

Wpływ parametrów sprężystych skał na proces hydraulicznego szczelinowania dla potrzeb wspomaganych systemów geotermalnych (EGS) na terenie Polski

Autor:

mgr Rafał Moska

Promotor:

prof. dr hab. Krzysztof Labus

Opiekun ze strony przedsiębiorstwa:

dr hab. inż. Piotr Kasza, prof. INiG-PIB

Streszczenie rozszerzone

Wśród nowoczesnych technologii niskoemisyjnego wytwarzania energii znaczny potencjał wykazują wspomagane systemy geotermalne, ang. *enhanced geothermal systems* (EGS) (Lu, 2018). Tworzone są one w specyficznych formacjach skalnych tzw. gorących suchych skałach, ang. *hot dry rocks* (HDR). Skały te zalegają na dużych głębokościach, najczęściej poniżej 4000 metrów, w warunkach wysokich temperatur i ciśnień. Charakteryzują się one bardzo niską przepuszczalnością, porowatością i najczęściej nie zawierają wody lub zawierają jej bardzo małe ilości (Wójcicki i inni, 2013). Ze względu na powyższe, specyficzne cechy, w warunkach naturalnych tego rodzaju skały nie mogą być wykorzystywane w geotermii, ponieważ ich energia termiczna nie może być w technicznie możliwy i ekonomicznie uzasadniony sposób transportowana na powierzchnię. Odpowiedzią na problemy z dostępnością do energii skał typu HDR jest wytworzenie lub zwiększenie w tych formacjach przewodności hydraulicznej, czemu odpowiada termin „wspomaganie” w nazewnictwie tych systemów. Zasada działania kolektora geotermalnego typu EGS polega na wykorzystaniu energii cieplnej formacji HDR, udostępnionej za pomocą szczelin w górotworze łączących ze sobą odwierty chłonne i produkcyjne, w których ciecz robocza krąży w obiegu zamkniętym (Tester i inni, 2006). Ciecz taka jest tłoczona z powierzchni w sposób wymuszony do odwiertu chłonnego, na głębokości docelowej nagrzewa się w sieci wytworzonych szczelin łączących odwiert chłonny z produkcyjnym, a następnie jest transportowana na powierzchnię, gdzie jej temperatura jest wykorzystywana do produkcji energii elektrycznej i cieplnej (figura 1).

Głównymi cechami odróżniającymi EGS od geotermii konwencjonalnych jest konieczność sztucznego zwiększenia przewodności w górotworze, umożliwiającego połączenie ze sobą kilku otworów na głębokości docelowej. Praktyka przemysłowa pokazuje, że dokonuje się tego najczęściej przy wykorzystaniu technologii hydraulicznego szczelinowania, ang. *hydraulic fracturing* (HF), znanej z przemysłu naftowo-gazowniczego. Tematyka pozyskiwania energii cieplnej skał systemami geotermalnymi typu wspomagane, na wzór projektów prowadzonych w Europie Zachodniej, jest od kilkunastu lat dyskutowana w polskich kręgach naukowych. Dotychczas przeprowadzone prace miały na celu ocenę możliwości wykorzystania struktur geologicznych typu HDR na obszarze Polski do budowy systemów EGS (Wójcicki

i inni, 2013) oraz modelowania systemu CO₂-EGS wraz z analizą ekonomiczno-środowiskową (energisers.agh.edu.pl).

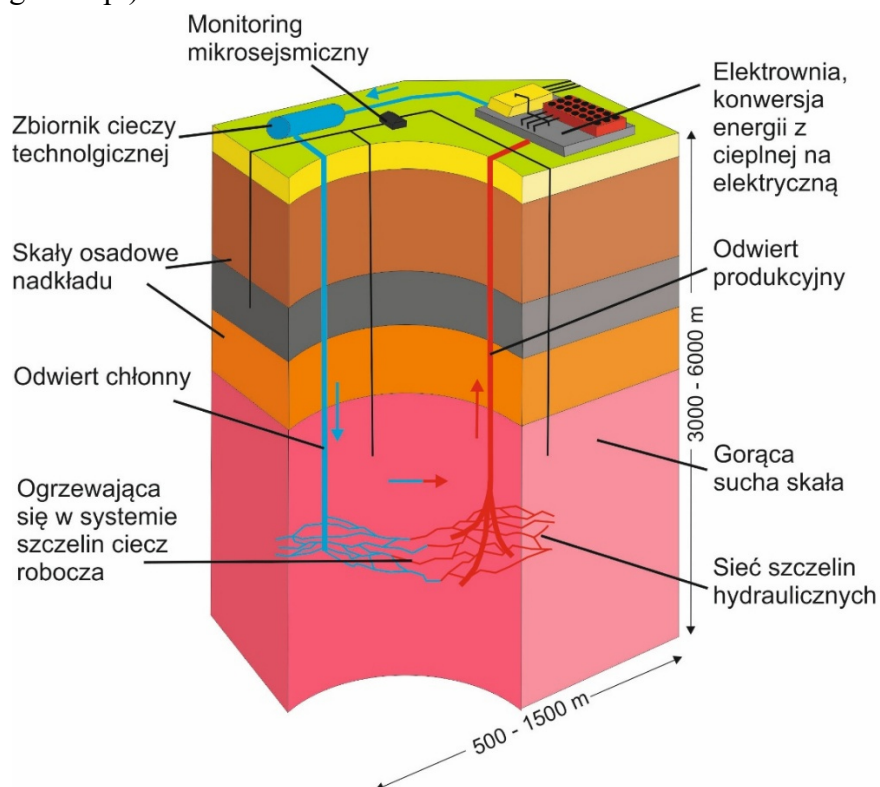


Figura 1: Schemat działania wspomaganego systemu geotermalnego (Moska i inni, 2021).

Efekty tych prac nie były jednakże ukierunkowane na opracowanie jakichkolwiek elementów technologii hydraulicznego szczelinowania, mimo że ich prawidłowy dobór jest podstawą późniejszego optymalnego funkcjonowania EGS. Nie analizowano również wpływu poszczególnych elementów technologii HF na geometrię kolektora geotermalnego oraz wpływu właściwości mechanicznych HDR na wymiary wytwarzanych szczelin. Podane powyżej powody skłoniły autora do podjęcia badań nad wpływem parametrów sprężystości skał na proces hydraulicznego szczelinowania w systemach EGS na przykładzie perspektywicznych dla EGS formacji w Polsce. Przyjęto założenie, że na podstawie laboratoryjnie wyznaczonych dynamicznych parametrów sprężystości skał, danych petrofizycznych, a także danych dotyczących naprężeń złożowych można wyznaczyć geometrię szczeliny powstałej w hipotetycznym zabiegu hydraulicznego szczelinowania w strukturze geologicznej perspektywicznej z punktu widzenia wspomaganego systemu geotermalnego.

Sformułowano następujące cele badawcze:

- określenie wpływu parametrów sprężystości skał formacji docelowej na geometrię szczeliny tworzonej w procesie HF w warunkach ciśnienia i temperatury typowych dla obszarów perspektywicznych dla systemów geotermalnych typu EGS na terenie Polski,
- określenie zależności pomiędzy zmianami ciśnienia podczas testów geomechanicznych a parametrami sprężystości skał,

- określenie korelacji pomiędzy parametrami wyznaczonymi metodami ultradźwiękową oraz wytrzymałościową.
- dopracowanie metodyki badań ultradźwiękowych próbek skał reprezentujących kolektory HDR w warunkach wysokiego ciśnienia i temperatury, poprzedzone modyfikacją oprzyrządowania badawczego dostosowującą je do bezpiecznej pracy w tych warunkach,
- wykonanie symulacji numerycznych geometrii szczelin w wybranych obszarach perspektywicznych dla EGS w Polsce,
- przygotowanie ogólnych rekomendacji technologicznych do zabiegów HF w analizowanych formacjach.

Cele te zrealizowano na podstawie dogłębnej analizy literaturowej przeprowadzonej przez doktoranta, samodzielnie przeprowadzonych badań laboratoryjnych na próbkach skalnych oraz symulacji numerycznych geometrii szczelin.

Niniejsza dysertacja została przygotowana w ramach programu Doktorat Wdrożeniowy edycja V, we współpracy pomiędzy Politechniką Śląską (PŚ), a Instytutem Nafty i Gazu - Państwowym Instytutem Badawczym (INiG-PIB). Działalność INiG-PIB zgodnie z polityką rozwoju firmy na lata 2020-2025 ukierunkowana jest na rozwój usług związanych z energetyką bazującą na surowcach odnawialnych, w tym energetyką geotermalną. Realizacja tej dysertacji jest odpowiedzią na potrzebę pogłębienia wiedzy INiG-PIB w aspekcie niekonwencjonalnych, odnawialnych technologii energetycznych jakimi, między innymi, są EGS. Jej efekty pozwolą na poszerzenie oferty badawczej, w szczególności w aspekcie badań wytrzymałościowych skał z dużych głębokości oraz projektowania elementów technologii HF w HDR.

Rozprawa doktorska została zrealizowana w formie cyklu pięciu spójnych tematycznie publikacji naukowych wymienionych poniżej. Wkład współautorów publikacji został zadeklarowany w oświadczeniach przechowywanych przez autora rozprawy oraz współautorów publikacji.

- I. **Rafał Moska, K. Labus, P. Kasza, *Hydraulic Fracturing in Enhanced Geothermal Systems – Field, Tectonic and Rock Mechanics Conditions – A Review*, Energies, Volume 14, 5725, 2021 DOI:10.3390/en14185725 (IF₂₀₂₁=3.252)**
Wkład doktoranta wynosił **60%** i obejmował: opracowanie koncepcji artykułu, wykonanie przeglądu literaturowego, opracowanie manuskryptu i wykonanie wizualizacji.
- II. **Rafał Moska, K. Labus, P. Kasza, A. Moska, *Geothermal Potential of Hot Dry Rock in South-East Baltic Basin Counties – A Review*, Energies, Volume 16, 1662, 2023 DOI: 10.3390/en16041662 (IF₂₀₂₃=3.000)**
Wkład doktoranta wynosił **60%** i obejmował: opracowanie koncepcji artykułu, wykonanie przeglądu literaturowego, opracowanie manuskryptu, wykonanie wizualizacji oraz nadzór ogólny.

- III. **Rafał Moska**, K. Labus, P. Kasza, *Dynamic Elastic Properties, Petrophysical Parameters and Brittleness of Hot Dry Rocks from Prospective Areas of Central Europe*, Advances in Geo-Energy Research, Volume 14, 2, 90-105, 2024. DOI: 10.46690/ager.2024.11.03 (**IF₂₀₂₄=9.000**)
Wkład doktoranta wynosił **80%** i obejmował: opracowanie koncepcji artykułu, wykonanie przeglądu literaturowego, wykonanie badań laboratoryjnych, opracowanie wyników badań, opracowanie manuskryptu, wykonanie wizualizacji oraz nadzór ogólny.
- IV. K. Labus, **Rafał Moska**, M. Labus, *Potential Enhanced Geothermal System in Western Poland – Petrothermal and Geochemical Issues*, Energies, Volume 18, 876, 2025. DOI: 10.3390/en18040876 (**IF₂₀₂₅=3,200**)
Wkład doktoranta wynosił **50%** i obejmował: wykonanie badań laboratoryjnych, przeglądu literaturowego, edycji manuskryptu oraz jego korekty.
- V. **Rafał Moska**, K. Labus, P. Kasza, *Impact of Rock Elastic Properties on Fracture Geometry in Potential Enhanced Geothermal Systems in Poland*, Energies, Volume 18, 2869, 2025. DOI: 10.3390/en18112869 (**IF₂₀₂₅=3,200**)
Wkład doktoranta wynosił **80%** i obejmował: opracowanie koncepcji artykułu, wykonanie przeglądu literaturowego, wykonanie badań laboratoryjnych metodą ultradźwiękową, opracowanie wyników badań, wykonanie symulacji numerycznych i opracowanie ich wyników, opracowanie manuskryptu, opracowanie wizualizacji oraz nadzór ogólny.

W artykule I zaprezentowano wyniki przeglądu literaturowego obejmującego najważniejsze uwarunkowania geologiczne, złożowe oraz elementy technologii hydraulicznego szczelinowania w najistotniejszych projektach EGS prowadzonych na świecie. Przeanalizowane publikacje naukowe oraz sprawozdania z projektów badawczych jasno wskazują, że hydrauliczne szczelinowanie jest najczęściej używaną i najskuteczniejszą metodą tworzenia kolektorów geotermalnych w skałach typu HDR, zarówno osadowych jak i magmowych.

Jednymi z najistotniejszych kwestii dotyczących stymulacji hydraulicznej formacji HDR są różnice w mechanizmie stymulacji w zależności od typu litologicznego skały. Formacje osadowe są stymulowane w mechanizmie tensyjnym. Powstają w nich najczęściej nowe indukowane szczeliny, propagujące w kierunku prostopadłym do minimalnego naprężenia horyzontalnego. Natomiast w formacjach magmowych głównymi arteriami przewodności są reaktywowane w mechanizmie hydrościnnania szczeliny naturalne.

Na obszarze Polski zidentyfikowano kilka regionów o podwyższonym potencjale geotermalnym, charakteryzujących się korzystnym gradientem geotermalnym. Do najbardziej perspektywicznych zalicza się m.in. rejon Karkonoszy, blok Gorzowa, nieckę szczecińską, nieckę mogileńsko-lódzką oraz blok Górnośląski (figura 2).

Zebrane w publikacji dane umożliwiły określenie najbardziej perspektywicznych obszarów badawczych przewidzianych do szczegółowej analizy w ramach doktoratu oraz

zdefiniowanie zakresu badań laboratoryjnych omówionych w artykule III i IV. Pozwoliły one także na opracowanie założeń symulacji numerycznych zabiegów hydraulicznego szczelinowania dopasowanych do konkretnych warunków geologiczno-złożowych perspektywicznych obszarów w Polsce zaprezentowanych w artykule V.

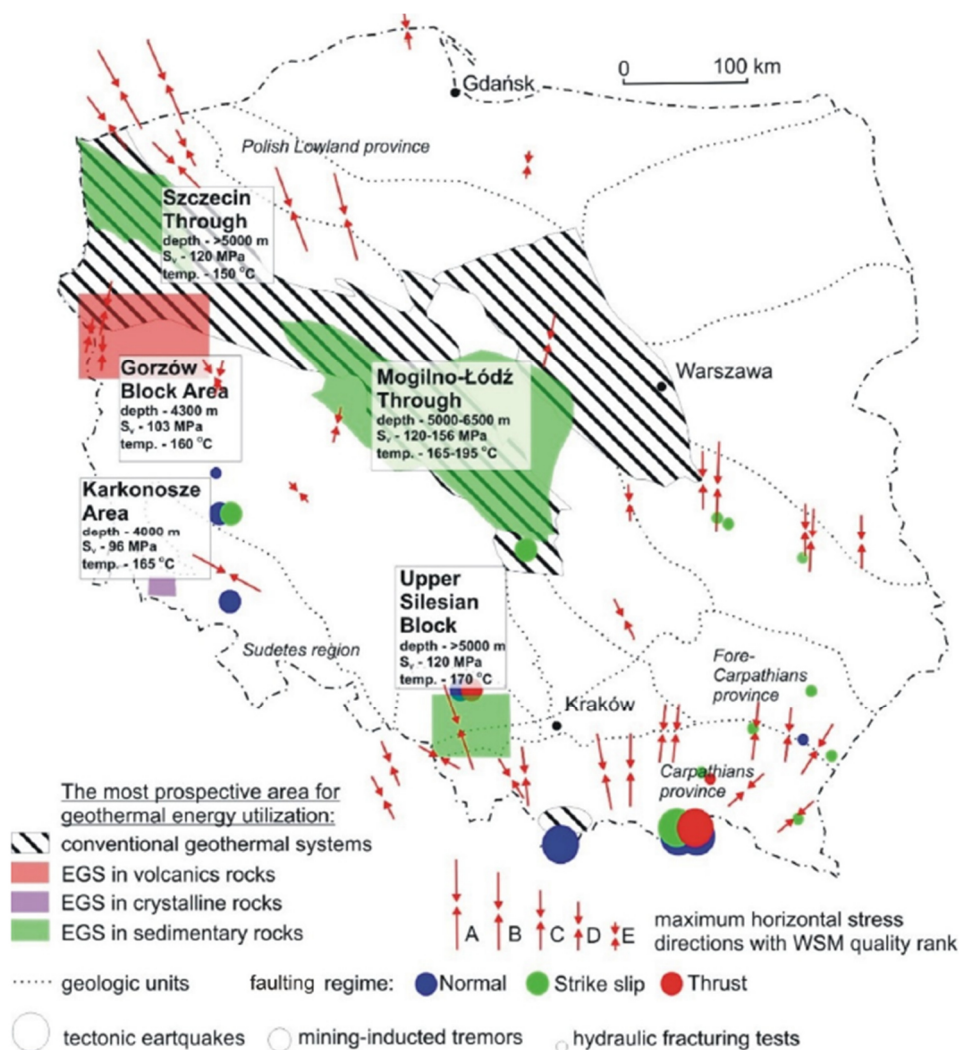


Figura 2: Obszary perspektywiczne dla geotermii wspomaganej w Polsce (Moska i inni, 2021)

Artykuł II stanowi uzupełnienie przeglądu literatury rozbudowując zagadnienia dotyczące obszarów perspektywicznych dla technologii EGS w Europie o kraje bałtyckie oraz porównanie warunków geologicznych w tych obszarach do warunków Polskich. W scharakteryzowanych w artykule krajach południowo-wschodniej części basenu bałtyckiego (Litwa, Łotwa, Estonia) rozkład gradientu geotermalnego oraz gęstości strumienia ciepłego nie odbiega znacząco od wartości obserwowanych w Europie Zachodniej. Potencjał HDR w tych regionach związany jest głównie z obecnością podłoża krystalicznego, jednakże niewystarczające rozpoznanie lokalnych warunków tektonicznych, w szczególności rozwoju naturalnych stref szczelinowych i uskokowych mających duże znaczenie podczas stymulacji hydraulicznej, stanowi główną barierę rozwoju technologii EGS.

Informacje i dane zgromadzone w artykule II umożliwiły wyznaczenie najbardziej perspektywicznych obszarów badawczych, które były szczegółowo analizowane w artykułach III, IV i V.

W artykule III zostały zaprezentowane wyniki badań laboratoryjnych skał typu HDR z wybranych perspektywicznych dla EGS obszarów w Polsce. Wszystkie trzy przeanalizowane formacje, tj. karkonoskie granity, wulkanity bloku Gorzowa oraz piaskowce z niecki mogileńsko-łódzkiej, charakteryzowały się parametrami petrofizycznymi pozwalającym zaklasyfikować je jako skały typu petrotermalnego odpowiedniego dla EGS (figura 3). Próbkę granitów cechowały się silnym zróżnicowaniem parametrów sprężystości w zależności od stopnia przeobrażenia hydrotermalnego. Piaskowce posiadały znacznie niższe moduły Younga w porównaniu do analogicznych formacji HDR z obszaru Europy Zachodniej. Parametry mechaniczne badanych wulkanitów różniły się w zależności od struktury skały oraz formacji z której zostały pobrane. Wskaźnik kruchości BI niezależnie od zastosowanej metody obliczeniowej był wysoki dla wszystkich analizowanych formacji za wyjątkiem wulkanitów z otworu Jeniniec-4, dla których wskaźnik ten osiągał wartości średnie. W artykule zaproponowano nowy sposób interpretacji wskaźnika BI dla skał HDR magmowych. Jego obniżone wartości powiązane w szczególności z obniżonym modułem Younga, mogą wskazywać strefy o obniżonej wytrzymałości w górotworze charakterystyczne dla obszarów naruszonych tektonicznie i/lub zmienionych hydrotermalnie, które mogą służyć po stymulacji hydraulicznej jako arterie przewodności w systemie EGS. Obniżone wartości BI w skałach magmowych są zatem w przeciwieństwie do skał osadowych pożądane.

Uzyskane w powyższych badaniach parametry petrofizyczne, petrograficzne oraz geomechaniczne stanowią wsad danych do oprogramowania FracPro, wykorzystanego do symulacji numerycznych geometrii szczeliny, opisanego w artykule V.

W artykule IV zaprezentowano wyniki laboratoryjnych badań parametrów termicznych skał z wybranych perspektywicznych dla EGS obszarów Zachodniej Polski, rezultaty oszacowania zmian temperatury formacji i zasięgu ich schłodzenia oraz wyniki modelowania geochemicznego reakcji zachodzących w trakcie eksploatacji energii geotermalnej. Pomiary ujawniają, że granit Karkonoszy charakteryzuje się wysoką dyfuzyjnością i przewodnictwem cieplnym, co czyni go dobrym kandydatem do rozwoju systemów wspomaganych (tabela 1). Mimo że ryolity bloku Gorzowa wykazują nieco niższe wartości tych parametrów, to ich wysokie temperatury początkowe są obiecujące z punktu widzenia długiej żywotności potencjalnych EGS. Wyniki symulacji geochemicznych wskazują, że wytrącanie się minerałów wtórnych mogących spowodować uszkodzenie przepuszczalności byłoby w analizowanych formacjach mało prawdopodobne. Przeciwnie, symulowany wzrost porowatości mógłby spowodować spadek oporu hydraulicznego, co spowodowałoby nadmierne zwiększenie prędkości przepływu i w konsekwencji negatywnie wpłynęło na wydajność EGS.

W artykule V przedstawiono rezultaty badań wytrzymałościowych oraz uzupełniających badań ultradźwiękowych próbek skał HDR z perspektywicznych rejonów Polski. Na podstawie tych danych, a także wyników przeglądów literaturowych i badań opublikowanych w artykułach I, II i III wykonano symulacje numeryczne geometrii szczelin w HDR oraz

wyznaczono wpływ parametrów sprężystości na geometrię szczeliny, co jest jednym z głównych celów naukowych dysertacji. Porównanie statycznych i dynamicznych modułów Younga analizowanych skał ujawniło duże różnice tych parametrów w formacji granitów, co prawdopodobnie związane jest ze zmiennością hydrotermalną tych skał. Testowane piaskowce charakteryzowały się natomiast bardzo zbliżonymi wartościami tych modułów (figura 4).

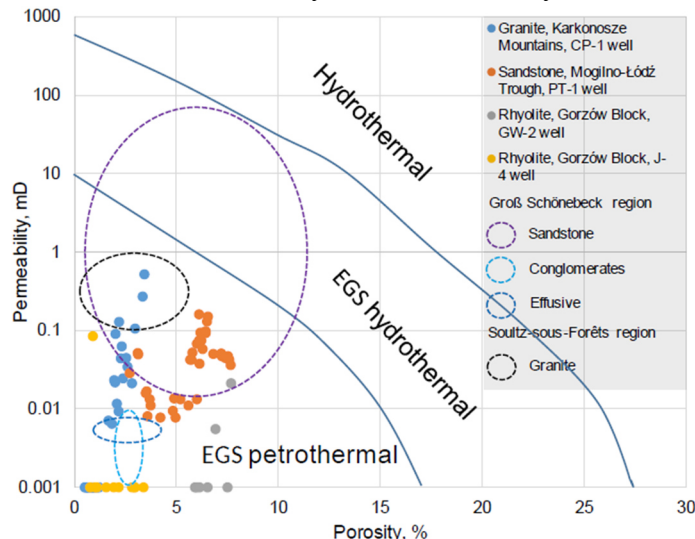


Figura 3: Klasyfikacja analizowanych skał na podstawie porowatości efektywnej i przepuszczalności na tle wybranych formacji Europy Zachodniej (Moska i inni, 2024).

Tabela 1: Wybrane średnie parametry termiczne testowanych skał (Labus i inni, 2025).

Rodzaj skały, lokalizacja	Efuzyjność e , $W \cdot s^{1/2}/m^2/K$	Dyfuzyjność α , m^2/s	Przewodność termiczna k , $W/m \cdot K$	Pojemność cieplna objętościowa c_{ps} , $J/kg \cdot K$
Granit z rejonu Karkonoszy, otwór CP-1	2781,25	$1,78 \times 10^{-6}$	3,70	809,82
Riolit z bloku Gorzowa, otwór GW-2	2510,90	$1,53 \times 10^{-6}$	3,10	831,00
Riolit z bloku Gorzowa, otwór J-4	2338,39	$1,37 \times 10^{-6}$	2,74	794,39

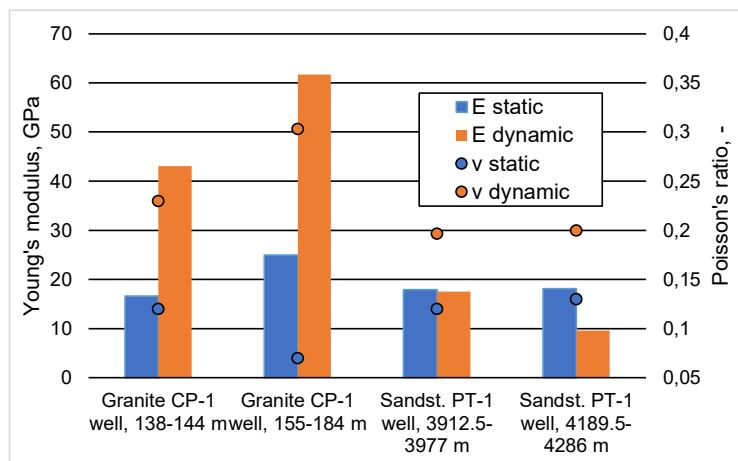


Figura 4: Porównanie średnich dynamicznych i statycznych modułów Younga oraz współczynników Poissona analizowanych granitów i piaskowców (Moska i inni, 2025).

W przypadku obydwu formacji korelacja modułów dynamicznych do statycznych jest dobrze opisywana modelem liniowym - współczynniki determinacji R^2 wynoszą 0,84 dla piaskowców i 0,89 dla granitów. Wykazano też, że pełne nasycenie przestrzeni porowej próbek wodą prowadzi do znacznego wzrostu średniego dynamicznego modułu Younga z 43 do 51 GPa dla granitów i z 9 do 31 GPa dla piaskowców. Istotny wzrost średniego współczynnika Poissona zaobserwowano jedynie w formacji piaskowców, tj. z 0,17 od 0,31. Symulacja szczelinowania hydraulicznego w formacji piaskowców pozwoliła uzyskać szczelinę o średnich wymiarach: długość skrzydła - 61 m, wysokość - 81 m i rozwartość - 1,4 cm (figura 5), natomiast w formacji granitów: długość skrzydła szczeliny - 337 m, wysokość szczeliny - 160 m i rozwartość - 0,58 cm (figury 6 i 7). W obu analizowanych obszarach analiza wrażliwości wykazała, że wpływ modułu Younga na geometrię szczeliny nie przekracza kilku procent. Wpływ tego parametru na rozwartość szczeliny w piaskowcach również pozostaje na poziomie kilku procent, natomiast w granitach osiąga wartości rzędu kilkudziesięciu procent. Z kolei wpływ współczynnika Poissona na geometrię szczeliny oraz jej przewodność w obu formacjach jest marginalny. Istotne jest jednak, że wzrost modułu Younga w formacji piaskowcowej prowadzi do znacznego ograniczenia zjawiska embedmentu oraz do zwiększenia przewodności szczeliny o kilkanaście procent. Może to mieć to istotny wpływ na efektywność systemu EGS zlokalizowanego w tego typu formacji. Z uwagi na brak danych dotyczących występowania oraz charakterystyki szczelin naturalnych w formacji granitowej, jak również interakcji między nimi a szczelinami indukowanymi, uzyskane wyniki należy traktować jako przybliżenie. Na podstawie wszystkich przeprowadzonych w ramach realizacji doktoratu prac sformułowano rekomendacje technologiczne do zabiegów szczelinowania hydraulicznego w wybranych perspektywicznych dla EGS formacjach w Polsce.

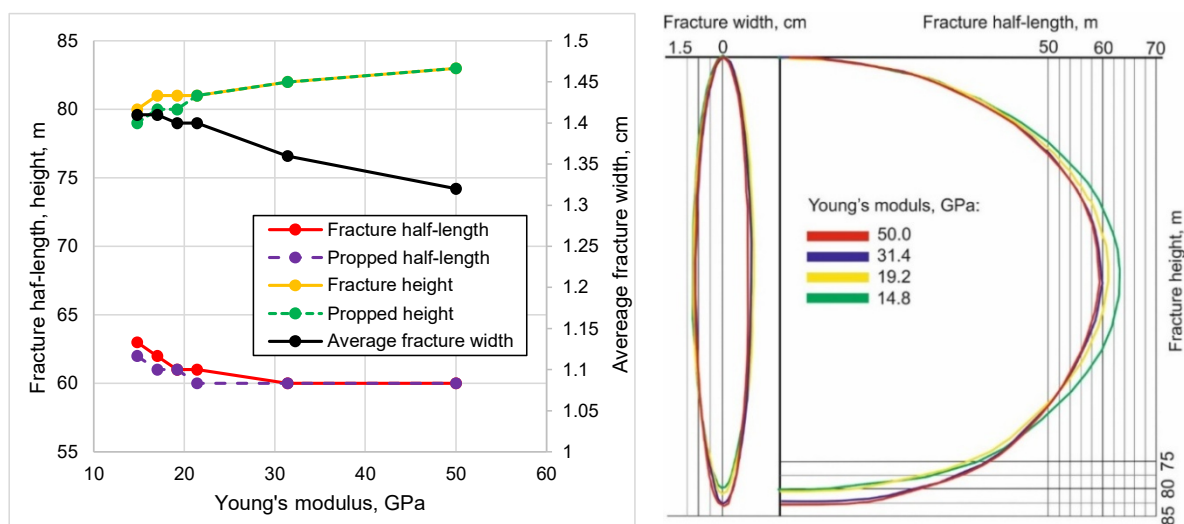


Figura 5: **A** – Zmiany geometrii szczeliny w funkcji modułu Younga w formacji piaskowców z niecki mogileńsko-łódzkiej. **B** – Zmiany kształtu szczeliny w funkcji modułu Younga w formacji piaskowców z niecki mogileńsko-łódzkiej (Moska i inni, 2025).

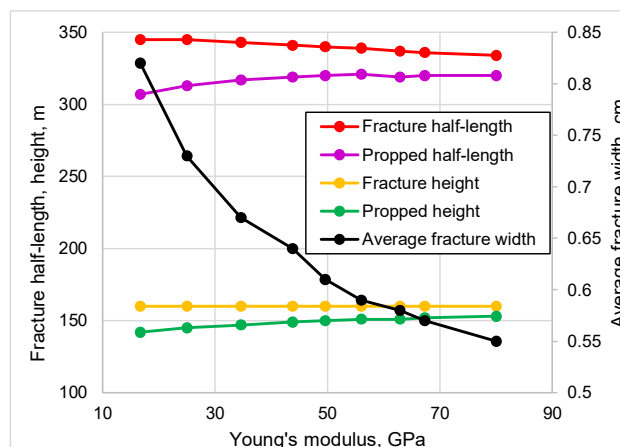


Figura 6: Zmiany geometrii szczeliny w funkcji modułu Younga w granitach karkonoskich (Moska i inni, 2025).

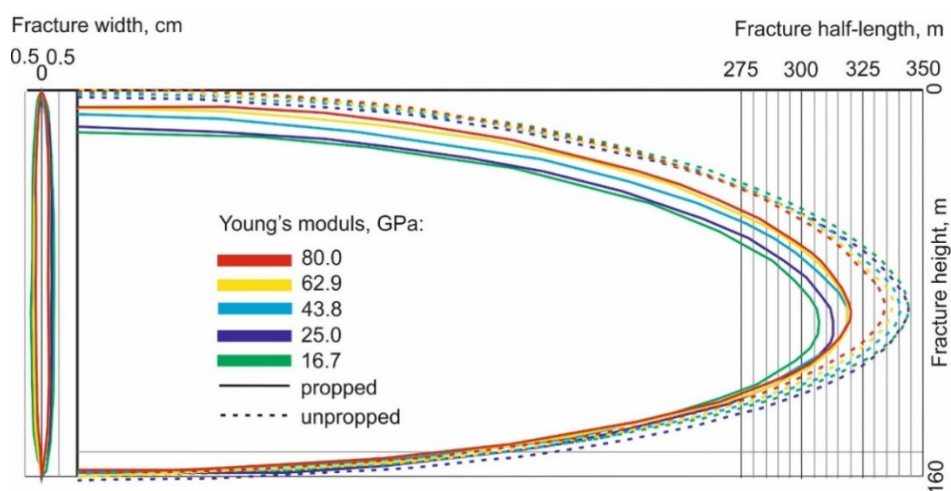


Figura 7: Zmiany kształtu szczeliny w funkcji modułu Younga w granitach karkonoskich (Moska i inni, 2025).

Realizacja pracy pozwoliła na sformułowanie następujących wniosków:

1. Systemy EGS były wdrażane dotychczas na świecie zarówno w skałach magmowych, jak i osadowych. Formacje te różnią się istotnie pod względem mechanizmu stymulacji hydraulicznej, co wynika z odmiennych procesów generowania przewodnych szczelin.
2. Na obszarze Polski zidentyfikowano kilka regionów o podwyższonym potencjale dla systemów EGS, charakteryzujących się korzystnym gradientem geotermalnym. Do najbardziej perspektywicznych zalicza się m.in. rejon Karkonoszy, blok Gorzowa, nieckę szczecińską, nieckę mogileńsko-łódzką oraz blok Górnośląski.
3. W krajach południowo-wschodniej części basenu bałtyckiego potencjał HDR związany jest głównie z obecnością podłoża krystalicznego, a gęstości strumienia ciepłego nie odbiegają istotnie od wartości rejestrowanych w Europie Zachodniej. Główną barierą technologii EGS w tych państwach jest niewystarczające rozpoznanie lokalnych warunków tektonicznych.
4. Poddane badaniom laboratoryjnym skały pochodzące z wybranych perspektywicznych obszarów dla EGS w Polsce, tj. bloku Gorzowa, rejonu Karkonoszy oraz niecki

mogileńsko-łódzkiej, charakteryzują się parametrami petrofizycznymi pozwalającymi zakwalifikować je jako formacje petrotermalne odpowiednie dla systemów EGS.

5. Wskaźnik kruchości (*brittleness index*, BI), wyznaczany na podstawie relacji pomiędzy modułem Younga a współczynnikiem Poissona, może być użyteczny jako parametr oceny perspektywiczności danego interwału w obrębie formacji HDR. Należy jednak podkreślić, że jego interpretacja w skałach magmowych znacząco różni się od tej stosowanej dla skał osadowych.
6. Granity karkonoskie wykazują wyższe wartości efuzyjności, dyfuzyjności oraz przewodności cieplnej w porównaniu z riolitami z bloku Gorzowa, co czyni je bardziej perspektywicznymi pod względem efektywnej ekstrakcji ciepła w systemach typu EGS.
7. W piaskowcach niecki mogileńsko-łódzkiej oraz granitach rejonu Karkonoszy analiza wrażliwości wykazała, że wpływ modułu Younga na geometrię szczeliny rozumianą jako długość jej skrzydeł i wysokość, nie przekracza kilku procent. Wpływ tego parametru na rozwartość szczeliny w piaskowcach również pozostaje na poziomie kilku procent, natomiast w granitach osiąga wartości rzędu kilkudziesięciu procent. Z kolei wpływ współczynnika Poissona na geometrię szczeliny oraz jej przewodność w obu formacjach jest marginalny.
8. Wzrost modułu Younga w formacji piaskowcowej prowadzi do istotnego ograniczenia zjawiska embedmentu oraz do zwiększenia przewodności szczeliny o kilkanaście procent. Może to mieć znaczący wpływ na efektywność systemu EGS zlokalizowanego w tego typu formacji.
9. Z uwagi na brak danych dotyczących występowania oraz charakterystyki szczelin naturalnych w formacji granitowej, jak również interakcji między nimi a szczelinami indukowanymi, uzyskane wyniki należy traktować jako przybliżenie.

Bibliografia

www.energisers.agh.edu.pl (dostęp: 27.02.2025)

Labus K., Moska R., Labus M. Potential Enhanced Geothermal System in Western Poland – Petrothermal and Geochemical Issues. *Energies* Volume 18, 876, 2025. DOI: 10.3390/en18040876

Lu S-M. A global review of enhanced geothermal system (EGS). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 2, 2902–2921, 2018. DOI:10.1016/j.rser.2017.06.097

Moska R., Labus K., Kasza P. Hydraulic Fracturing in Enhanced Geothermal Systems – Field, Tectonic and Rock Mechanics Conditions – A Review. *Energies* Volume 14, 5725, 2021. DOI:10.3390/en14185725

Moska R., Labus K., Kasza P., Moska A. Geothermal Potential of Hot Dry Rock in South-East Baltic Basin Counties – A Review. *Energies* Volume 16, 1662, 2023. DOI: 10.3390/en16041662

- Moska R., Labus K., Kasza P. Dynamic Elastic Properties, Petrophysical Parameters and Brittleness of Hot Dry Rocks from Prospective Areas of Central Europe. *Advances in Geo-Energy Research* Volume 14, 2, 90-105, 2024. DOI: 10.46690/ager.2024.11.03
- Moska R., Labus K., Kasza P. Impact of Rock Elastic Properties on Fracture Geometry in Potential Enhanced Geothermal Systems in Poland. *Energies* Volume 18, 2869, 2025. DOI: 10.3390/en18112869
- Tester J., Anderson B., Batchelor A., Blackwell D., DiPippo R., Drake M., Garnish J., Livesay B., Moore M., Nichols K. et al. The Future of Geothermal Energy—Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century; Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA; Idaho National Laboratory: Idaho Falls, ID, USA, 2006.
- Wójcicki A., Sowizdżał A., Bujakowski W. Ocena Potencjału Bilansu Ciepłego i Perspektywicznych Struktur Geologicznych dla Potrzeb Zamkniętych Systemów Geotermicznych (Hot Dry Rocks) w Polsce. Ministerstwo Środowiska, Warszawa, 2013.