

## Nowe kierunki naukowo-badawcze w polskiej części obszaru sudeckiego w aspekcie zastosowania technologii HDR i EGS

Wiesław Bujakowski<sup>1</sup>, Antoni Barbacki<sup>1</sup>, Robert Skrzypczak<sup>1</sup>



W. Bujakowski    A. Barbacki    R. Skrzypczak

**New directions of research in the Polish part of the Sudetic area in the aspect of HDR and EGS technologies.** Prz. Geol., 61: 706–711.

*A b s t r a c t.* The fast-growing discipline in the field of geothermal research is the prospecting for geological structures useful for HDR (Hot Dry Rock) or EGS (Enhanced Geothermal Systems) technologies. In Poland, an interesting area for such research is the Sudetes, particularly the Karkonosze Mts. pluton and Fore-Sudetic Block. The article presents issues of scientific projects prepared in the Division of Renewable Energy of Mineral and Energy Economy Research, Institute of the Polish Academy of Sciences in Kraków, related to the recognition of geothermal conditions of the Sudetic region. On

the background of global research, these projects demonstrate an innovative character mainly by targeting research on the analysis of tectonics and volcanism of the Sudetes as important factors of the presence of local positive thermal anomalies. Implementation of the afore-mentioned projects would create the possibility of extending still modest knowledge of the deep geological structure of the Sudetic area.

**Keywords:** HDR and EGS geothermal technology, Sudetes, Karkonosze pluton, Fore-Sudetic Block, Miocene tectonics, Miocene-Pliocene volcanism

Technologia HDR (ang. *Hot Dry Rock* – gorące suche skały) umożliwia wykorzystanie ciepła bezwodnych utworów skalnych, izolowanych od krążenia wód podziemnych, o temperaturach znacznie przewyższających 100°C, głównie do produkcji energii elektrycznej. Technologia EGS (ang. *Enhanced Geothermal Systems*) jest natomiast ukierunkowana na wykorzystanie ciepła skał o niskich parametrach zbiornikowych i słabych dopływach wód złożowych o temperaturach również powyżej 100°C. W obu przypadkach stosuje się sztuczne szczelinowanie strefy eksploatacyjnej do odbioru ciepła systemem otworowym (najczęściej dubletem otworów: chłonnym i eksploatacyjnym).

Na świecie, szczególnie w ostatnich latach, prowadzone są szeroko zakrojone badania ukierunkowane na poszukiwanie wysokotemperaturowych stref geotermicznych w celu testowania i rozwijania technologii HDR i EGS (Kepińska, 2011). W Europie dotyczy to Francji (Genter i in., 2010), Niemiec (Toralde & Nas, 2010; Zimmermann i in., 2010), Szwajcarii (Wyss & Rybach, 2010), Wielkiej Brytanii (Baria i in., 2010), Litwy (Sliupa i in., 2010) i Polski (Bujakowski i in., 2012; Skrzypczak, 2010, 2011a, b; Ciężkowski i in., 2011; Miecznik, 2011). W innych rejonach świata badania takie podejmowane są na Filipinach (Bayrante i in., 2010), w Australii (de Graaf i in., 2010; Wyborn, 2010; Reid i in., 2010) wraz z Tasmanią (Holgate i in., 2010), w Stanach Zjednoczonych (Zemach i in., 2010), w Indiach (Chandrasekhar & Chandrasekhar, 2010), a także w Korei Południowej (Youngmin i in., 2010).

Mimo że badania prowadzone są w wielu regionach świata, praktyczne zastosowanie technologii HDR lub EGS możliwe było jedynie w niektórych z wymienionych krajów. W Europie działają obecnie zaledwie trzy obiekty eksperymentalne: Soultz-sous-Forêts w Alzacji we Francji (Genter

i in., 2010), Landau na południowym-zachodzie Niemiec (Toralde & Nas, 2010) i Gross Schönebeck na północnym-wschodzie Niemiec (Zimmermann i in., 2010). Mają one raczej charakter poligonów doświadczalnych dla interdyscyplinarnych badań naukowych – od podstawowych po eksperymentalne prowadzone na podstawie zaprojektowanych rozwiązań technicznych.

Warunki geotermiczne w Polsce predysponują nasz kraj do wykorzystania energii geotermalnej w ciepłownictwie (Bujakowski, 2010; Barbacki, 2012), jednak w regionalnych jednostkach krystalicznych mogą występować warunki sprzyjające również produkcji energii elektrycznej z zastosowaniem wymienionych technologii w systemach binarnych. Interesujący pod tym względem obszar stanowią przede wszystkim Sudety i blok przed-sudecki. Wskazują na to dotychczasowe wyniki badań teledetekcyjnych i tektonicznych regionu, dane tektogenetyczne, wulkanogeniczne, petrograficzne i geotermiczne powiązane ze stwierdzonymi zjawiskami endogenicznymi. Perspektywiczne strefy korzystne dla zastosowania technologii HDR i EGS stwierdzono także na obszarze Niżu Polskiego (Bujakowski i in., 2010).

W regionie sudeckim szczególnie zachęcający wydaje się pluton Karkonoszy, co wynika z mechanicznej podatności granitów na proces szczelinowania, wysokiej produkcji ciepła radiogenicznego i znacznej miąższości masywu. Wskazanie plutonu jako perspektywicznego dla technologii HDR i/lub EGS jest również wynikiem wcześniejszych prac prowadzonych przez autorów (Skrzypczak, 2010, 2011a, b; Bujakowski i in., 2012).

Planuje się, że badania ukierunkowane na wskazanie optymalnych lokalizacji dla technologii HDR i EGS obejmą rozpoznanie pola termicznego i anomalii termicznych

<sup>1</sup> Pracownia Odnawialnych Źródeł Energii, Zakład Odnawialnych Źródeł Energii i Badań Środowiskowych, Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk, ul. Wybickiego 7, 31-261 Kraków; buwi@min-pan.krakow.pl, barbacki@min-pan.krakow.pl, robskrzy@min-pan.krakow.pl.

w wytypowanych strefach tego regionu, geometrii głębokich szczelin (uskoków) identyfikowanych m.in. na podstawie rozkładu fotolineamentów, charakteru granicy plutonu Karkonoszy i masywu izerskiego oraz związku wulkanizmu trzeciorzędowego ze strefami głębokich szczelin (uskoków).

Celem artykułu jest zapoznanie czytelników z tematyką i zakresem prac zmierzających do pierwszego w kraju zastosowania technologii HDR i EGS do produkcji energii elektrycznej w warunkach geotermicznych Polski.

### **UZASADNIENIE PODJĘCIA NA OBSZARZE SUDECKIM NOWYCH BADAŃ NAUKOWYCH W CELU ROZPOZNANIA DODATNIICH ANOMALII TERMICZNYCH**

Głównymi kryteriami oceny jednostek geologicznych pod względem ich przydatności dla technologii HDR i EGS powinny być: obecność utworów krystalicznych podatnych na szczelinowanie i odpowiednio duży zasięg głębokościowy masywu krystalicznego. W Polsce warunki takie występują głównie na obszarze Sudetów i bloku przed-sudeckiego. Jak już wspomniano, wyróżnia się tutaj granitowy pluton Karkonoszy – największy masyw krystaliczny o znacznym stopniu izotropowości skał.

W plutonie Karkonoszy stwierdzono także relatywnie wysoką koncentrację pierwiastków promieniotwórczych. W procesie kumulacji ciepła w gorących suchych skałach granitowych za jedno z głównych źródeł ciepła uważa się jego długotrwałą emisję towarzyszącą rozpadowi pierwiastków promieniotwórczych (Górecki, 2006). Występujące w Sudetach koncentracje pierwiastków radioaktywnych są związane przede wszystkim ze złożami rud uranu. Rudy, eksploatowane w Polsce do 1968 r., rozpoznano w Sudetach do głębokości ok. 650 m. Były to niewielkie złoża i wystąpienia żyłowe, strefy żyłne, sztokwerki i strefy mineralizacji rozproszonej w brekcjach uskokowych i spękanych strefach przyuskokowych, głównie w skałach metamorficznych, najczęściej gnejsach o zróżnicowanym składzie petrograficznym (Borucki i in., 1967; Jaskólski, 1967; Banaś & Mochacka, 1986).

Wyniki badań powierzchniowych wskazują, że granity karkonoskie charakteryzują się wyjątkowo wysoką zawartością uranu (Jeliński, 1965; Lis, 1970; Solecki, 2005), która w poszczególnych rejonach wynosi średnio 8–18,5 g/Mg (Lis, 1970). Wyniki badań prowadzonych ostatnio (2012 r.) w rejonie Szklarskiej Poręby sugerują, że średnia produkcja ciepła radiogenicznego (wyznaczona do głębokości 200 m) wynosi w tym rejonie ok.  $6 \mu\text{W}/\text{m}^3$ , co oceniono na podstawie koncentracji pierwiastków radioaktywnych (U, Th, K).

W plutonie Karkonoszy, w rejonie Cieplic Śląskich-Zdroju, od dawna notowano samowypływy wód termalnych. Zlokalizowany tam otwór C-1 jest najgłębszy w Karkonoszach (2002,5 m) i jednocześnie jest najgłębszym zbadanym termicznie otworem w Karkonoszach i bloku przed-sudeckim (Dowgiałło, 2000). Uzyskane dane hydrogeologiczne i termiczne są kontrowersyjne, niemniej jednak na głębokości 1850–1855 m odnotowano temperaturę 98,7°C (Fistek & Dowgiałło, 2003). Zdaniem Dowgiałły (1998) silne spękanie granitów w tej strefie oraz więź hydrauliczna kilku współwystępujących poziomów wodonośnych ułatwiają konwekcyjne krążenie wód do głębo-

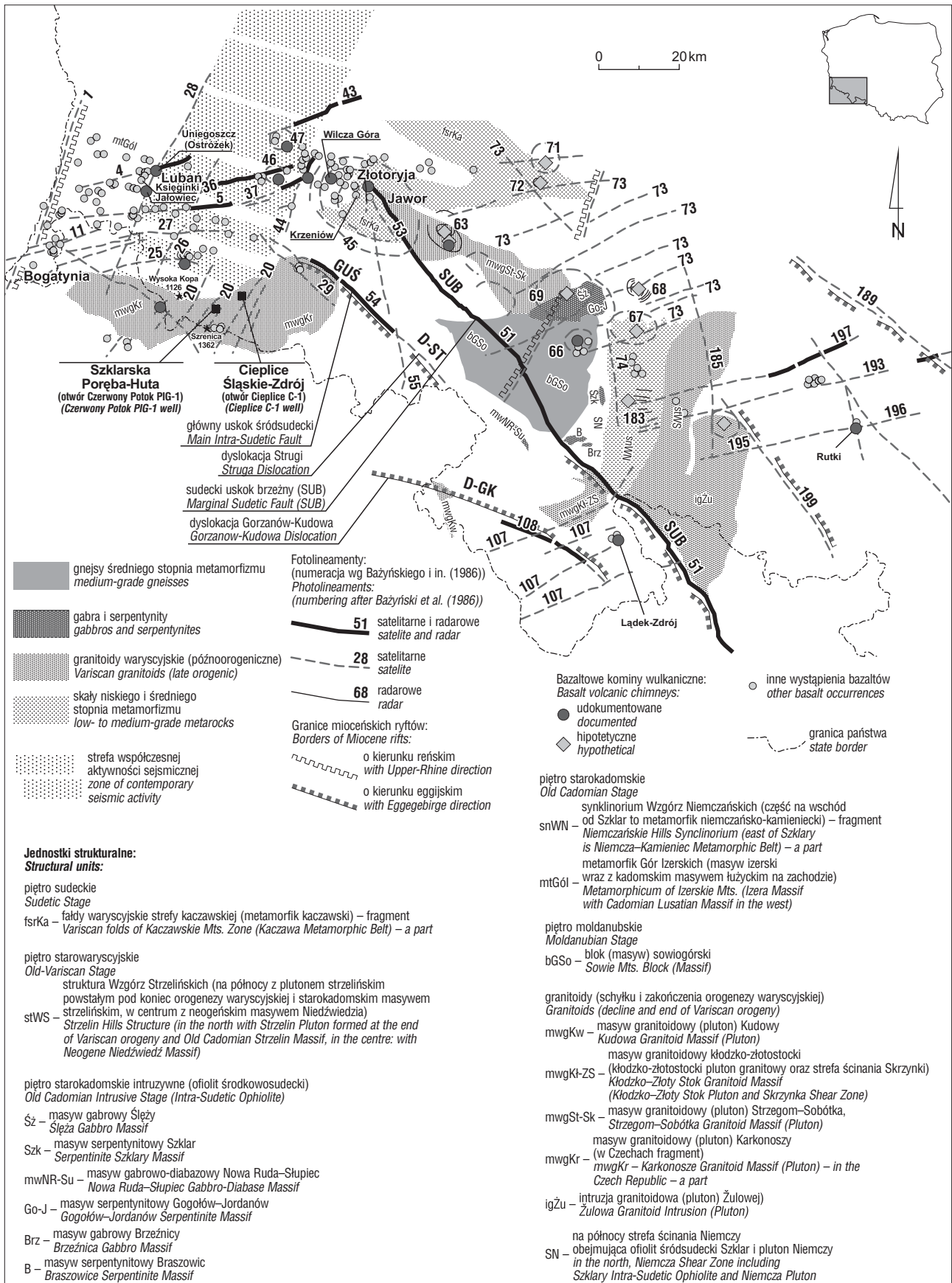
kości co najmniej 3000 m, gdzie ich temperatura może przekraczać 120°C. Nie musi to mieć związku z dodatnią anomalią strumienia cieplnego, a może jedynie świadczyć o konwekcyjnej anomalii termicznej. Geotermiczne dane pomiarowe uzupełniają wyniki pomiarów przeprowadzonych w płytkim (200 m) sondażowym otworze badawczym Czerwony Potok PIG-1 w Szklarskiej Porębie, wykonanym na przełomie 2011 i 2012 r. w ramach prac dotyczących problematyki wykorzystania systemów HDR w Polsce (ryc. 1). Uzyskane wyniki, mimo że wymagają jeszcze weryfikacji, wskazują, że w tej strefie można spodziewać się anomalnie wysokiej temperatury na głębokości 3000 m wynoszącej ok. 110°C, a na głębokości 4000 m – nawet 150°C. W ramach tego samego projektu w pobliżu otworu wykonano ponadto sondowania magnetotelluryczne. Rezultaty badań (niepublikowane) świadczą, że zasięg głębokościowy plutonu może wynosić nawet 10 000 m oraz że nie stanowi on całkowicie jednorodnego masywu (zidentyfikowano strefy o zróżnicowanej oporności).

Średnie regionalne wartości strumienia cieplnego osiągają w plutonie Karkonoszy do  $75 \text{ mW}/\text{m}^2$  (Majorowicz & Wybraniec, 2009; Szewczyk & Gientka, 2009). Według Szewczyka i Gientki (2009) są nieco większe na jego północnym przedpolu, a według Majorowicza i Wybranca (2009) na południowym przedpolu lokalnie przekraczają  $85 \text{ mW}/\text{m}^2$ . Informacje z otworu Czerwony Potok PIG-1 wskazują natomiast, że w rejonie Szklarskiej Poręby możemy mieć do czynienia z anomalią geotermiczną, gdzie wartość strumienia cieplnego znacznie przekracza  $90 \text{ mW}/\text{m}^2$ .

Obecny rozkład pola temperaturowego regionu sudeckiego wynika z jego złożonej historii tektonicznej. W okresie od późnej kredy po kenozoik Sudety wraz z całym masywem czeskim podniesione blokowo w wyniku zachodzących w Alpidach południowej Europy ruchów, którym towarzyszyły kolizje i ekstensje oraz otwieranie się północnego Atlantyku (Ziegler, 1990; Dèzes i in., 2004; Ziegler & Dèzes, 2005). W masywie czeskim i Sudetach rozpoczął się wówczas wulkanizm bazaltowy związany głównie z ryftem Ohře (Dèzes i in., 2004). W pobliżu plutonu Karkonoszy ryft przebiega w kierunku SWW-NEE i sięga co najmniej do Bogatyni i Lubania (Puziewicz i in., 2011). Przypuszczalny przebieg ryftu wyznaczają wskazane przez Bażyńskiego i in. (1986) fotolineamenty nr 4, 5, 11, 25 i 27 widoczne na rycinie 1. W miejscach największej aktywności wulkanicznej wartości strumienia cieplnego przekraczają tam  $80 \text{ mW}/\text{m}^2$  (Majorowicz & Wybraniec, 2009).

Wulkanizm bazaltowy relatywnie najslabiej zaznaczył się w plutonie Karkonoszy (ryc. 1). W rejonie masywu Szrenicy niewielkie wystąpienia bazaltów odpowiadają prawdopodobnie fotolineamentowi nr 20 o kierunku reńskim. W północno-wschodniej części plutonu Karkonoszy erupcje bazaltowe są związane przypuszczalnie z fotolineamentem nr 29 o kierunku eggijskim (ryc. 1).

Na uwagę zasługuje fotolineament nr 28 (Liberec–Křepnica) o długości 80 km (Bażyński i in., 1986) i kierunku reńskim (ryc. 1). Na jego linii – już w masywie izerskim – są usytuowane dwa bazaltowe kominy wulkaniczne (wzgórze Ostrówek w Uniegoszczy i wzniesienie w Jałowcu). Pierwszy występuje w przecięciu z fotolineamentem nr 4 (Sulików–Gościszów; część ryftu Ohře). W pobliżu kominów, w bazalcie z Księginek, udokumentowano pochodzące z głębokości 35–50 km ksenolity, które według Puziewicza



**Ryc. 1.** Szkic geotektoniczny Sudetów i ich otoczenia z uwzględnieniem głównych fotolineamentów oraz dolnośląskiej formacji bazaltowej. Wybrane jednostki strukturalne i ich granice (patrz Bażyński i in., 1986; nazwy jednostek za Mazurem i in., 2010)  
**Fig. 1.** Geotectonic sketch map of the Sudetes and their surroundings including major photolineaments and the Lower Silesia basaltic formation. Structural units and their boundaries (see Bażyński et al., 1986; unit names after Mazur et al., 2010)

i in. (2011) stanowią duże partie płaszczka Ziemi odmłodzone termicznie do 1060–1120°C przed mioceńską aktywnością wulkaniczną i podczas niej. Z kolei w rejonie Złotoryi (Krzeniów, Wilcza Góra) i Jawora w Górach Kaczawskich (kolisty fotolineament nr 45, ryc. 1) odmłodzenie termiczne płaszczka Ziemi związane z wulkanizmem bazaltowym miało przypuszczalnie mniejszą skalę.

Możliwość zasilania termicznego skał starych plutonów granitowych ciepłem intrudujących młodych bazaltów powinna być brana pod uwagę podczas typowania umiejscowienia stref optymalnych dla technologii HDR i EGS. W przypadku lokalizacji stref o podwyższonych temperaturach występujących możliwie płytko istotne wydaje się zatem rozpoznanie na obszarze sudeckim powierzchniowego i przestrzennego usytuowania nekków, kominów (pni) i czopów wulkanicznych oraz ich przypuszczalnych wystąpień (głównie mioceńskich).

Interesujące miejsca do prowadzenia takich prac w strefach występowania udokumentowanych i hipotetycznych bazaltowych kominów wulkanicznych wstępnie wskazano na rycinie 1, gdzie przedstawiono ich położenie w stosunku do: 1) wybranych elementów tektoniki nieciągłej, zwłaszcza głównych szczelin (uskoków) i tektonicznych struktur kolistych wyodrębnionych na podstawie obrazów satelitarnych i/lub radarowych (Bażyński i in., 1986); 2) kontynentalnych mioceńskich stref ryftowych o założeniach eggijskich i reńskich z uwzględnieniem ryftu Ohře (Carlé, 1955); 3) stref współczesnej wzmożonej aktywności tektonicznej wzdłuż linii Cieplice Śląskie-Zdrój–Leszno.

Wyznaczone strefy (ryc. 1) stanowią przypuszczalnie miejsca o potencjalnie wyższych temperaturach i/lub strumieniach ciepła w porównaniu z pozostałymi obszarami. Dotychczasowe informacje o wartościach strumienia ciepłego w Sudetach i na bloku przedsudeckim pochodzą z niewielu punktów pomiarowych. Nie zbadano również związku podwyższonych wartości strumienia ciepła z obecnością wulkanizmu bazaltowego i z przebiegiem głównych fotolineamentów. Tymczasem wysokie wartości strumienia ciepła, ok. 80 mW/m<sup>2</sup> (Szewczyk & Gientka, 2009), występują np. na przecięciu fotolineamentów nr 28 i nr 4 oraz na przecięciu fotolineamentów nr 51 (sudecki uskoczek brzeźny) i nr 55 w obrębie kolistego fotolineamentu nr 45 (ryc. 1). Nieco niższe wartości odnotowano w Łądku-Zdroju (71,2 mW/m<sup>2</sup>; Dowgiało, 1976), a także w Cieplicach Śląskich-Zdroju (79 mW/m<sup>2</sup>; Dowgiało, 2001). W pobliżu kolistych fotolineamentów nr 71 i nr 72, w rejonie przecięcia dwóch systemów fotolineamentów oznaczanych nr 73, zarejestrowano najwyższą wartość strumienia ciepłego – ponad 90 mW/m<sup>2</sup> (Szewczyk & Gientka, 2009).

Przedstawiona szkieletowo geotermiczna charakterystyka regionu wskazuje, że badanie wpływu tektoniki i wulkanizmu na pole temperaturowe regionu sudeckiego, a szczególnie plutonu Karkonoszy, może mieć istotne znaczenie dla optymalnej lokalizacji pilotowej instalacji HDR i/lub EGS.

#### **PLANOWANE BADANIA ZWIĄZANE Z TECHNOLOGIĄ HDR I EGS NA OBSZARZE SUDECKIM – CELE I SPOSOBY REALIZACJI**

W ramach prowadzonych w kraju badań dotyczących wykorzystania technologii HDR i EGS planuje się realizację

dwóch projektów badawczych. Pierwszy będzie dotyczyć rozpoznania warunków geotermicznych plutonu Karkonoszy oraz „geometrii” jego strefy granicznej z masywem izerskim, drugi – oceny roli mioceńskiej tektoniki i wulkanizmu w genezie anomalii geotermicznych. Założono, że współwystępowanie głębokich szczelin i wulkanów mioceńskich może wskazywać strefy wysokich temperatur na niedużych głębokościach, a więc strefy perspektywiczne dla omawianych technologii.

#### **Badania dotyczące warunków geotermicznych w plutonie Karkonoszy**

Celem projektowanych badań jest poszerzenie wiedzy o termice plutonu (głównie na podstawie wyników płytkich badań otworowych i badań geofizycznych, m.in. metodą grawimetryczną i magnetotelluryczną), a także określenie geometrii niektórych stref plutonu, zasięgu przypuszczalnie głębokich szczelin (uskoków) oraz charakteru karkonosko-izerskiej granicy litologicznej. Cel użytkowy stanowi wskazanie stref optymalnych do pozyskiwania energii geotermalnej systemami HDR i EGS na obszarze plutonu (możliwie płytko, o możliwie najwyższej temperaturze).

Wyniki badań geofizycznych zostaną m.in. powiązane z wynikami sondowań magnetotellurycznych uzyskanych w Szklarskiej Porębie w sąsiedztwie otworu Czerwony Potok PIG-1 i z danymi otworowymi z rejonu Cieplice Śląskich-Zdroju. Przewiduje się, że potwierdzą one i uściślą przebieg stref wglębnych spękań w centralnej części Karkonoszy oraz pozwolą na weryfikację wstępnego termicznego modelu strukturalno-parametrycznego tego plutonu. Umożliwią również rozpoznanie przebiegu karkonosko-izerskiej granicy litologicznej w celu oceny geometrii plutonu w jego północnej, brzeźnej strefie. Prowadzone analizy będą nawiązywać do wyników badań z 2012 r. dotyczących lokalizacji powierzchniowych anomalii termicznych w karkonosko-izerskim obszarze granicznym w okolicy masywu Wysockiej Kopy. Odnotowano tam relatywnie duże (rzędu 4°C) zróżnicowanie powierzchniowych temperatur (według satelitarnych zdjęć systemów Landsat 7 oraz TERRA).

Założenia metodyczne zostaną ustalone m.in. na podstawie analizy dotychczasowego stanu wiedzy i wyników przeprowadzonych ostatnio badań testowych (zwłaszcza interpretacji wyników pomiarów krzywej termicznej w sondazowym otworze badawczym Czerwony Potok PIG-1 i krzywej termicznej z otworu C-1 w Cieplicach Śląskich-Zdroju) oraz modelu strukturalno-termicznego, w którym przyjęto wiele założeń hipotetycznych wymagających weryfikacji.

#### **Badania dotyczące roli mioceńskiej tektoniki i wulkanizmu we współczesnym kształtowaniu warunków geotermicznych na obszarze sudeckim**

Cele planowanych badań to identyfikacja powierzchniowych anomalii termicznych oraz zbadanie ich związku z występowaniem mioceńskich wulkanów i wglębnych spękań (szczelin – uskoków), ocena geometrii kontaktu bazaltów i stref głębokich spękań, a także opracowanie koncepcji ciepłego zasilania tych stref. Efektem prac będzie również poszerzenie wiedzy o wglębnej budowie geologicznej dolnośląskiej formacji bazaltowej.

Utylitarną częścią badań będzie wskazanie stref perspektywicznych dla technologii HDR i EGS poza obszarem Karkonoszy.

Analiza dostępnych danych geologicznych, geofizycznych i teledetekcyjnych posłuży do wyznaczenia na obszarze Sudetów i bloku przedsudeckiego takiej strefy, gdzie mioceńskie kominy bazaltowe występują w bliskim sąsiedztwie głównych spękań i gdzie spodziewane są podwyższone wartości temperatur powierzchniowych. Wyniki badań teledetekcyjnych (analiza zdjęć satelitarnych i lotniczych) umożliwią potwierdzenie lub zlokalizowanie przewidywanych powierzchniowych anomalii temperaturowych, a także uściślenie przebiegu zakładanej głębokiej strefy szczelinowej.

Uzyskane wyniki pozwolą na wybranie obszaru, na którym zostaną wykonane badania szczegółowe (m.in. badania magnetotelluryczne, grawimetryczne, magnetometryczne, termowizyjne, pomiary temperatur stref powierzchniowych) w celu stwierdzenia, czy i jak koincydencja bazaltów i stref spękań wgłębnych koreluje się z powierzchniowymi anomaliami temperaturowymi. Wyniki badań szczegółowych mają więc potwierdzić tezę, że na obszarze sudeckim wystąpienia kominów bazaltowych w strefach głównych spękań (głębokich szczelin – uskoków) są wskaźnikami stref dodatnich anomalii geotermicznych, rozumianych bądź jako anomalie strumienia ciepłego, bądź jedynie jako anomalie temperaturowe w strefie przypowierzchniowej (strefy konwekcji).

W ramach geofizycznych badań szczegółowych planuje się także zbadanie geometrii i zasięgu głębokościowego kominów bazaltowych. Weryfikacja uzyskanych wyników, dotyczących głównie takich parametrów jak rozkład temperatur, gradient geotermiczny, strumień ciepły i przewodność cieplna, zostanie przeprowadzona na podstawie jednego lub dwóch płytkich otworów wiertniczych. Otrzymane dane posłużą do opracowania modeli strukturalno-temperaturowych wybranych stref i modeli systemów HDR i EGS we wskazanych perspektywicznych lokalizacjach.

## PODSUMOWANIE

Celem planowanych badań naukowych jest termiczne rozpoznanie wytypowanych struktur obszaru sudeckiego – plutonu Karkonoszy i jego północnego przedpola. Badania te mają zarówno walor poznawczo-edukacyjny, jak i użytkowy, związany z lokalizacją stref przydatnych pod względem rozwoju geotermalnych technologii HDR i EGS. Nowością prac jest przede wszystkim próba potwierdzenia i scharakteryzowania związku dodatnich anomalii termicznych ze strefami głębokich spękań i z towarzyszącymi im mioceńskimi wulkanami. Spękania te stanowią przypuszczalnie główne drogi migracji płynów termalnych, ale mogły również być drogami migracji law bazaltowych w miocenie.

Planowane badania ukierunkowane będą w szczególności na zoptymalizowanie lokalizacji przyszłych zakładów geotermalnych – głównie wykorzystujących technologię HDR lub EGS – w regionie sudeckim. Istotne jest, że ewentualna przyszła instalacja nie musi oznaczać kolizji z wymogami ochrony przyrody regionu sudeckiego, ponieważ wśród różnych systemów wykorzystywania energii geotermalnej technologii HDR i EGS powodują minimalny konflikt między eksploatacją zasobów a stanem środo-

wiska przyrodniczego. W warunkach sudeckich również problemy eksploatacyjne systemów EGS, które są związane z korozją, kolmatacją otworów i zasoleniem wód, byłyby znacznie mniejsze ze względu na specyfikę technologii i parametry hydrogeologiczne płynów złożowych (Tomaszewska, 2011; Miecznik & Pająk, 2012; Tomaszewska & Pająk, 2012a, b, 2013).

Metody poszukiwania struktur przydatnych dla technologii HDR lub EGS są często standardowe, natomiast uzyskanie efektywnej pracy obiektu wykorzystującego te technologie stanowi każdorazowo indywidualne zagadnienie techniczne, wynikające z lokalnej specyfiki warunków hydrogeologicznych i geotermicznych.

Autorzy pragną podziękować anonimowym Recenzentom za konstruktywne i cenne uwagi, które przyczyniły się do nadania pracy jej ostatecznej formy.

## LITERATURA

- BANAŚ M. & MOCHNACKA K. 1986 – The two uranium deposits in the polish part of Sudety Mountains. [W:] Vein type uranium deposits. Report of the working group on uranium geology organized by the International Atomic Energy Agency. Tech. Doc., 361: 335–357.
- BARBACKI A. 2012 – Ocena energetycznej jakości zasobów geotermalnych – aspekty termodynamiczny i terminologiczny. *Prz. Geol.*, 60: 117–120.
- BARIA R., MACPHERSON-GRANT G., BAUMGAERTNER J., JUPE A. & COWLES J. 2010 – Engineered geothermal program in the UK. [W:] Proceedings of the World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, April 25–29, 2010 [CD-ROM]. *Int. Geotherm. Assoc. Paper 3167*, s. 4.
- BAYRANTE L.F., CARANTO J.A. & MALATE R.C.M. 2010 – EGS, the energy for the next millennium: potential sites in the Philippines. [W:] Proceedings of the World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, April 25–29, 2010 [CD-ROM]. *Int. Geotherm. Assoc. Paper 3125*, s. 9.
- BAŻYŃSKI J., GRANICZNY M., OBERC J. & WILCZYŃSKI M.S. 1986 – Mapa fotogeologiczna Sudetów 1 : 200 000. *Wyd. Geol.*, Warszawa.
- BORUCKI J., GŁOWACKI Z., MASŁOWSKI W., SAŁDAN M., UBERNA J. & ZAJĄCZKOWSKI W. 1967 – Ocena perspektyw poszukiwawczych złóż rud uranu w Polsce. *Pr. Inst. Geol.* (bez numeru).
- BUJAKOWSKI W. 2010 – Wykorzystanie wód termalnych w Polsce (stan na rok 2009). *Prz. Geol.*, 58: 580–588.
- BUJAKOWSKI W., BARBACKI A.P., SKRZYPCZAK R. & KASZTELEWICZ A. 2012 – Planowane wiercenie badawcze w Karkonoszach dla potrzeb modelowania termicznego systemów gorących suchych skał (HDR). *Prz. Geol.*, 60: 199–205.
- BUJAKOWSKI W., HOŁOJUCH G. & TOMASZEWSKA B. 2010 – Zbiornik triasowy jako potencjalne źródło wód geotermalnych na przykładzie otworu wiertniczego Kompina-2. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 439: 71–76.
- CARLÉ W. 1955 – Bau und Entwicklung der Südwestdeutschen Großscholle. *Beih. Geol. Jb.*, 16: 1–272.
- CHANDRASEKHARAM D. & CHANDRASEKHAR V. 2010 – Hot Dry Rock Potential in India: future road map to make India energy independent. [W:] Proceedings of the World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, April 25–29, 2010 [CD-ROM]. *Int. Geotherm. Assoc. Paper 3101*, s. 4.
- CIEŻKOWSKI W., FARBISZ J. & GRZEGORCZYK K. 2011 – Projekt głębokiego wiercenia w krystaliniku sudeckim dla potrzeb elektrowni wykorzystującej ciepło ziemi metodą HDR. *Tech. Posz. Geol., Geotermia, Zrówn. Roz.*, 50: 81–91.
- DÉZES P., SCHMID S.M. & ZIEGLER P.A. 2004 – Evolution of the European Cenozoic Rift System: interaction of the Pyrenean and Alpine orogens with the foreland lithosphere. *Tectonophysics*, 389: 1–33.
- DOWGIAŁŁO J. 1976 – Wody termalne Sudetów. *Acta Geol. Pol.*, 26: 617–640.
- DOWGIAŁŁO J. 1998 – Geotermometryczne prognozy temperatury a wyniki poszukiwań wód termalnych w Jeleniej Górze-Cieplicach. [W:] Jankowski A.T. i in. (red.) *Hydrogeologia obszarów zurbanizowanych i uprzemysłowionych*. *Pr. Nauk. Uniw. Śl.*, 1718: 70–78.

- DOWGIAŁŁO J. 2000 – Thermal water prospecting results at Jelenia Góra-Cieplice (Sudetes, Poland) versus geothermometric forecasts. *Env. Geol.*, 39: 433–436.
- DOWGIAŁŁO J. 2001 – Sudecki region geotermiczny (SRG) – określenie, podział, perspektywy poszukiwawcze. [W:] Bocheńska T. & Staško S. (red.) *Współczesne Problemy Hydrogeologii*, 10 (1): 301–308.
- FISTEK J. & DOWGIAŁŁO J. 2003 – Wody termalne Cieplic Śląskich w świetle badań geologiczno-poszukiwawczych wykonywanych w latach 1963–73 i 1997–98. [W:] Ciężkowski W. i in. (red.) *Sudety Zachodnie: od wendy do czwartorzędu*. Wyd. WIND, Wrocław: 207–224.
- GENTER A., GOERKE X., GRAFF J.-J., CUENOT N., KRALL G., SCHINDLER M. & RAVIER G. 2010 – Current status of the EGS Soultz Geothermal Project (France). [W:] *Proceedings of the World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, April 25–29, 2010 [CD-ROM]*. Int. Geotherm. Assoc. Paper 3124, s. 6.
- GÓRECKI W. 2006 – Opis zastosowań wód i energii geotermalnej. [W:] Górecki W. (red.) *Atlas zasobów geotermalnych formacji mezozoicznej na Niżu Polskim*. MŚ, NFOŚiGW, ZSE AGH, PiG, Kraków: 36–37.
- GRAAF L., DE PALMER R. & REID I. 2010 – The Limestone Coast Geothermal Project, South Australia: a unique hot sedimentary aquifer development. [W:] *Proceedings of the World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, April 25–29, 2010 [CD-ROM]*. Int. Geotherm. Assoc. Paper 3134, s. 7.
- HOLGATE F.L., GOH H.K.H., WHELLER G. & LEWIS R.G.J. 2010 – The Central Tasmanian Geothermal Anomaly: a prospective new EGS province in Australia. [W:] *Proceedings of the World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, April 25–29, 2010 [CD-ROM]*. Int. Geotherm. Assoc. Paper 3133, s. 6.
- JASKÓLSKI S. 1967 – Polimetaliczna mineralizacja tlenkowo-siarczkowa w granitognejsach Gór Izerskich (Dolny Śląsk) i jej pochodzenie. *Pr. Geol. PAN*, 43: 1–82.
- JELIŃSKI A. 1965 – Geochemia uranu w granitowym masywie Karkonoszy z uwzględnieniem innych masywów granitoidowych Dolnego Śląska. *Biul. Inst. Geol.*, 193: 5–110.
- KĘPIŃSKA B. 2011 – Energia geotermalna na świecie – stan wykorzystania, perspektywy rozwoju. *Tech. Posz. Geol., Geotermia, Zrówn. Roz.*, 50: 27–35.
- LIS J. 1970 – Geochemia niektórych pierwiastków w granitoidowym masywie Karkonoszy. *Biul. Inst. Geol.*, 224: 5–101.
- MAJOROWICZ J. & WYBRANIEC S. 2009 – Variscan geotherms in the context of the new heat flow map of Central Europe corrected for the paleoclimatic glacial-Holocene change. *SDGG*, 63: 168.
- MAZUR S., ALEKSANDROWSKI P. & SZCZEPAŃSKI J. 2010 – Zarys budowy i ewolucji tektonicznej wartyjskiej struktury Sudetów. *Prz. Geol.*, 58: 133–145.
- MIECZNIK M. 2011 – Wpływ ciepła radiogenicznego na temperaturę złożową wody termalnej podczas eksploatacji oraz w okresie poeksploatacyjnym. *Techn. Posz. Geol., Geotermia, Zrówn. Roz.*, 50: 117–130.
- MIECZNIK M. & PAJĄK L. 2012 – Przegląd procesów zachodzących w systemach HDR w kontekście modelowania numerycznego efektów ich pracy. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 448: 247–250.
- PUZIEWICZ J., MATUSIAK-MAŁEK M., NTAFLAS T. & GRÉGOIRE M. 2011 – Górny płaszcz Ziemi pod SW Polską: źródło kenozoicznego wulkanizmu alkalicznego. [W:] Żeleźniewicz A. i in. (red.) *Mezozoik i kenozoik Dolnego Śląska*. Wyd. WIND, Wrocław: 37–43.
- REID P.W., BENDALL B.R. & MCALLISTER L. 2010 – Developing large scale, base load EGS power – the Paralana Project, South Australia. [W:] *Proceedings of the World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, April 25–29, 2010 [CD-ROM]*. Int. Geotherm. Assoc. Paper 3132, s. 3.
- SKRZYPCZAK R. 2010 – Skały magmowe i metamorficzne Sudetów i ich przedgórze – implikacje dla technologii HDR. *Techn. Posz. Geol., Geotermia, Zrówn. Roz.*, 49: 99–117.
- SKRZYPCZAK R. 2011a – Wskazówki dla poszukiwania miejsc lokalizacji tzw. suchych otworów geotermalnych oraz miejsc lokalizacji badań wstępnych. *Z. Nauk. IGSMiE PAN*, 80: 75–91.
- SKRZYPCZAK R. 2011b – Propozycje lokalizacji badań dla potrzeb geotermalnej technologii gorących suchych skał w rejonie Sudetów. *Techn. Posz. Geol., Geotermia, Zrówn. Roz.*, 50: 93–108.
- SLIAUPA S., MOTUZA G., KORABLIOVA L., CIURAITIS K. & PURONAS V. 2010 – Geothermal potential of hot granites of Lithuania. [W:] *Proceedings of the World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, April 25–29, 2010 [CD-ROM]*. Int. Geotherm. Assoc. Paper 0153, s. 8.
- SOLECKI A.T. 2005 – Radioaktywność masywu granitowego Karkonoszy. [W:] Mierzejewski M. (red.) *Karkonosze. Przyroda nieożywiona i człowiek*. Wyd. Uniw. Wroc., Wrocław: 261–270.
- SZEWczyk J. & GIENKA D. 2009 – Terrestrial heat flow density in Poland – a new approach. *Geol. Quart.*, 53: 125–140.
- TOMASZEWSKA B. 2011 – The use of ultrafiltration and reverse osmosis in the desalination of low mineralized geothermal waters. *Arch. Env. Protect.*, 37: 63–77.
- TOMASZEWSKA B. & PAJĄK L. 2012a – Dynamics of clogging processes in injection wells used to pump highly mineralized thermal waters into the sandstone structures lying under the polish lowland. *Arch. Env. Protect.*, 38: 105–117.
- TOMASZEWSKA B. & PAJĄK L. 2012b – Geothermal water resources management – economic aspects of their treatment. *Gosp. Sur. Min.*, 28: 59–70.
- TOMASZEWSKA B. & PAJĄK L. 2013 – Using treated geothermal water to replenish network water losses in a district heating system. *Pol. J. Environ. Stud.*, 22: 249–256.
- TORALDE J.S.S. & NAS S. 2010 – Controlled pressure drilling applications for Enhanced Geothermal Systems. [W:] *Proceedings of the World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, April 25–29, 2010 [CD-ROM]*. Int. Geotherm. Assoc. Paper 3162, s. 5.
- WYBORN D. 2010 – Update of development of the Geothermal Field in the granite at Innamincka, South Australia. [W:] *Proceedings of the World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, April 25–29, 2010 [CD-ROM]*. Int. Geotherm. Assoc. Paper 3121, s. 4.
- WYSS R. & RYBACH L. 2010 – Developing deep geothermal resources in Switzerland. [W:] *Proceedings of the World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, April 25–29, 2010 [CD-ROM]*. Int. Geotherm. Assoc. Paper 3169, s. 4.
- YOUNGMIN L., SEONGHO P., JONGCHAN K., HYOUNG CH.K. & MIN-HO K. 2010 – Geothermal resource assessment for EGS in Korea. [W:] *Proceedings of the World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, April 25–29, 2010 [CD-ROM]*. Int. Geotherm. Assoc. Paper 3120, s. 3.
- ZEMACH E., DRAKOS P., ROBERTSON-TAIT A. & LUTZ S.J. 2010 – Feasibility evaluation of an „in-field” EGS project at Desert Peak, Nevada, USA. [W:] *Proceedings of the World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, April 25–29, 2010 [CD-ROM]*. Int. Geotherm. Assoc. Paper 3159, s. 10.
- ZIEGLER P.A. & DÉZES P. 2005 – Evolution of the lithosphere in the area of the Rhine Rift System. *Int. J. Earth Sci.*, 94: 594–614.
- ZIEGLER P.A. 1990 – Geological atlas of Western and Central Europe. 2<sup>nd</sup> edition. Shell Int. Maatschappij B.V. Geol. Soc. Publ. House, Bath, s. 239.
- ZIMMERMANN G., REINICKE A., BLÖCHER G., MOECK I., KWIATEK G., BRANDT W., REGENSPURG S., SCHULTE T., SAADAT A. & HUENGES E. 2010 – Multiple fracture stimulation treatments to develop an Enhanced Geothermal System (EGS) – conceptual design and experimental results. [W:] *Proceedings of the World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, April 25–29, 2010 [CD-ROM]*. Int. Geotherm. Assoc. Paper 3106, s. 5.

Praca wpłynęła do redakcji 21.12.2012 r.  
Akceptowano do druku 9.08.2013 r.