

Prof. dr hab. inż. Barbara Tomaszewska
Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica
Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska
e-mail: barbara.tomaszewska@agh.edu.pl

Kraków, 10 grudnia 2025 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej Pana mgr Rafała Moski pt.

**„WPŁYW PARAMETRÓW SPRĘŻYSTYCH SKAŁ NA PROCES HYDRAULICZNEGO
SZCZELINOWANIA DLA POTRZEB WSPOMAGANYCH SYSTEMÓW GEOTERMALNYCH (EGS)
NA TERENIE POLSKI”**

Recenzja została wykonana na podstawie Uchwały Nr 212/2025 r. Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej z dnia 25 września 2025 r. oraz drukowanej wersji pracy doktorskiej otrzymanej przy piśmie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej, z dnia 3 października 2025 r., znak RIE-BD.512.38.2025.

Rozprawa doktorska Pana mgr **Rafała Moski** powstała w ramach programu Doktorat Wdrożeniowy edycja V, we współpracy pomiędzy Politechniką Śląską (PŚ) a Instytutem Nafty i Gazu – Państwowym Instytutem Badawczym (INiG-PIB). Opracowana została w oparciu o pięć wieloautorskich publikacji, z zadeklarowanym wkładem własnym doktoranta. Są to publikacje:

1. **R. 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. Wkład autorski P. R. Moski to **60%**.
2. **R. 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. Wkład autorski P. R. Moski to **60%**.
3. **R. 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. Wkład autorski P. R. Moski to **80%**.
4. K. Labus, **R. Moska**, M. Labus, *Potential Enhanced Geothermal System in Western Poland – Petrothermal and Geochemical Issues*, *Energies*, Volume 18, 876, 2025. DOI: 10.3390/en18040876. Wkład autorski P. R. Moski to **50%**.
5. **R. 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. Wkład autorski P. R. Moski to **80%**.

Doktorant w czterech publikacjach jest pierwszym autorem i autorem korespondencyjnym w trzech. Jego udział % w powstaniu prac wynosi od 50 do 80%.

Rozprawa doktorska obejmuje wykaz publikacji z określeniem wkładu Doktoranta w powstanie każdej pracy, wykaz zastosowanych skrótów, oraz prezentację przedmiotu pracy na łamach ośmiu rozdziałów. Są to 1) wprowadzenie wraz ze wskazaniem motywacji do realizacji badań, zdefiniowanym zakresem i celem pracy, 2) pięciu rozdziałów stanowiących streszczenie kolejnych publikacji; oraz 3) rekomendacji oraz podsumowania i wniosków. Praca zawiera również spis bibliografii, streszczenie pracy w j. polskim i angielskim. Całość, wraz z publikacjami zaprezentowana została na 178 stronach.

Zainteresowania naukowe Pana mgr Rafała Moski skupione są na rozpoznaniu wpływu parametrów sprężystości głębokich struktur geologicznych na proces szczelinowania hydraulicznego (HF) dla wspomaganych systemów geotermalnych.

Wskazał On cele szczegółowe pracy, obejmujące:

- określenie wpływu parametrów sprężystości skał formacji docelowej na geometrię szczeliny tworzonej w procesie HF, w warunkach ciśnienia i temperatury typowych dla obszarów perspektywicznych dla wspomaganych systemów geotermalnych (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 gorących suchych skał (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.

W pracy doktorskiej przyjęto tezę, 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 HF.

Podjęty temat badawczy jest bardzo aktualny, wpisuje się w potrzeby związane z projektowaniem instalacji pozyskania ciepła z głębokich stref geotermicznych. Prace badawcze mają znaczenie użytkowe i w pełni spełniają kryteria wymagane od Doktoratu Wdrożeniowego. Wypracowanie skutecznych laboratoryjnych metod badawczych skorelowanych w poprawnie wypracowanymi numerycznymi modelami prognostycznymi

mogą przełożyć się na wzrost zainteresowania sektora energetycznego wykorzystaniem energii odnawialnej, z głębokich wspomaganych systemów geotermalnej typu EGS.

W części I doktoratu, wprowadzającej, Autor omówił kontekst wyboru zagadnienia badawczego, uwarunkowania techniczne dla realizacji termicznych, chemicznych oraz hydraulicznych zabiegów stymulacyjnych. Wyjaśnił zależności pomiędzy parametrami sprężystości skał, laboratoryjnymi metodami ich wyznaczania oraz numerycznymi symulacjami dla prognozy docelowej geometrii szczelin, kluczowego czynnika dla skomunikowania odwiertów produkcyjnych i chłonnnych w systemach EGS i HDR.

Pierwsza z publikacji stanowiących podstawę rozprawy doktorskiej P. R. Moski „*Hydraulic Fracturing in Enhanced Geothermal Systems – Field, Tectonic and Rock Mechanics Conditions – A Review*”: to przegląd projektów HDR i EGS prowadzonych na świecie, przy uwzględnieniu parametrów geologicznych, petrofizycznych, tektonicznych oraz elementów technologii hydraulicznego szczelinowania. Przedstawił perspektywiczne dla Polski obszary dla lokalizacji rozpatrywanych systemów: 1) w rejonie karbońskich granitów Karkonoszy i 2) permskich skał wulkanicznych bloku Gorzowa, 3) formacji osadowych rejonu niecki mogileńsko-łódzkiej oraz 4) karbońskich formacji osadowych Górnośląskiego Zagłębia Węglowego i 5) permsko-karbońskich skał osadowych niecki szczecińskiej. W obszarach tych, w szczególności w rejonie karkonoskim i bloku Gorzowa prowadzono wcześniej prace badawcze w ramach konsorcjum Państwowego Instytutu Geologicznego – Państwowego Instytutu Badawczego, Akademii Górniczo-Hutniczej im. St. Staszica w Krakowie i Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk w Krakowie, opublikowane w pracy pod redakcją Wójcickiego A., Sowińskiego A. i Bujakowskiego W. w 2013 r, oraz w ramach projektu POL-NOR EnerGiserS, liderowanego przez Akademię Górniczo-Hutniczą im. St. Staszica w Krakowie, w latach 2020-2024. Doktorant odwołał się to tych prac w swoich publikacjach, wskazując, że szczególnie perspektywiczne formacje występują na głębokościach poniżej 4000 m ppt i mogą osiągać temperatury powyżej 150°C. Reżim tektoniczny na tych obszarach jest opisywany jako ekstensyjny lub ekstensyjny z elementem przesuwczym, a główne naprężenie pionowe, przy założeniu średniej gęstości skał nadkładu 2,4 g/cm³, wynosi od 96 do 156 MPa, w zależności od rozpatrywanej głębokości.

W kolejnej, drugiej pracy R. Moski i in. (2023) „*Geothermal Potential of Hot Dry Rock in South-East Baltic Basin Counties – A Review*”, przedstawiono porównanie obszarów perspektywicznych dla EGS na obszarze południowo-wschodniego basenu bałtyckiego, Litwy, Łotwy, Estonii i Polski, wskazując m.in. iż rozkład gradientu geotermalnego oraz gęstości strumienia ciepłego nie odbiega znacząco od wartości obserwowanych w Europie Zachodniej, gdzie zrealizowano już kilka inwestycji tego typu. Problematycznym jest natomiast niewystarczające rozpoznanie lokalnych warunków tektonicznych, w szczególności rozwoju naturalnych stref szczelinowych i uskokowych, mających duże znaczenie podczas stymulacji hydraulicznej w obrębie podłoża krystalicznego. Zagadnienie to stanowi główną barierę rozwoju technologii EGS.

Trzeci artykuł **R. Moski** i in. „*Dynamic Elastic Properties, Petrophysical Parameters and Brittleness of Hot Dry Rocks from Prospective Areas of Central Europe*”, prezentuje wyniki badań laboratoryjnych rdzeni pobranych z wytypowanych odwiertów położonych w trzech spośród wskazanych wcześniej pięciu rejonów predestynowanych dla EGS/HDR, tj. 1) karkonoskich granitów – odwiert Czerwony Potok PIG 1; 2) wulkanitów bloku Gorzowa – odwierty Gorzów Wielkopolski-2 oraz Jeniniec-4 oraz 3) piaskowców niecki mogileńsko-łódzkiej – odwiert Piotrków Trybunalski IG-1. Na sumarycznej liczbie 96 próbek rdzeni wyznaczono parametry: gęstość szkieletowa oraz objętościowa próbek, współczynnik porowatości efektywnej (metodą helową) oraz współczynnik przepuszczalności absolutnej dla azotu. Skład mineralny poszczególnych próbek wyznaczono w oparciu o metodę dyfrakcji rentgenowskiej (XRD), z analizą ilościową metodą Rietvelde. Dynamiczne parametry sprężystości przy częstotliwości pracy przetworników 500 kHz (prędkości propagacji fali podłużnej i poprzecznej), zostały wyznaczone dla 64 próbek skał. Testy zostały zrealizowane w zakresie ciśnienia 0 – 55 MPa. Rozpoznany skład mineralny próbek i wyznaczone na podstawie badań laboratoryjnych wartości modułu Younga oraz współczynnika Poissona pozwoliły na obliczenie wskaźnika kruchości badanych próbek skalnych.

Czwarty z serii artykuł opublikowany z udziałem Doktoranta „*Potential Enhanced Geothermal System in Western Poland – Petrothermal and Geochemical Issues*” omawia w szczególności wyniki badań termiczny i geochemiczny wybranych, dwóch systemów geotermicznych: 1) karkonoskich granitów – odwiert Czerwony Potok PIG 1 oraz 2) wulkanitów bloku Gorzowa – odwierty Gorzów Wielkopolski-2 oraz Jeniniec-4. Odnosi się on do prognozy zmian termiki górotworu, która może mieć miejsce w trakcie długotrwałej eksploatacji energii geotermalnej. Dodatkowo zawiera wyniki modelowania geochemicznego, wykonanego dla prognozy przebiegu reakcji geochemicznych jakie mogą zachodzić na kontakcie ciecz robocza-skała podczas pracy systemu.

Piąty z artykułów, zatytułowany „*Impact of Rock Elastic Properties on Fracture Geometry in Potential Enhanced Geothermal Systems in Poland*”, to analiza wpływu parametrów sprężystości ośrodka skalnego typu HDR na geometrię szczelin wytworzonych w numerycznie symulowanych zabiegach szczelinowania hydraulicznego, prowadzonego w dwóch wybranych ośrodkach geologicznych: 1) karkonoskich granitach – odwiert Czerwony Potok PIG 1; oraz 2) piaskowcach niecki mogileńsko-łódzkiej – odwiert Piotrków Trybunalski IG-1.

Badania modelowe poprzedzono pomiarami charakterystyki dynamicznych parametrów sprężystości skał w pełni nasyconych 2% roztworem chlorku potasu jako inhibitora pęcznienia minerałów ilastych. Testy prowadzono w warunkach konwencjonalnego trójosiowego ściskania, przy wzroście ciśnienia hydrostatycznego od ciśnienia otoczenia do 55 MPa, według metodyki opracowanej przez doktoranta. Ciśnienie porowe utrzymywano na poziomie 2 MPa, tak aby wraz ze wzrostem ciśnienia uszczelnienia zwiększało się ciśnienie efektywne. Następnie wykonano testy wytrzymałościowe na próbkach nienasyconych, w temperaturze pokojowej i przy ciśnieniu uszczelnienia 15 i 30 MPa.

W kolejnym etapie Doktorant wykonał symulacje modelowe, numeryczne, geometrii szczelin hydraulicznych w funkcji parametrów sprężystości skał, z wykorzystaniem oprogramowania Carboceramics FracPro. Do modelowania zabiegów hydraulicznego szczelinowania w piaskowcach niecki mogileńsko-łódzkiej Doktorant przyjął zakres zmian modułu Younga od 14,5 do 50 GPa, współczynnika Poissona od 0,1 do 0,35. W modelu dla rejonu Karkonoszy przyjęto zakres zmian modułu Younga granitów od 16,75 do 80 GPa, a współczynnika Poissona od 0,07 do 0,37. W obu przypadkach schemat pompowania opracowano na podstawie danych literaturowych oraz własnych doświadczeń.

Artykuł ten stanowi odpowiedź na założone cele i tezę pracy, iż bazując na aproksymacji wyników badań laboratoryjnych dynamicznych parametrów sprężystości skał, rozpoznania petrofizycznego ośrodka skalnego oraz prognozy naprężeń złożowych, można wyznaczyć geometrię szczelin powstałych w hipotetycznym, zamodelowanym w danych warunkach zabiegu HF.

Dalsza część to rekomendacje technologiczne do zabiegów szczelinowania hydraulicznego, dla formacji osadowych oraz magmowych. Przeprowadzone prace skłoniły Autora do finalnego wniosku, iż w obu analizowanych obszarach perspektywicznych, piaskowcach niecki mogileńsko-łódzkiej oraz granitach rejonu Karkonoszy wpływ modułu Younga na geometrię szczeliny, rozumianą jako długość skrzydeł i jej 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.

Część opisowa rozprawy doktorskiej, w której Doktorant odwołuje się do informacji zawartych w pięciu publikacjach, przedstawiona w ośmiu rozdziałach, przygotowana została starannie pod względem edytorskim i graficznym. Część teoretyczna i interpretacyjna napisane zostały językiem logicznym, jasno i przejrzysto. Wyniki badań i analiz zaprezentowano głównie w formie graficznej, częściowo uzupełnionej zestawieniami tabelarycznymi. Doktorant zgromadził bogatą literaturę, obejmującą liczne publikacje międzynarodowe i w większości stanowiące znakomity przegląd literatury w rozpatrywanym obszarze badawczym.

Uwagi krytyczne i dyskusyjne

W poniższym zestawieniu zamieściłam kilka spostrzeżeń i komentarzy które w mojej ocenie wymagają doprecyzowania i mogą być pomocne w dalszej pracy naukowej Doktoranta, oraz przygotowaniu zwartej publikacji w charakterze monografii.

- 1) Byłoby korzystniej, gdyby część opisowa rozprawy doktorskiej, w której Doktorant odwołuje się do informacji zawartych w pięciu publikacjach, opracowana została według klasycznego schematu który obejmuje, wprowadzenie, metodykę badań, następnie wyniki badań, dyskusję oraz podsumowanie i wnioski. W szczególności odczuwa się brak omówienia kompletnej metodyki badań, adekwatnej dla założonego celu badawczego, tez pracy oraz jej tytułu. Zrozumienie idei prac, rozpoznanie

komplementarności i synergii pomiędzy pięcioma publikacjami, wymagało „przeskakiwania” każdorazowo przez opis metodyki wykazany w kolejnych pracach. To samo dotyczy wskazanych poligonów badawczych oraz wniosków.

- 2) Autor wymiennie stosuje w pracy pojęcia EGS i HDR, jakkolwiek pojęcia te odzwierciedlają różne systemy. Wspomagane systemy geotermalne (EGS) odnoszą się do struktur w pewnym stopniu naturalnie zawodnionych lub w jakimś procencie przepuszczalnych, gdzie naturalne warunki hydrogeotermalne nie pozwalają na eksploatację wody i energii geotermalnej, dlatego są one sztucznie stymulowane, wspomagane, w zabiegach szczelinowania hydraulicznego, chemicznego czy termicznego. Z kolei systemy HDR to suche gorące skały, nieprzepuszczalne, w których woda nie występuje. Zatem pojęcie EGS jest szerszym w stosunku do HDR. Każdy system HDR zalicza się do EGS, ale nie każdy EGS zalicza się do HDR. Założenia badawcze w odniesieniu do wybranych poligonów badawczych nie rozróżniają tych kwestii. Brak jest informacji na temat obecności lub braku obecności wody w górotworze. Może to mieć znaczenie przy modelowaniu systemu EGS w strukturach w pewnym stopniu naturalnie zawodnionych.
- 3) Szczelinowanie hydrauliczne jest możliwe po zatłoczeniu do otworu cieczy (zwykle wody z różnymi dodatkami) pod ciśnieniem wyższym od ciśnienia szczelinowania formacji docelowej na danej głębokości. W artykule Nr 2, Doktorant wskazał pięć obszarów perspektywicznych dla EGS/HDR w Polsce, wskazując przedziały głębokości strefy docelowej: 1) w rejonie karbońskich granitów Karkonoszy - 4000 m i oczekiwana temperatura 165°C; 2) permskich skał wulkanicznych bloku Gorzowa - 4300 m i oczekiwana temperatura 160°C; 3) formacji osadowych rejonu niecki mogileńsko-łódzkiej - 5000-6500 m i oczekiwana temperatura 165-195°C; 4) karbońskich formacji osadowych Górnośląskiego Zagłębia Węglowego - >5000 m i oczekiwana temperatura 170°C oraz 5) permsko-karbońskich skał osadowych niecki szczecińskiej - >5000 m i oczekiwana temperatura 170°C.
Proszę wyjaśnić jakie są prognozowane ciśnienia szczelinowania dla ww. proponowanych stref. Proszę również o komentarz dotyczący korelacji wyników badań laboratoryjnych w przedziale ciśnień do 55 MPa oraz założeń modelowych realizacji szczelinowania hydraulicznego symulowanych w artykule Nr 5.
- 4) Z czego wynika brak konsekwencji w wyborze poligonów badawczych w kolejnych artykułach i rozwoju badań? W artykule Nr 2 wskazano 5 obszarów perspektywicznych dla Polski, następnie w art. Nr 3 – przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych rdzeni pobranych z trzech spośród wskazanych wcześniej pięciu rejonów perspektywicznych: tj. 1) karkonoskich granitów – odwiert Czerwony Potok PIG 1; 2) wulkanitów bloku Gorzowa – odwierty Gorzów Wielkopolski-2 oraz Jeniniec-4 oraz 3) piaskowców niecki mogileńsko-łódzkiej – odwiert Piotrków Trybunalski IG-1. W artykule Nr 4 – omówiono wyniki badań termicznych i geochemicznych dwóch systemów geotermicznych: 1) karkonoskich granitów – odwiert Czerwony Potok PIG 1 oraz 2) wulkanitów bloku

Gorzowa – odwierty Gorzów Wielkopolski-2 oraz Jeniniec-4. A następnie w artykule Nr 5, docelowym, jak zaznacza Doktorant, bazującym na wynikach wcześniejszych badań, analiza wpływu parametrów sprężystości ośrodka skalnego na geometrię szczelin zamodelowano dla dwóch ośrodków geologicznych: 1) karkonoskich granitów; oraz 2) piaskowców niecki mogileńsko-łódzkiej.

- 5) W artykule Nr 4 zaprezentowano m.in. wyniki modelowania geochemicznego w układzie woda-skała, w których domniemywam Doktorant nie uczestniczył, na co wskazuje deklaracja wkładu w powstanie publikacji. Jednak proszę o wyjaśnienie, czy wyniki tego modelowania zostały wykorzystane w modelach prezentowanych w artykule Nr 5? Nie zostało to jasno wskazane. Moje pytanie dotyczy głównie, różnych danych wskazujących na m.in. porowatość ośrodka skalnego. W artykule Nr 3 – w modelowaniu geochemicznym przyjęto 20% porowatość szczelinową (jak rozumiem po procesie szczelinowania) dla wszystkich modelowanych obszarów. W tab. 5 przedmiotowej publikacji, porowatość ośrodka skalnego waha się w zależności od próbki rdzenia i lokalizacji od 1 do 8%. W opisie pracy wskazano dalej, (w odniesieniu do artykułu Nr 5), podano *„W celu uproszczonego odzwierciedlenia charakterystycznych właściwości formacji granitowej zmienionej hydrotermalnie, w środkowej części modelowanej strefy docelowej zwiększono wartości współczynnika przepuszczalności oraz porowatości efektywnej do wartości maksymalnych uzyskanych dla tych skał w badaniach laboratoryjnych (artykuł Nr 3)”*. Jakie wartości porowatości wprowadzono do modelu i jaką porowatość szczelinową uzyskano dla zamodelowanych struktur prezentowanych w artykule Nr 5?
- 6) W artykule Nr 2, Doktorant wskazał rekomendowane dla EGS i HDR lokalizacje w Polsce oraz głębokości stref docelowych, ze wskazaniem spodziewanych temperatur górotworu. Proszę o wyjaśnienie, dlaczego te założenia zostały zmienione w kolejnych artykułach. Kluczowa różnica dotyczy wskazań prezentowanych w artykule Nr 5, gdzie modelowanie numeryczne dla określenia geometrii szczelin prowadzono dla piaskowców niecki mogileńsko-łódzkiej w przedziale głębokości 4030-4101 m przy perforacji w strefie 4060-4080 m, a założenia z artykułu Nr 2 to 5000-6500 m.
- 7) Doktorant we Wstępie do pracy, str. 18, odnosząc się do wcześniejszych badań zrealizowanych w Polsce w kierunku rozpoznania potencjału systemów HDR (Wojcicki i in., 2013) oraz EGS (Sowiżdżał i in. 2020 - 2024) podaje cyt. *„Pomimo szerokiego spektrum badawczego obydwu tych prac, ich efekty nie były ukierunkowane na opracowanie jakichkolwiek elementów technologii HF, takich jak: schematy pompowania, skład cieczy zabiegowych oraz materiałów podsadzkowych, mimo że ich prawidłowy dobór jest podstawą późniejszego optymalnego funkcjonowania EGS w tych strukturach. Nie analizowano również wpływu poszczególnych elementów technologii HF na geometrię kolektora geotermalnego oraz wpływu właściwości mechanicznych HDR na wymiary wytwarzanych szczelin. Co więcej, wyraźna luka*

poznawcza w aspekcie relacji pomiędzy parametrami mechanicznymi HDR a geometrią kolektora geotermalnego występuje nie tylko w odniesieniu do konkretnych, specyficznych dla danego obszaru formacji skalnych, lecz do ogólnego problemu badawczego dotyczącego tego zagadnienia."

Powyższe stwierdzenie nie jest prawdziwe. W przywołanym przez Doktoranta projekcie o akronimie EnerGiserS, tytuł „Niekonwencjonalne systemy geotermalne CO₂-EGS jako systemy energetyczne neutralne dla klimatu” (Sowiżdżał i in., 2020 - 2024), w którego realizacji czynnie brała udział recenzentka niniejszej pracy, w ramach WP4: „Modelowanie matematyczne eksploatacji zbiornika geotermalnego CO₂-EGS” zrealizowano m.in. symulacje zabiegu szczelinowania hydraulicznego górotworu, modele rozkładu przepuszczalności w strefie szczelinowania dla wybranych lokalizacji systemów EGS oraz proces parametryzacji stref zeszczelinowanych w modelach numerycznych 3D wraz z analizą modeli produkcyjnych. Informacje te są podane na stronie <https://www.energizers.agh.edu.pl/pl/efekty/etapy-realizacji-projektu>. Badania realizowane były przez Pana dr hab. inż. Pawła Wojnarowskiego, prof. AGH.

- 8) Na str. 23, Doktorant stwierdza: „Podczas wyboru potencjalnej lokalizacji kryteria tektoniczne nie mają najwyższego priorytetu. Systemy EGS tworzone były zarówno w formacjach poddanych reżimom ekstensyjnym i przesuwczym (np. Soultz-sous-Forêts, Landau)” – powyższe stwierdzenie wydaje się ryzykownym z uwagi na sam proces szczelinowania górotworu pod bardzo wysokim ciśnieniem i możliwość wystąpienia negatywnych skutków w postaci mikrowstrząsów sejsmicznych, które m.in. były monitorowane w przywołanym systemie Soultz-sous-Forêts. Co więcej, na stronie 21, oraz 27 Doktorant sam wskazuje iż „problematycznym jest niewystarczające rozpoznanie lokalnych warunków tektonicznych, w szczególności rozwoju naturalnych stref szczelinowych i uskokowych, mających duże znaczenie podczas stymulacji hydraulicznej w obrębie podłoża krystalicznego”.
- 9) Na str. 24 oraz 85, w odniesieniu do uwarunkowań krajowych, Doktorant podaje: „Reżim tektoniczny na tych obszarach jest opisywany jako ekstensyjny lub ekstensyjny z elementem przesuwczym, a główne naprężenie pionowe, przy założeniu średniej gęstości skał nadkładu wynoszącej 2,4 g/cm³, wynosi od 96 do 156 MPa, w zależności od rozpatrywanej głębokości.” Proszę o rozwinięcie zależności pomiędzy podanymi wartościami w artykule Nr 1 i ciśnieniami stosowanymi w modelowaniu w art. Nr 5.

Podsumowując, przedłożona przez Pana **mgr Rafała Moskę** rozprawa doktorska, pomimo wykazanych kilku uwag, jest dobrym przykładem kompleksowo zaplanowanych i zrealizowanych badań w skali laboratoryjnej z ich odwzorowaniem w procesie modelowania numerycznego. Posiada charakter poznawczy, a zastosowane metodyki oraz narzędzia badawcze należą do aktualnych. Oryginalnym osiągnięciem w mojej ocenie, jest dążenie do wieloaspektowego skorelowania wyników badań laboratoryjnych rozpoznania parametrów sprężystości skał formacji geologicznej z modelowym odwzorowaniem geometrii szczelin

generowanych w procesie HF dla systemów EGS. Autor dowiódł umiejętności analizowania faktów, planowania i realizacji wielu badań oraz krytycznej interpretacji ich rezultatów. Potwierdził tym, że posiada wiedzę teoretyczną oraz umiejętności stosownego organizowania i prowadzenia badań naukowych.

W moim przekonaniu, rozprawa doktorska Pana **mgr Rafała Moski**, pt. *„Wpływ parametrów sprężystych skał na proces hydraulicznego szczelinowania dla potrzeb wspomaganych systemów geotermalnych (EGS) na terenie Polski”* spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (t.j. Dz. U. z 2017 r., poz. 1789 z późn. zm.).

W związku z powyższym wnoszę do Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej o dopuszczenie Pana **mgr Rafała Moskę** do dalszych etapów postępowania doktorskiego.

Podpisała Barbara Tomaszewska