszczowin, ruchów pionowych, a następnie postkinematycznego odprężania górotworu. W efekcie utwory mezozoiczne mają strukturę blokową. W obszarze systemu podhalańskiego i jego sąsiedztwa – zapadliska orawsko-nowotarskiego i pienińskiego pasa skałkowego – przejawia się współcześnie aktywność tektoniczna (Ney 1976). Odnotowywano ją kilkakrotnie w XX wieku, a ostatnie wstrząsy miały miejsce od 30 listopada 2004 r. do 29 stycznia 2005 r. (Guterch i in. 2005). Zjawiska te są ważne dla utrzymywania i odnawiania przepuszczalności skał zbiornikowych – podstawowego warunku żywotności systemu geotermalnego.

Hydrogeologia. Głównym obszarem zasilania geotermalnych poziomów wodonośnych są Tatry. Przepływ wód odbywa się generalnie na północny zachód i północny wschód, co warunkuje położona na północy bariera pienińskiego pasa skałkowego. Lokalnie kierunki przepływu są bardziej skomplikowane wskutek wgłębnych uskoków i zróżnicowania litologicznego skał. W strefie przytatrzańskiej panują ułatwione warunki krążenia wód (szybsza wymiana, zasilanie ze strefy powierzchniowej poprzez uskoki i spękania, wyraźna reakcja na opady atmosferyczne) (Małecka 1981). Prędkości przepływu wód maleją w miarę posuwania się ku północy, aż do granicy z pienińskim pasem skałkowym. Osiągają od kilkudziesięciu m/rok w części południowej systemu do kilku m/rok w części północnej przy Pieninach (Chowaniec i in. 1997; Witczak 1999). System posiada warunki artezyjskie, co stanowi jego dużą zaletę ze względów eksploatacyjnych.

Skały zbiornikowe mają zwykle dużą (choć zmienną) miąższość całkowitą rzędu 100–700 m, przy czym największe stwierdzono w północnej części systemu. Miąższość efektywna dochodzi do 100 m (Chowaniec i in. 1997; Barbacki i in. 1998). Porowatość

pierwotna nie przekracza zwykle kilku procent, podczas gdy przepuszczalność osiąga $0,0x-0,x$ mD (Jaromin i in. 1990a, 1990b). Zasadnicze znaczenie dla warunków krążenia wód i wysokich natężeń wypływu z głównego poziomu mają wtórna porowatość i przepuszczalność (kilkaset – 1000 mD; Chowaniec i in. 1997). Skały mezozoiczne są bowiem spękane i zbrektonowane wskutek długiego transportu tektonicznego, ruchów pionowych, paleokrasu i krasu, procesów wtórnej dolomityzacji. Główny poziom wód geotermalnych można scharakteryzować średnią przewodnością hydrauliczną rzędu 10^{-3} m²/s. Maksymalne natężenia samowypływów z poszczególnych odwiertów (zasoby eksploatacyjne) dochodzą do 90–550 m³/h, jakkolwiek podczas badań w 1997 r. samowypływ wody geotermalnej z otworu Bańska PGP-1 osiągnął nawet 700 m³/h (Chowaniec i in. 1997; Barbacki i in. 1998).

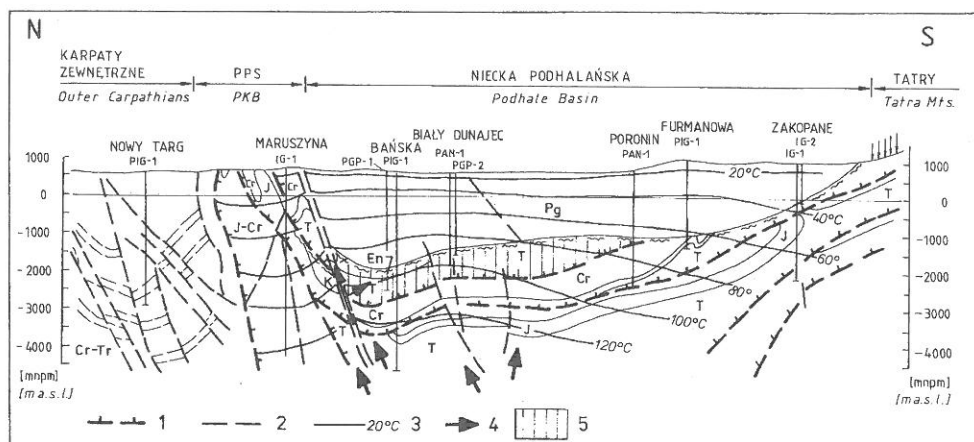
2. WYNIKI ANALIZOWANYCH BADAŃ

Warunki termiczne. Parametry termiczne systemu podhalańskiego rozpoznano punktowo dla pojedynczych otworów. Gęstość ziemskiego strumienia ciepłego wynosi 55–60 mW/m² odpowiednio dla otworów Zakopane IG-1 (Plewa 1994) i Bańska IG-1 (Sroka 1991), podczas gdy wartość gradientu geotermicznego 1,9–2,3°C/100 m (średnie dla serii paleogenu i mezozoiku).

Pomierzone maksymalne współczesne temperatury wgłębne serii paleogenu wynoszą od 88°C na głębokości 3070 m (otwór Chochołów PIG-1: Chowaniec i in. 1997) do 90°C na głębokości 2125 m (otwory Biały Dunajec PAN-1 (Jaromin i in. 1990b) i Biały Dunajec PGP-2 (Barbacki i in. 1998). Najwyższe temperatury w skałach mezozoicznych głównego poziomu wód geotermalnych: 85–95°C panują w jego północnej części, odpowiadającej pasowi miejscowości Chochołów – Bańska – Biały Dunajec, jednak przy zróżnicowanej głębokości zalegania poziomu, to jest najgłębszym, 3–3,5 km w przypadku Chochołowa i płytszym w przypadku otworów w Białym Dunajcu (2,1–2,4 km) i Bańskiej (2,5–3,2 km).

Najwyższą temperaturę – 127,5°C – pomierzono dotychczas na głębokości 4790 m w otworze Bańska IG-1 w obrębie serii mezozoicznych poniżej skał zbiornikowych głównego poziomu wód geotermalnych (Sokołowski J. 1992). Przekrój geologiczno-termiczny przez podhalański system geotermalny przedstawia rysunek 3, a zakres zmienności współczesnych temperatur wgłębnych według pomiarów w warunkach uznanych za ustalone (PT_u) (rys. 4). Wynika z niego, że „najchłodniejszy” jest rejon Chochołowa, a „najcieplejszy” – rejon Białego Dunajca, w którym temperatury są do około 10°C wyższe niż na analogicznych głębokościach w pierwszym z wymienionych rejonów. W górnym odcinku krzywej termicznej otworu Chochołów PIG-1 zaznaczać się może wpływ ochłodzenia klimatycznego z okresu zlodowaceń tatrzańskich w plejstocenie (Kepińska 2006).

Na krzywych profilowań termicznych w warunkach ustalonych zaznacza się dla niektórych odwiertów efekt konwekcji cieplnej w głównym poziomie wód geotermalnych, jako znaczne wyrównanie temperatur wzdłuż profilu głębokościowego. W rezultacie tej kon-



Rys. 3. Przekrój geologiczno-termiczny przez podhalański system geotermalny (Kepińska 2001, geologia na podstawie Sokołowskiego J. 1993, izotermi na podstawie danych PIG, PAN, PEC Geotermia Podhalańska S.A. i autorki pracy)

1 – główne nasunięcia, 2 – uskoki, 3 – izotermi, 4 – kierunki zwiększonego dopływu ciepła do głównego poziomu wód geotermalnych (rejon dodatniej anomalii termicznej), 5 – główny poziom wód geotermalnych. PG – flisz podhalański, En – skały węglanowe eocenu węglanowego (numulitowego), Tr – trzeciorzęd, Cr – kreda, J – jura, T – trias

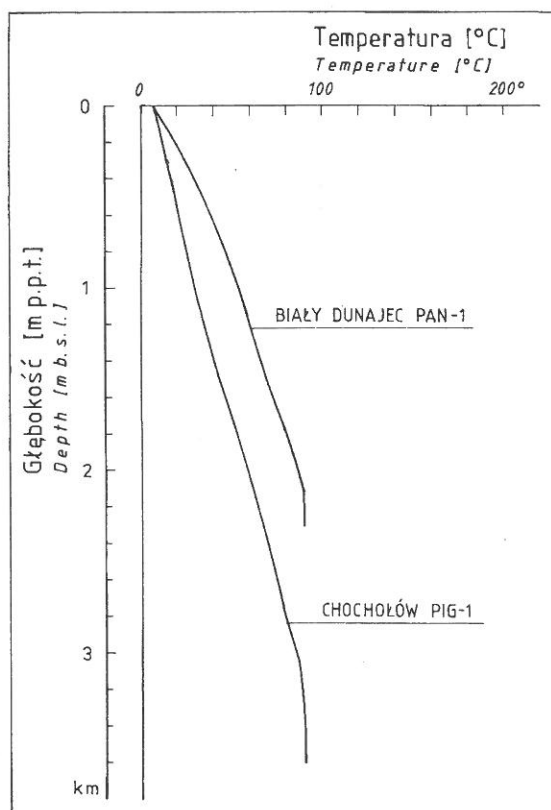
Fig. 3. Geological-thermal cross-section through the Podhale geothermal system. Location – fig. 2 (Kepińska 2001, geology based on Sokołowski J. 1992; isotherms according to the database of PIG, PAN, PEC Geotermia Podhalańska S.A. and author of this work)

1 – Main overthrusts, 2 – Faults, 3 – Isotherms, 4 – Directions of increased heat upflow to the main geothermal aquifer (area of positive thermal anomaly), 5 – Main geothermal aquifer. PG – Podhale Flysch, En – Middle Eocene Nummulitic carbonates, Tr – Tertiary, Cr – Cretaceous; J – Jurassic; T – Triassic

wekcji we fliszu obserwuje się w niektórych przypadkach jego dodatkowe kilkustopniowe podgrzanie (Poronin PAN-1, Biały Dunajec PGP-1, Bańska IG-1; Kepińska 1994).

Wyraźna dodatnia anomalia termiczna zaznacza się w obrębie głównego poziomu wód geotermalnych w rejonie otworów Biały Dunajec PAN-1 i Biały Dunajec PGP-2, gdzie temperatury na głębokości 2,1–2,4 km osiągają 85–89°C. Analogiczne wartości w rejonie odwiertów w Bańskiej (Bańska IG-1, Bańska PGP-1) stwierdzono 400–500 m głębiej (rys. 5). Anomalia ma prawdopodobnie związek z uprzywilejowaną sytuacją tektoniczno-termiczną trwającą w rejonie Białego Dunajca przypuszczalnie od początku rozwoju basenu paleogeńskiego, czego rezultatem jest m.in. wzmożony transport ciepła (i wód?) z głębszych partii systemu wzdłuż powierzchni uskoków i spekań, które są szczególnie liczne w tym rejonie.

Można przypuszczać, że oprócz anomalii termicznej rejonu Białego Dunajca istnieją także inne, w sektorach systemu dotychczas nierozpoznanych przez wiercenia, m.in. w położonej na wschód od tego rejonu dolinie Białki, gdzie również przebiegają strefy uskokowe o głębokim założeniu. W strefie kontaktu systemu podhalańskiego i pienińskiego pasa skałkowego wykryto powierzchniowe anomalie termiczne jako podwyższenie temperatur przypowierzchniowych partii górotworu o około 0,5–1°C w stosunku do średnich wartości tła



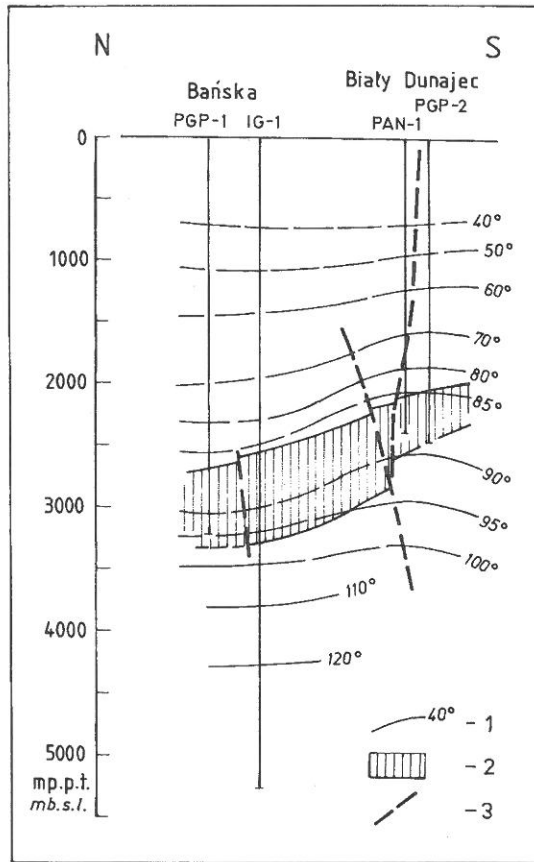
Rys. 4. Zakres zmienności współczesnych temperatur wglębnych w systemie podhalańskim (Kępińska 2006)

Fig. 4. The range of temporary formation temperatures within the Podhale system (Kępińska 2006)

(Pomianowski 1988). Z tą strefą wiąże się rozłam perypieniński, który może ułatwiać transport ciepła z głębszych partii skorupy i płaszcza ku powierzchni. Cechuje się on ponadto zerowymi wartościami indukcji magnetycznej przypuszczalnie spowodowanymi – według Jankowskiego i in. (1982) – obecnością przegrzanych wód na dużych głębokościach.

System podhalański posiada zbliżone warunki termiczne, jak sąsiadujące z nim systemy Orawy i Spisza i system Liptowa, jakkolwiek wartości gradientów geotermicznych (1,8–3,4°C/100 m) i gęstości strumienia ciepłego (44–77 mW/m²) (Franko i in. 1993; Fendek, Fendekova 2005) są tam, poza niektórymi przypadkami, zazwyczaj nieco wyższe niż na Podhalu (pomimo niskiej dolnej wartości podanego przedziału). Należy jednak pamiętać o punktowym rozpoznaniu tych parametrów (na podstawie danych najwyżej z kilku otworów), co nie daje możliwości bardziej jednoznacznych porównań (Kępińska 2006).

Warunki paleotermiczne i schłodzenie systemu podczas ewolucji. Badania stopnia diagenety illitu/smektytu (Środoń 2004) oraz inkluzji fluidalnych (Kępińska 2001) wskazały na paleotemperature, jakie panowały podczas ewolucji geologicznej w skałach zbiornikowych triasu środkowego i wypełniających je wodach:



Rys. 5. Schematyczny przekrój termiczny przez rejon otworu Biały Dunajec PAN-1 (Kępińska 2001)
 1 – izotermy, °C, 2 – skały zbiornikowe głównego poziomu wód geotermalnych (eocen śr. i trias śr.)
 Wykonano na podstawie danych z profilowań termicznych Ptu, (Sokołowski J, 1992; Długosz 1997),
 innych wglębnych punktowych pomiarów temperatur (Jaromin i in., 1990 b); symulacji temperatur
 (Kępińska 1994) testów Production Logging (Barbacki i in. 1998) i obliczeń własnych przy uwzględ-
 nieniu gradientu geotermicznego: śr. 2,1–2,3°C/100 m

Fig. 5. Schematic thermal cross-section through the area of Biały Dunajec PAN-1 well (Kępińska 2001)
 1 – isotherms, °C, 2 – reservoir rocks of the main geothermal aquifer (Middle Eocene and Middle
 Triassic)

Prepared using the results of thermal logging Ptu, (Sokołowski J. 1992; Długosz 1998), other downhole
 temperature measurements (Jaromin et al. 1990 b); formation temperature simulation (Kępińska 1994);
 results of Production Logging (Barbacki et al. 1998) and calculations done by the author assuming
 average geothermal gradient 2.1–2.3°C/100 m

- 1) etap przeoceński – dotyczący skał mezozoicznych przed ich nasunięciem w dzisiejsze położenie: temperatury rzędu 200–230°C,
- 2) etap pooligoceniński – wczesny (po nasunięciu jednostek mezozoicznych i po depozycji utworów paleogenu, tzn. po uformowaniu systemu Podhala): temperatury 165–180°C,
- 3) etap pooligoceniński – współczesny: temperatury rzędu 90°C.

Schłodzenie systemu w skali geologicznej oszacowano na podstawie wyników badań stopnia diagenety illitu–smektytu (Środoń 2004), badań termicznych inkluzji fluidalnych, mineralizacji wtórnej (Kępińska 2001; Cebulak i in. 2004; Kotarba 2003) oraz współczesnych temperatur wgłębnych. Schłodzenie to można określić na 65–100°C; są to wartości skrajne, charakteryzujące odpowiednio rejon otworów w Białym Dunajcu i na Furmanowej. W przypadku innych otworów schłodzenie wynosi 80–90°C (tab. 1, rys. 6).

Tabela 1

Schłodzenie podhalańskiego systemu geotermalnego (skały zbiornikowe głównego poziomu geotermalnego) podczas jego ewolucji (Kępińska 2006)

Table 1

Cooling of the Podhale geothermal system (reservoir rocks of the main geothermal aquifer) during its evolution (Kępińska 2006)

Otwór	Schłodzenie	Maksymalne paleotemperatury	Maksymalne współczesne temperatury i odpowiadające im głębokości	Współczesna grubość pokrywy fliszowej
Biały Dunajec PAN-1	~ 65°C	155–160°C	90°C (2113–2390 m)	2113 m
Biały Dunajec PGP-2	~ 65°C	155–160°C	90°C (2048–2450 m)	2048 m
Chochółów PIG-1	~ 65–70°C	155–160°C	90–95°C (2960–3542 m)	2960 m
Poronin PAN-1	~ 90°C	150–155°C	60–65°C (1768–1855 m)	1768 m
Bańska PGP-1	~ 80°C	170–175°C	90–95°C (2565–3345 m)	2709 m
Furmanowa PIG-1	~ 100°C	160–170°C	60–65°C (1987–2324 m)	1987 m

Do obliczeń wykorzystano temperatury współczesne znane na podstawie profilowań termicznych w warunkach ustalonych PT_u , paleotemperatury na podstawie badań stopnia przeobrażenia minerału illit–smektyt

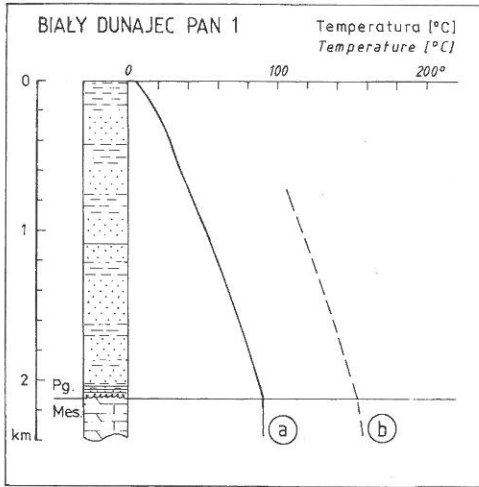
Calculations based on temporary temperature values according to PT_u thermal logs taken in stable conditions, and palaeotemperatures according to the results of illite – smectite thermal transformation analyses

Rys. 6. Temperatury współczesne (a) i paleotemperatury (b) w podhalańskim systemie geotermalnym (Kępińska 2006)

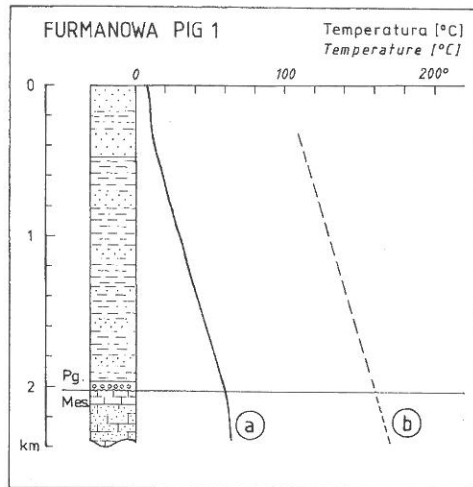
Dane współczesne na podstawie profilowania termicznego w warunkach ustalonych, PT_u , paleotemperatury na podstawie badań stopnia przeobrażenia termicznego minerału illit – smektyt, dane dla otworów Chochółów PIG-1, Furmanowa PIG-1 częściowo wg Kotarby (2003)

Fig. 6. Temporary temperatures (a) and paleotemperatures (b) within the Podhale geothermal system (Kępińska 2006)

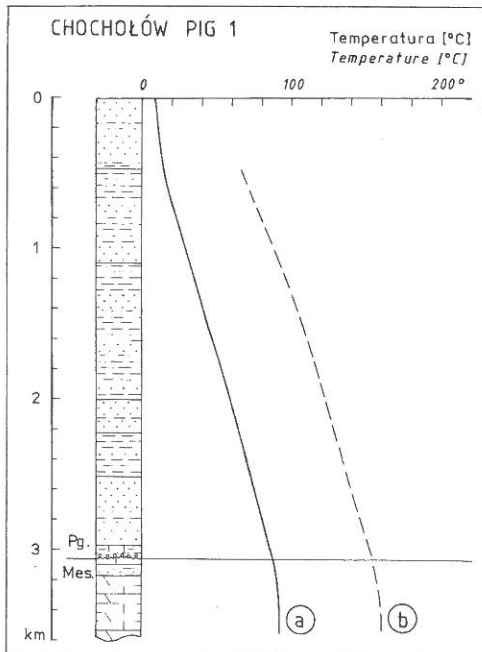
Temporary data based on temperature logging PT_u (stable conditions), paleotemperatures based on thermal transformation degree of illite-smectite. Data for wells: Chochółów PIG-1, Furmanowa PIG-1, Bańska IG-1 partly according to Kotarba (2003)



a)



b)



c)

Najmniejsze schłodzenie (65°C) cechuje rejon Białego Dunajca, co ciekawe – przy cieńszej o około 1 km pokrywie fliszu niż w przypadku odwiertów Bańska IG-1, Bańska PGP-1 (położonych stosunkowo blisko, bo 1,2–1,5 km od odwiertów Biały Dunajec PAN-1 i Biały Dunajec PGP-2). Przyczyną najmniejszego schłodzenia w podanym rejonie jest prawdopodobnie wzmożony dopływ ciepła z większych głębokości wzdłuż powierzchni uskoków i innych nieciągłości, których nasilenie stwierdzono w tym rejonie. W skali geologicznej dopływ ten rekompensuje efekt ochładzania systemu, a nawet – wraz z konwekcją cieplną wskutek krążenia wody w skałach zbiornikowych – przyczynia się do istnienia anomalii termicznej. Jak już podano, podwyższona aktywność tektoniczno-termiczna tej strefy trwa od zakładania paleogeńskiego basenu Karpat wewnętrznych. Może ona być drożna dla wód od serii mezozoicznych poprzez skały eoceńskie i flisz aż do powierzchni.

W rejonie otworu Chochołów PIG-1 schłodzenie systemu (poniżej kilkusetmetrowej strefy przypowierzchniowej mogącej wykazywać efekt ochłodzenia indukowanego zlodowaceniem Tatr) wynosi około 65–70°C. Jest więc ono porównywalne z rejonem Białego Dunajca, jednak przy współczesnej pokrywie grubszej o blisko 1 km niż w przypadku drugiego z wymienionych rejonów. Spowodowane jest to zapewne faktem, że rejon Chochołowa podlegał w obszarze niecki podhalańskiej relatywnie najmniejszemu wynoszeniu i erozji – współczesna grubość pokrywy fliszowej osiąga tam blisko 3 km, a grubość jej zerodowanego już fragmentu szacuje się na 1,3–1,5 km (Kotarba 2003).

Największe schłodzenie zaznacza się w rejonie otworu Furmanowa PIG-1, osiągając około 100°C. Jest to 35–40°C więcej niż w rejonie Białego Dunajca, przy porównywalnej dla obu odwiertów grubości zachowanej pokrywy fliszu (rzędu 2 km) oraz 30–35°C więcej niż w rejonie Chochołowa (ale przy grubszej o około 1 km zachowanej tam pokrywie fliszu). Oprócz lokalnie zróżnicowanych warunków termicznych i tektonicznych, przyczyn tego faktu można upatrywać m.in. w położeniu topograficznym rejonu Furmanowej, odmiennym niż innych badanych rejonów na Podhalu: otwór ten położony jest bowiem na stromym zboczu pasma Gubałówki, około 200 m powyżej dna rowu zakopiańskiego. Południowe jej stoki mają założenie tektoniczne, stanowiąc próg pogórza gubałowsko-spiskiego. Taka morfologia i odsłanianie wskutek wynoszenia i erozji dodatkowej powierzchni sprzyjały i sprzyjają wzmożonemu przepływowi ciepła z górotworu do otoczenia, a tym samym – powodowały większe i szybsze schładzanie systemu w porównaniu do innych fragmentów o bardziej wyrównanej morfologii, gdzie w transporcie ciepła ku powierzchni przeważa składowa pionowa.

Stan termodynamiczny wód geotermalnych. Wody geotermalne wypełniające współcześnie skały zbiornikowe omawianego systemu są w przeważającej mierze wodami meteorycznymi. Ich mineralizacja jest niska, w zakresie $0, x - 3 \text{ g/dm}^3$. Należą zwykle do typów $\text{SO}_4\text{-HCO}_3\text{-Cl-Na-Ca}$, $\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg}$, $\text{SO}_4\text{-Cl-Na-Ca}$. W przypadku wody wydobywanej z odwiertów w Bańskiej (Bańska IG-1 i Bańska PGP-1) mineralizacja obniża się w trakcie prowadzenia eksploatacji (tab. 2). I tak dla otworu Bańska IG-1 obniżyła się z 3022–2995 mg/dm^3 w 1981 r. (wkrótce po jego odwiercieniu; Sokołowski J. 1992) do 2358–2351 mg/dm^3 w 1999–2002 r. (po 7–10 latach eksploatacji z wydajnością 30–60 m^3/h).

Tabela 2

Zmiany mineralizacji wody geotermalnej w trakcie eksploatacji otworów w systemie podhalańskim
(Kępińska 2006)

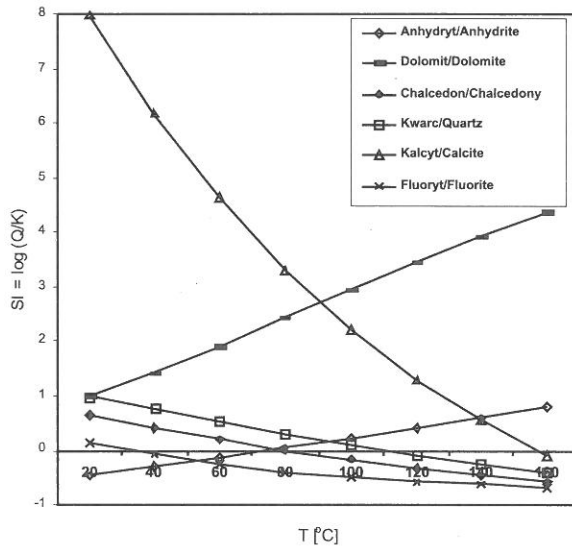
Table 2

Changes in geothermal water mineralization during exploitation of wells in the Podhale system
(Kępińska 2006)

Otwór	Rok rozpoczęcia eksploatacji	Rok wykonania analizy	Mineralizacja ogólna [mg/dm ³]	Okoliczności poboru próbek do analiz	Źródło danych
Bańska IG-1	1992	1981	3022–2995	Testy pomiarowe po wykonaniu wiercenia	Sokołowski J. 1992
		1997	2518–2693	Testy pomiarowe	Chowaniec i in. 1997
		1999–2002	2358–2351	Po 7–10 latach ciągłej produkcji wody	Kępińska 2001 Arch. IGSMiE PAN
Bańska PGP-1	2001	1997	3122	Testy pomiarowe po wykonaniu wiercenia	Barbacki i in. 1998
		2005	2417	Po 4 latach ciągłej produkcji wody	Arch. IGSMiE PAN

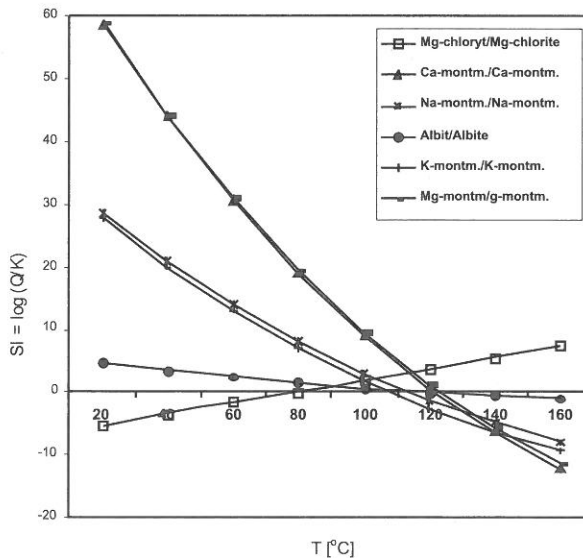
Ocenę stanu termodynamicznego wód geotermalnych wykonano dla sektora systemu podhalańskiego, który jest eksploatowany za pomocą otworów Bańska IG-1, Bańska PGP-1, Biały Dunajec PAN-1, Biały Dunajec PGP-2 oraz dla wody wydobywanej od 2008 r. otworem Bukowina Tatrzańska PIG/PNiG-1 (Kępińska 2006). Obliczenia wykonano przy zastosowaniu programów WATCH (Bjarnarsson 1993), SOLVEQ (Reed and Spycher 1989) i PHREEQECI (Parkhurst 1995). Dostarczyły one informacji odnośnie m.in. stanu równowagi termodynamicznej układów *woda geotermalna – skały zbiornikowe*, procesów rozpuszczania i wytrącania minerałów wtórnych, temperatur wglębnych oszacowanych na podstawie geotermometrów chemicznych. Rysunek 7 przedstawia przykładowo stany równowagi układów *woda – minerały* w funkcji temperatur.

Wody geotermalne w rejonie Białego Dunajca i Bańskiej nie znajdują się w stanie równowagi termodynamicznej ze skałami zbiornikowymi. W zakresie temperatur rzeczywistych – zarówno w złożu (83–96°C) jak i na wypływach z otworów (76–87°C) – są przesycone kalcytem i dolomitem, a zazwyczaj także anhydrytem. Również wodę ujętą w otworze Bukowina Tatrzańska PIG/PNiG-1 cechuje przesylenie aragonitem, kalcytem i dolomitem. Przesycenie nie musi jednak prowadzić do natychmiastowego wytrącania węglanów, gdyż następuje ono dopiero po znacznym przekroczeniu równowagi roztworu (Witczak 1999). Niewielkie ilości węglanu wapnia (aragonitu), a także gipsu, rzeczywiście wytrącają się współcześnie z wydobywanej wody, co zidentyfikowano rentgenograficznie (Kępińska 2001, 2006). W aspekcie praktycznym zjawisko to powinno być uwzględniane w planowaniu eksploatacji, gdyż może pojawić się problem z wytrącaniem niektórych wymienionych minerałów w samym złożu, a także w rurach i instalacjach systemu eksploatacji, zwłaszcza po istotnym zwiększeniu skali eksploatacji wody.



Rys. 7a. Otwór Bańska IG-1: diagram równowag woda-minerały w funkcji temperatury: $\log(Q/K) = f(T)$. Węglany, siarczany, krzemiany i in. Analiza dla próbki z 9.11.1999 r. Na podstawie obliczeń programu WATCH

Fig. 7a. Bańska IG-1 well: water – mineral equilibria diagram vs. temperature: $\log(Q/K) = f(T)$. Carbonates, sulphates, silicates and others. Analysis for water sample taken on 9.11.1999. Based on WATCH programme calculations



Rys. 7b. Otwór Bańska IG-1: diagram równowag woda-minerały w funkcji temperatury: $\log(Q/K) = f(T)$. Glinokrzemiany. Analiza dla próbki z 9.11.1999 r. Na podstawie obliczeń programu WATCH

Fig. 7b. Bańska IG-1 well: water – mineral equilibria diagram vs. temperature: $\log(Q/K) = f(T)$. Aluminosilicates. Analysis for water sample taken on 9.11.1999. Based on WATCH programme calculations

Wody z rejonu Bańskiej–Białego Dunajca w temperaturach powyżej 50–60°C są przesycone także w odniesieniu do niektórych minerałów ilastych – illitu, smektytów, chlorytów. Występują one w niewielkiej ilości, jednak tendencja do wytrącania może prowadzić w dłuższej perspektywie czasowej np. do kolmatacji skał zbiornikowych w strefie przyotworowej odwiertów chłonnych.

Stan zbliżony do równowagi termodynamicznej w temperaturach złoża i wypływu (76–96°C) cechuje jedynie układ woda–chalcedon, który osiąga wartość indeksu nasycenia $SI = 0$ w temperaturach 82–94,5°C. Chalcedon może zatem służyć jako geotermometr.

Także wody w południowym fragmencie systemu, gdzie położony jest otwór Bukowina Tatrzańska PIG/PNiG-1, w temperaturach złoża i wypływu są lekko przesycone kaolinitem i kwarcem, osiągają natomiast stan zbliżony do równowagi z chalcedonem, a także z illitem i Ca-smektytem. Są niedosycone m.in. skaleniami i siarczanami (Kępińska 2006).

W badanych wodach rozpuszczalność krzemionki jest kontrolowana raczej przez chalcedon niż przez kwarc, gdyż temperatura, w jakiej chalcedon osiąga stan równowagi z wodą jest zbliżona do rzeczywistych temperatur rejestrowanych w złożu i na wypływie, podczas gdy kwarc osiąga stan równowagi z wodą w zakresie temperatur 112–120°C dla wód z rejonu Bańskiej–Białego Dunajca i 92,5°C dla wód z rejonu Bukowiny Tatrzańskiej – wyższych niż rzeczywiste temperatury. Wody tych rejonów są natomiast niedosycone w odniesieniu do krzemionki bezpostaciowej – opalu (Witczak 1999) i krystobalitu.

Badany system cechuje duża anizotropowość, stąd też lokalnie czynniki warunkujące stan równowagi mogą się różnić. Wydaje się również, że w przypadku długotrwałej eksploatacji wód z niektórych otworów i związanego z tym spadku mineralizacji i zmian stężeń poszczególnych składników, może ulec zmianie stan termodynamiczny tych wód.

3. ZNACZENIE BADAŃ DLA EKSPLOATACJI WÓD GEOTERMALNYCH

Wyniki przedstawionych badań mają znaczenie praktyczne dla eksploatacji podhalańskich wód geotermalnych. Działalność taka prowadzona jest od kilku lat w układzie otworów produkcyjnych Bańska PGP-1 i Bańska IG-1 oraz chłonnych Biały Dunajec PGP-2 i Biały Dunajec PAN-1, a woda jest ponadto produkowana (bez zatłaczania) przez otwory Zakopane IG-1, Zakopane-2, Szymoszkowa GT-1 i Bukowina Tatrzańska PIG/PNiG-1. W związku z rozbudową sieci grzewczej i zwiększaniem sprzedaży ciepła planowane jest wiercenie nowych otworów i zwiększenie ilości wydobywanych wód w porównaniu z obecnym (2009 r.) natężeniem przepływu na poziomie 100–400 m³/h. Ważna jest zatem m.in. właściwa lokalizacja nowych wierceń, a także przewidywanie zjawisk, jakie mogą zaistnieć w złożu oraz instalacjach pod wpływem długotrwałej eksploatacji. Ułatwi to właściwe jej prowadzenie, tak aby była ona niezawodna, a system pracował w sposób zrównoważony, wystarczająco długo i efektywnie pod względem ekonomicznym. W tym praktycznym zakresie przedstawione w artykule wyniki przyniosły istotne informacje.

Temperatury złożowe i lokalizacja otworów eksploatacyjnych. Przykład pozytywnej anomalii z rejonu Białego Dunajca dowodzi, że niektóre strefy tektoniczne są uprzywilejowane pod względem termicznym – towarzyszą im na ogół temperatury wyższe niż w obszarach położonych dalej od nich (a także wyższe wydajności wód wskutek stektonizowania skał zbiornikowych). Strefy takie również wolniej stygną. Co ważne – przy wierceniu na mniejsze głębokości (do ok. 1 km płycej, co odpowiada ok. 1/3 długości otworu przy głębokościach odwiertów eksploatacyjnych na Podhalu rzędu 3 km) można uzyskać porównywalne temperatury niż w sytuacji konieczności wiercenia głębiej w obszarach znajdujących się dalej od takich stref. Ważny jest także aspekt finansowy, gdyż skrócenie wiercenia skutkuje znacznym obniżeniem kosztów. W perspektywie wiercenia kolejnych otworów należy zwrócić również uwagę, aby w strefach tektonicznych o uprzywilejowanych warunkach termicznych nie lokalizować odwiertów chłonnnych – zatłaczanie schłodzonej wody może bowiem lokalnie ograniczyć ich dodatnie cechy termiczne. Takie strefy powinny być wykorzystywane do lokalizacji odwiertów produkcyjnych.

Stan termodynamiczny wód geotermalnych. Wody geotermalne w rejonie Bańskiej i Białego Dunajca są pod względem termodynamicznym lekko przesycone kalcytem i dolomitom, co powoduje tendencję do wytrącania tych minerałów, zarówno w warunkach temperatur złożowych jak i rejestrowanych na wypływach z otworów i przy zatłaczaniu (przedział 87–50°C). Są też przesycone niektórymi minerałami ilastymi, m.in. smektytami i chlorytami, a chociaż te minerały występują w nieznacznym ilościach w skałach zbiornikowych, to jednak w czasach mogą kolmatować w strefie przyodwiertowej i w złożu. Badane wody znajdują się natomiast blisko stanu równowagi z krzemionką (chalcedonem), równowagę termodynamiczną osiągają z niektórymi minerałami ilastymi – illitem i Ca-montmorillonitem.

Tendencja do wytrącania węglanów jest jedną z przyczyn konieczności eksploatacji wód w obiegu zamkniętym (podobnie jak i utrzymywanie eksploatacji przy ciśnieniu wyższym od punktu pęcherzyków), z uwagi na utrzymanie w wodzie maksymalnej ilości rozpuszczonego CO₂, gdyż uwolnienie tego gazu prowadziłoby do zwiększonego wytrącania węglanów (co rzeczywiście obserwuje się w niektórych przypadkach na Podhalu). Innym powodem stosowania obiegu zamkniętego jest zapobieżenie kontaktowi wód wgłębnym z tlenem atmosferycznym, który powoduje korozję. Fakty te będą stale towarzyszyły eksploatacji podhalańskich wód geotermalnych, stąd też muszą być brane pod uwagę w planowaniu i prowadzeniu działalności przez każdego z inwestorów i operatorów instalacji geotermalnych (na Podhalu działa ich już sześciu, a wkrótce dołączy kilku następnych).

Proces kalcytowej mineralizacji hydrotermalnej w skałach zbiornikowych prowadzi do zapełniania szczelin i spękań – dróg krążenia wód. W skali czasu geologicznego zmniejsza się zatem przepuszczalność skał. Następują też procesy odwrotne, jak wymywanie i rozpuszczanie składników skał i ich przechodzenie do roztworu wodnego. Należałoby także uwzględnić rolę, jaką w mechanicznym wymywaniu i korozji, a nawet szczelinowaniu skał, może odegrać wtłaczanie pod ciśnieniem do złoża schłodzonych wód geotermalnych.

Tendencja do wytrącania minerałów wtórnych, w tym kalcytu, potwierdza i uzasadnia potrzebę okresowego stosowania zabiegu stymulacji skał zbiornikowych – w tym zwłaszcza

metodą miękkiego kwasowania – w celu utrzymania ich właściwości chłonnych na stabilnym poziomie (takie zabiegi dla podhalańskiego złoża geotermalnego były objęte nowatorskim w kraju projektem, jednak nie zostały całkowicie zrealizowane dla warunków Podhala).

Określanie współczesnych temperatur wgłębnych za pomocą geotermometrów. Niektóre geotermometry są przydatne do określania współczesnych temperatur wgłębnych wód systemu podhalańskiego, przy czym najbardziej odpowiedni jest geotermometr chalcodonowy. Geotermometry są wystarczającym, a przy tym tanim sposobem uzyskania wstępnej informacji o temperaturach wgłębnych wód, których znajomość pozwala oszacować potencjał cieplny otworu jeszcze przed zakończeniem jego wiercenia i wykonaniem szczegółowych testów i pomiarów. Podczas długotrwałej eksploatacji wód geotermalnych można je okresowo stosować w celu sprawdzania, czy nie następuje istotna zmiana temperatur złożowych. Tak się dzieje niemal rutynowo w wielu innych krajach. Jest to sposób nieporównywalnie tańszy i łatwiejszy od kosztownych i nierzadko trudnych do wykonania w już eksploatowanych otworach wgłębnych pomiarów, wymagających wielu przygotowań, użycia sprzętu wiertniczego itp.

Otrzymane dzięki metodom geochemii geotermalnej wyniki dają możliwość poznawania ważnych z punktu widzenia eksploatacji równowag termodynamicznych układów *woda-skała* w szerokim zakresie temperatur, w warunkach wgłębnych i powierzchniowych. Sta nowią niezbędne uzupełnienie klasycznych metod hydrogeochemicznych stosowanych dla Podhala i powinny wejść na stałe do zespołu metod jego badań i monitoringu. Takie analizy i interpretacje (również w kierunku korozji) powinny też być wymagane w koncesjach udzielanych na rozpoznanie i eksploatację złóż wód geotermalnych (a szczegółowo określone w stosownych rozporządzeniach). Uwaga ta dotyczy też innych systemów w kraju, które są i będą eksploatowane, tym bardziej, że cechują się one niekiedy wysoką mineralizacją wód i zawierają piaskowce jako skały zbiornikowe, co stwarza dogodne warunki dla znacznie bardziej niż w przypadku Podhala nasilonych zjawisk wytrącania i korozji.

UWAGI KOŃCOWE

Podhalański system geotermalny stanowił przedmiot wielorakich badań, w tym także ukierunkowanych na poznawanie zagadnień termicznych i hydrotermalnych. Dalsze studia nad zarysowaną tematyką powinny objąć m.in. prawie wcale nierozpoznaną wiertniczo (tylko jeden otwór w Białce Tatrzańskiej ukończony w 2008 r.) wschodnią jego część – od linii potoku Biały Dunajec poprzez dolinę Białki dalej na wschód (rejon Spisza); dotychczas wykonano tam w ostatnich latach tylko jeden otwór. Może to być obszar równie interesujący dla występowania wód podziemnych o temperaturach porównywalnych jak eksploatowane w rejonie Bańskiej – Białego Dunajca, gdyż niektóre strefy tektoniczne (wzdłuż jednej z nich rozwinęła się dolina Białki; Mastella 1975) powinny sprzyjać dodatnim anomalii termicznym i obecności wód. Podstawowym warunkiem uzyskania znaczących wydajności wód jest jednak odpowiednia lokalizacja wierceń (czyli w strefach uskoków), natomiast poza nimi

istnieje spore ryzyko małych wydajności i gorszych innych parametrów hydrodynamicznych (Kepińska 2006).

Metody badań, których wyniki przedstawiono, przyczyniły się do poznania istotnych aspektów ewolucji i współczesnych warunków termicznych oraz stanu termodynamicznego wód podhalańskiego systemu geotermalnego. Powinny one być stosowane również w dalszych badaniach zarówno tego systemu, jak i innych systemów geotermalnych w kraju. Pozwalają bowiem na poznawanie ich ewolucji i stanu obecnego, z uwzględnieniem zależności skał i wód oraz podejścia podkreślającego zagadnienia termiczne i termodynamiczne – cechy charakterystyczne takich systemów (ostatnio metody, o których jest mowa w artykule, zastosowano dla wstępnych badań wybranych lokalizacji w obrębie pienińskiego pasa skałkowego, gdzie np. mineralizacja wtórna może mieć związek z procesami geotermalnymi; Pawlikowski i in., w druku). Badania posiadają jednocześnie znaczenie praktyczne, istotne dla prawidłowej eksploatacji wód, instalacji geotermalnych oraz optymalnej lokalizacji nowych otworów.

Należy także wskazać na konieczność nawiązania współpracy pomiędzy wszystkimi przedsiębiorcami eksploatującymi podhalańskie złoża geotermalne w celu prowadzenia eksploatacji w sposób zrównoważony, zapewniający stabilność jej podstawowych parametrów. Zainicjowany musi być wspólny dla Podhala (a nawet dla niektórych obszarów sąsiadujących z nim od strony słowackiej) system monitoringu, analizy i interpretacji jego danych, weryfikacji i uaktualniania modelu złoża. Jest to niezbędny element racjonalnej gospodarki tym złożem w wieloletniej perspektywie, służący interesom wszystkich przedsiębiorców inwestujących znaczne środki i planujących wieloletnią działalność gospodarczą. Dzieje się tak w przypadku innych krajów; m.in. wspólny system monitoringu i zarządzania złożem wprowadzono dla basenu paryskiego. W maksymalnym stopniu należy również dążyć do eksploatacji wód w układach zamkniętych, zwłaszcza w sytuacjach dużych natężeń strumienia wód.

LITERATURA

- BARBACKI A., BUJAKOWSKI W., CHOWANIEC J., DŁUGOSZ P., DROZDOWSKI B., GRACZYK S., KEPIŃSKA B., NAGEL J., NAGY S., NEY R., WARTAK W., WIECZOREK J., WITCZAK S., 1998 — Dokumentacja hydrogeologiczna zasobów wód geotermalnych w otworach Bańska PGP-1 i Biały Dunajec PGP-2. Arch. IGSMiE PAN, Kraków.
- BJARNARSSON J.O., 1994 — The speciation program WATCH, version 2.0. Reykjavik.
- CEBULAK S., GAWĘDA A., KEPIŃSKA B. [red.], MARYNOWSKI L., MISZ B., PAJAŁ L., PAWLIKOWSKI M., ŚRODOŃ J., 2004 — Badania warunków termicznych podhalańskiego systemu geotermalnego przy zastosowaniu nowej metody oksyreaktywnej analizy termicznej (OTA) i metod mineralogicznych. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- CHOWANIEC J., 2002 — Strefowość zawodnienia w profilu pionowym fliszu podhalańskiego w świetle badań wodochłonności. Biul. PIG 404, s. 19–28, Warszawa.
- CHOWANIEC J., DŁUGOSZ P., DROZDOWSKI B., NAGY J., WITCZAK W., WITEK K., 1997 — Dokumentacja hydrogeologiczna wód termalnych niecki podhalańskiej. CAG, Warszawa.

- FENDEK M., FENDEKOVA M., 2005 — Country update of the Slovak Republic. Proceedings of the World Geothermal Congress. Turkey, Paper 0173 (CD).
- FRANKO O., FENDEK M., REMSIK A., 1993 — Potencjał geotermalny słowackich niecek otaczających Tatry. Technika Poszukiwań Geologicznych. Geosynoptyka i Geotermia 5–6.
- GUTERCH B., LEWANDOWSKA-MARCINIAK H., NIEWIADOMSKI J., 2005 — Earthquakes recorded in Podhale along the Pieniny Klippen Belt. Acta Geoph. Pol. vol. 53, no. 1, Warszawa.
- JANKOWSKI J., NEY R., PRAUSS O., 1982 — Czy pod całym łukiem północno-wschodnich Karpat istnieją głębokie wody geotermalne. Przegl. geol. nr 4, Warszawa.
- JAROMIN A., JAMRYCH J., KARDASIŃSKA J., KĘPIŃSKA B., NAGEL J., SOKOŁOWSKI J., WIECZOREK J., 1990a — Dokumentacja wynikowa otworu geotermalnego Poronin PAN-1. Arch. IGSMiE PAN, Kraków.
- JAROMIN A., JAMRYCH J., KARDASIŃSKA J., KĘPIŃSKA B., NAGEL J., WIECZOREK J., 1990b — Dokumentacja wynikowa otworu geotermalnego Biały Dunajec PAN-1. Arch. IGSMiE PAN, Kraków.
- KĘPIŃSKA B., 1994 — The temperature distribution in the Seltjarnarnes field, SW-Iceland. The reservoir temperature in the Podhale geothermal field, S-Poland. Report 7. UNU Geothermal Training Programme. Reykjavik, Iceland.
- KĘPIŃSKA B., 2001 — Warunki hydrotermalne i termiczne podhalańskiego systemu geotermalnego w rejonie otworu Biały Dunajec PAN-1. Studia, Rozprawy, Monografie 93, Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- KĘPIŃSKA B., 2006 — Warunki hydrotermalne i termiczne podhalańskiego systemu geotermalnego. Studia, Rozprawy, Monografie 135, Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- KOTARBA M., 2003 — Historia diagenety illitu-smektytu w skałach ilastych Karpat Zewnętrznych i niecki Podhala (przekrój Kraków–Zakopane). Arch. ING PAN, Kraków.
- MAŁECKA D., 1981 — Hydrogeologia Podhala. Inst. Geol. Prace Hydrogeologiczne – seria specjalna, z. 14, Wyd. Geol., Warszawa.
- MAŁECKA D., 1982 — Mapa geologiczna Podhala i obszarów przyległych. Skala 1 : 10 000. Wyd. Geol., Warszawa.
- MASTELLA L., 1975 — Tektonika fliszu we wschodniej części Podhala. Roczn. Pol. Tow. Geol. t. XLV, z. 3–4, Kraków.
- NEY R., 1976 — The Carpathians and plate tectonics. Przegl. Geol. nr 6, Warszawa.
- PARKHURST D.L., 1995 — User's guide to PHREEQE – a computer program for speciation, reaction-path, advective transport, and inverse geochemical calculations. U.S Geological Survey Water-Resources graphical user interface for the geochemical computer program Investigations Report.
- PAWLIKOWSKI M., MAZUREK J., WIECZOREK J. i in., 1997 — Badania mineralogiczno-petrograficzne skał zbiornikowych wód geotermalnych w otworze Biały Dunajec PAN-1. Gospodarka Surowcami Mineralnymi t. 13, z. 3, Wyd. CPPGSMiE PAN, Kraków.
- PAWLIKOWSKI M., MAZUREK J., 2000 — System poboru próbek i analizy chemizmu wody w instalacji geotermalnej Bańska–Biały Dunajec na Podhalu. TPGGiG z. 2, Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- PAWLIKOWSKI M., KĘPIŃSKA B., SIKORSKA M., NATKANIEC-NOWAK L., DUMAŃSKA-SŁOWIK M., KOSSUTH M., 2009 — Preliminary mineralogical and petrographical studies of veins within the host rocks of the neogene volcanites of the Pieniny Klippen Belt as indicator of potential geothermal processes. Ann. Soc. Geol. Pol. (praca w druku)
- PLEWA S., 1994 — Parametry geotermalne na obszarze Polski. Wyd. CPPGSMiE PAN, Kraków.
- POMIANOWSKI P., 1988 — Anomalie termiczne nad strefą kontaktu pienińskiego pasa skałkowego i fliszu podhalańskiego. Przegl. geol. nr 2, Warszawa.
- REED M., SPYCHER N.F., 1989 — SOLVEQ: A computer program for computing aqueous-mineral-gas equilibria. Department of Geological Sciences, University of Oregon, Eugene.

- SOKOŁOWSKI J., 1992 — Dokumentacja geosynoptyczna otworu geotermalnego Bańska IG-1. Geosynoptyka i Geotermia t. 1, PAN CPPGSMiE, Kraków.
- SOKOŁOWSKI J., 1993 — Zasoby geotermalne Polski i możliwości ich wykorzystania w ochronie środowiska. Technika Poszukiwań Geologicznych. Geosynoptyka i Geotermia nr 5–6, PAN CPPGSMiE, Kraków.
- SOKOŁOWSKI J., DŁUGOSZ P., BUJAKOWSKI W., 1992 — Pierwszy zakład geotermalny w Polsce. Technika Poszukiwań Geologicznych. Geosynoptyka i Geotermia nr 6, Kraków.
- SOKOŁOWSKI S., 1973 — Geologia paleogenu i mezozoicznego podłoża południowego skrzydła niecki podhalańskiej w profilu głębokiego wiercenia w Zakopanem. Biul. IG, nr 265, Warszawa.
- SOTAK J., JANOCKO J., 2003 — Central Carpathian Paleogene Basin – an outline to sedimentology, sequence stratigraphy and basin history. [In:] Sedimentary sequences and depositional systems on the Central-Carpathians Paleogene Basin. Guide to IAS field trip, Slovakia 2001. (Janocko J. and Sotak J. eds). October 8–12, 2001, Slovakia.
- SROKA Z., 1991 — Nowe oznaczenie gęstości powierzchniowego strumienia ciepłego Ziemi w polskiej części Karpat. Zeszyty Naukowe AGH, Geofizyka Stosowana, z. 8, Kraków.
- ŚRODOŃ J., 2004 — Badania stopnia przeobrażenia termicznego minerałów mieszanopakietowych illit – smektyt. [W:] Cebulak i in. 2004.
- WITCZAK S., 1999 — Analiza i interpretacja składu fizyko-chemicznego wód eksploatowanych w Białym Dunajcu i Bańskiej pod kątem poznawania systemu geotermalnego Podhala. Arch. IGSMiE PAN, Kraków.

THE ROLE OF THE PODHALE GEOTHERMAL SYSTEM'S RESEARCH FOR GEOTHERMAL WATER EXPLOITATION

ABSTRACT

The research, R&D works and activities aimed at geothermal heating construction have resulted in many new data on the Podhale geothermal system. They included e.g. studies on thermal and palaeothermal conditions of this system and its cooling during evolution, secondary diagenetic and hydrothermal mineralization, geothermal water – reservoir rock thermodynamical equilibria. The studies were done using the results of researches of rock samples and measurements done in several boreholes. They included: mineralogical methods (microscopy, X-ray diffraction, evaluation of thermal transformation of illite – smectite mixed-layer mineral, fluid inclusion microthermometry, secondary minerals' examination); chemical methods (interpretation of chemical composition and water – rock thermodynamical equilibria); borehole geophysical surveys.

The investigations possess cognitive character and introduce several issues not addressed earlier or treated marginally. Some aspects and conclusions are important in the view of long-term optimal exploitation of the Podhale geothermal water aimed at its wide implementation.

KEY WORDS

Podhale, geothermal water, temperatures, water thermodynamical equilibria, exploitation