

dr hab. Paweł Łukaszewski
Katedra Geologii Inżynierskiej i Geomechaniki
Wydziału Geologii
Uniwersytetu Warszawskiego
ul. Żwirki i Wigury 93
02-089 Warszawa

Warszawa, 10.12.2025 r.

Recenzja
rozprawy doktorskiej
mgr Rafała Moski

*„Wpływ parametrów sprężystych skał na procesy hydraulicznego
szczelinowania dla potrzeb wspomaganych systemów geotermalnych (EGS)
na terenie Polski”*

Zgodnie z uchwałą Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka politechniki Śląskiej z dnia 25.09.2025 r. (pismo RIE-BD.512.38.2025) zlecono mi ocenę rozprawy doktorskiej mgr Rafała Moski nt. „Wpływ parametrów sprężystych skał na procesy hydraulicznego szczelinowania dla potrzeb wspomaganych systemów geotermalnych (EGS) na terenie Polski” na podstawie artykułu 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce.

Praca przygotowana została pod kierunkiem prof. dr hab. Krzysztofa Labusa z Politechniki Śląskiej oraz dr hab. inż. Piotra Kaszy prof. INiG-PIB z Instytutu Nafty i Gazu – Państwowego Instytutu Badawczego na Wydziale Górnictwa Inżynierii Bezpieczeństwa i Automatyki Przemysłowej w Katedrze Geologii Stosowanej na Politechnice Śląskiej w Dyscyplinie Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka.

Charakterystyka rozprawy doktorskiej

Niniejsza rozprawa doktorska została zrealizowana w oparciu o pięć spójnych tematycznie publikacji:

1. **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); 48 cytowań.
2. **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); 8 cytowań.
3. **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); 7 cytowań
4. 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).
5. **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).

Wszystkie publikacje w pełnej formie zostały dołączone do rozprawy jako załącznik.

Wkład mgr Rafała Moski w każdej z publikacji zgodnie z oświadczeniem autorskim wynosił:

1. **W pierwszej publikacji 60%** i obejmował: opracowanie koncepcji artykułu, wykonanie przeglądu literaturowego, opracowanie manuskryptu i wykonanie wizualizacji.
2. **W drugiej publikacji 60%** i obejmował: opracowanie koncepcji artykułu, wykonanie przeglądu literaturowego, opracowanie manuskryptu, wykonanie wizualizacji oraz nadzór ogólny.
3. **W trzeciej publikacji 80%** i obejmował: opracowanie koncepcji artykułu, wykonanie przeglądu literaturowego, wykonanie badań laboratoryjnych, opracowanie wyników badań, opracowanie manuskryptu, wykonanie wizualizacji oraz nadzór ogólny.

4. **W czwartej publikacji 50%** i obejmował: wykonanie badań laboratoryjnych, przeglądu literaturowego, edycji manuskryptu, oraz jego korekty.
5. **W piątej publikacji 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.

Wkład mgr Rafała Moski w każdej z publikacji jest zatem bardzo duży i wynosi od 50 do 80%. Zwrócić należy również uwagę, że w czterech artykułach mgr Rafał Moska jest pierwszym autorem, a w jednym drugim autorem. Wszystkie publikacje ukazały się w recenzowanych czasopismach z listy Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego, co oznacza że poddane zostały recenzjom zgodnie z profilem czasopism.

Recenzowana rozprawa doktorska zawiera przedstawioną już listę publikacji, terminologię, autoreferat oraz załącznik zawierający pełne teksty pięciu publikacji naukowych.

Pierwsza publikacja (Moska i in., 2021) o objętości 24 stron zawiera 5 rozdziałów tematycznych oraz spis bibliografii obejmujący 90 pozycji. Jest ilustrowana 6 rysunkami i znajduje się w niej 1 zestawienie tabelaryczne.

Druga publikacja (Moska i in., 2023) o objętości 18 stron zawiera 7 rozdziałów tematycznych oraz spis bibliografii obejmujący 78 pozycji. Jest ilustrowana 8 rysunkami i znajduje się w niej 2 zestawienia tabelaryczne.

Trzecia publikacja (Moska i in., 2024) o objętości 16 stron zawiera 4 rozdziałów tematycznych oraz spis bibliografii obejmujący 57 pozycji. Jest ilustrowana 15 rysunkami, znajduje się w niej 1 zestawienie tabelaryczne oraz 12 ponumerowanych wzorów.

Czwarta publikacja (Labus i in., 2025) o objętości 20 stron zawiera 6 rozdziałów tematycznych oraz spis bibliografii obejmujący 44 pozycji. Jest ilustrowana 6 rysunkami, znajduje się w niej 7 zestawień tabelarycznych oraz załącznik z 1 tabelą.

Piąta publikacja (Moska i in., 2025) o objętości 25 stron zawiera 6 rozdziałów tematycznych, terminologię oraz spis bibliografii obejmujący 65 pozycji. Jest ilustrowana 19 rysunkami, znajdują się w niej 3 zestawienia tabelaryczne.

Autoreferat o objętości 56 stron zawiera natomiast 8 rozdziałów tematycznych, spis bibliografii obejmujący 50 pozycji, streszczenie oraz abstract po angielsku. Autoreferat jest

ilustrowany 19 rysunkami, znajduje się w nim 2 zestawienia tabelaryczne oraz 8 ponumerowanych wzorów matematycznych.

W rozdziale 1 w autoreferacie „*Wstępie*” Doktorant przedstawił opis specyfiki systemów geotermalnych, charakterystykę zabiegów stymulacji w geotermii wspomaganej, opis hydraulicznego szczelinowania gorących suchych skał, charakterystykę parametrów sprężystości skał, opis laboratoryjnych metod wyznaczania parametrów sprężystości skał oraz przedstawił symulacje numeryczne geometrii szczeliny hydraulicznej.

Według Autora tematyka pozyskiwania energii cieplnej skał systemami geotermalnymi typu wspomaganego jest dyskutowana w Polsce już od kilkunastu lat. To jednak według Doktoranta dotychczasowe prace teoretyczne i zbiór publikacji wydanych w ramach projektu Energisers nie były ukierunkowane na określenie zależności pomiędzy parametrami mechanicznymi gorących suchych skał a geometrią kolektora geotermalnego. Skłoniło to Autora do podjęcia się tej tematyki i na podstawie laboratoryjnie wyznaczonych dynamicznych parametrów sprężystości skał, danych petrofizycznych, a także danych dotyczących naprężenia złożowego wyznaczyć geometrię szczeliny powstałej w hipotetycznym zabiegu hydraulicznego szczelinowania, w strukturze geologicznej perspektywicznej z punktu widzenia wspomaganego systemu geotermalnego.

Autor sformułował szczegółowo 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,
- dopracowanie metodyki badań ultradźwiękowych próbek skał reprezentujących kolektory gorących suchych skał w warunkach wysokiego ciśnienia i temperatury, poprzedzone modyfikacją oprzyrządowania badawczego, dostosowującą je do bezpiecznej pracy w tych warunkach,
- określenie korelacji pomiędzy parametrami wyznaczonymi metodą nieniszczącą ultradźwiękową oraz niszczącą wytrzymałościową,
- wykonanie symulacji numerycznych geometrii szczelin w wybranych obszarach perspektywicznych dla wspomaganych systemów geotermalnych w Polsce,

- przygotowanie ogólnych rekomendacji technologicznych do zabiegów szczelinowania hydraulicznego w analizowanych formacjach.

Wybór tematyki badawczej rozprawy doktorskiej mgr Moski należy uznać za trafny z punktu widzenia naukowego, ale co trzeba tu mocno podkreślić, ma on również bardzo duże znaczenie aplikacyjne dla projektowania elementów technologii hydraulicznego szczelinowania w gorących suchych skałach na dużych głębokościach.

Kolejne rozdziały w autoreferacie (od 2 do 6) opisują w sposób skrócony po kolei tematykę podjętą w publikacjach (od 1 do 5).

W pierwszej publikacji (Moska i in., 2021) (rozdział 2 autoreferatu) Autor przedstawił na podstawie szczegółowej analizy dostępnej literatury przegląd uwarunkowań geologicznych, petrofizycznych, tektonicznych oraz elementów technologii hydraulicznego szczelinowania w najważniejszych projektach wspomaganych systemów geotermalnych prowadzonych na świecie. Doktorant wskazał, że hydrauliczne szczelinowanie jest najczęściej używaną i najskuteczniejszą metodą tworzenia kolektorów geotermalnych w skałach typu gorące suche skały, a jedną z najistotniejszych kwestii dotyczących stymulacji hydraulicznej tych formacji są różnice w mechanizmie stymulacji dla skał osadowych i magmowych.

Doktorant zwrócił uwagę, że formacje osadowe są stymulowane w mechanizmie tensyjnym i powstają w nich najczęściej nowe indukowane szczeliny. A w formacjach magmowych szczeliny naturalne reaktywowane są w mechanizmie hydrościnnania. Przegląd dostępnej literatury oraz wykonanych analiz lokalizacji w Polsce umożliwił również Autorowi wybór najbardziej perspektywicznych regionów o podwyższonym potencjale wspomaganych systemów geotermalnych przewidzianych do dalszej analizy i badań laboratoryjnych. Do tych obszarów Autor zaliczył rejon Karkonoszy, blok Gorzowa, nieckę szczecińską, nieckę mogileńsko-łódzką oraz blok Górnoląski. Wybór tych obszarów uważam za prawidłowe i cenne oraz umożliwiające charakterystykę kolektorów geotermalnych zarówno w skałach osadowych jak i magmowych.

W drugiej publikacji (Moska i in., 2023) (trzeci rozdział autoreferatu) Autor przedstawił ponownie przegląd literatury dotyczący potencjału geotermalnego gorących suchych skał w krajach południowo-wschodniej części basenu bałtyckiego.

Należy podkreślić, że Doktorant wystarczająco szczegółowo w dwóch pierwszych publikacjach dokonał przeglądu literatury w zakresie głównego nurtu swojej pracy, dotyczącego przeglądu uwarunkowań tektonicznych, geomechanicznych i powiązanych z nimi

aspektów technologicznych hydraulicznego szczelinowania we wspomaganych systemach geotermalnych.

W trzeciej publikacji (Moska i in., 2024) (czwarty rozdział autoreferatu) Autor na podstawie własnych badań laboratoryjnych przedstawił charakterystykę parametrów petrofizycznych, geomechanicznych i cech petrograficznych perspektywicznych formacji typu gorące suche skały. Doktorant analizował granity karkonoskie, wulkanity bloku Gorzowa oraz piaskowce z niecki mogileńsko-lódzkiej, charakteryzujące się odpowiednimi parametrami petrofizycznymi dla wspomaganego systemu geotermalnego. Doktorant analizował parametry petrofizyczne i skład mineralny, dynamiczne parametry sprężystości w funkcji osiowego ciśnienia efektywnego oraz wskaźnik kruchości zarówno na podstawie badań petrograficznych jak i na podstawie dynamicznych parametrów sprężystości.

W artykule Doktorant zaproponował również bardzo cenny nowy sposób interpretacji wskaźnika kruchości dla gorących suchych skał magmowych. Obniżone wartości współczynnika kruchości, powiązane z obniżonym modułem Younga, mogą wskazywać według Autora strefy o obniżonej wytrzymałości w górotworze, które po stymulacji hydraulicznej mogą służyć jako arterie przewodności w wspomagany systemie geotermalnym.

W czwartej publikacji (Labus i in., 2025) (piąty rozdział autoreferatu) Autor na podstawie własnych badań laboratoryjnych przedstawił charakterystykę parametrów termicznych perspektywicznych dla wspomaganych systemów geotermalnych skał z bloku Gorzowa i bloku karkonoskiego. Doktorant badał efuzyjność, dyfuzyjność, oraz przewodność i pojemność cieplną. Na podstawie badań wykazał, że pojemność cieplna analizowanych skał jest ujemnie skorelowana z gęstością a efuzyjność, dyfuzyjność i przewodność i pojemność cieplna są dodatnio skorelowana z porowatością. Doktorant wykazał również, że jako lokalizacja wspomaganych systemów geotermalnych granity karkonoskie o wysokiej dyfuzyjności i przewodnictwie cieplnej są bardziej perspektywiczne od ryolitów bloku Gorzowa. Ryolity o niższych wartościach tych parametrów, ze względu na wysokie temperatury początkowe są według Autora również obiecujące z punktu widzenia długiej żywotności potencjalnych systemów geotermalnych. W artykule tym Doktorant przedstawił również bardzo ciekawe wyniki numerycznego modelowania zmian temperatury formacji i zasięgu jej chłodzenia podczas długotrwałej eksploatacji energii termalnej oraz wyniki modelowania geochemicznego reakcji zachodzących w tych skałach w trakcie eksploatacji ciepła.

W piątej publikacji (Moska i in., 2025) (szósty rozdział autoreferatu) Doktorant przedstawił bardzo ciekawe wyniki badań wytrzymałościowych w warunkach jednoosiowego i konwencjonalnego trójosiowego ściskania oraz uzupełniające pomiary dynamicznych parametrów sprężystości w pełni nasyconych 2% roztworem chlorku potasu próbek piaskowca czerwonego spągowca z niecki mogileńsko-łódzkiej oraz granitu karkonoskiego. Przeprowadzone badania umożliwiły porównanie statycznych i dynamicznych parametrów sprężystości badanych skał. Doktorant wykazał, że Granity cechuje bardzo duże zróżnicowanie parametrów sprężystości, dynamiczne parametry sprężystości są ponad dwa razy wyższe od statycznych parametrów sprężystości, natomiast piaskowce charakteryzują się generalnie zbliżonymi wartościami statycznych i dynamicznych parametrów sprężystości.

W publikacji tej Doktorant przedstawił również wyniki autorskiej symulacji numerycznej geometrii szczelin w obu analizowanych formacjach oraz określił wpływ parametrów sprężystości na geometrię szczeliny. Autorska analiza wrażliwości parametrów geometrii szczeliny wykazała, że wpływ modułu Younga na geometrię szczeliny nie przekracza kilku procent. Wpływ tego parametru na rozwartość szczeliny w granitach osiąga wartości rzędu kilkudziesięciu procent, natomiast w piaskowcach pozostaje na poziomie kilku procent. Z kolei wpływ współczynnika Poissona na geometrię szczeliny oraz jej przewodność w obu formacjach jest marginalny. Istotne według Autora jest jednak to, że w formacji piaskowcowej wzrost modułu Younga prowadzi do znacznego ograniczenia zjawiska embedmentu oraz do zwiększenia przewodności szczeliny o kilkanaście procent.

W rozdziale 7 autoreferatu „Rekomendacje technologiczne” na podstawie wszystkich prac przeprowadzonych w ramach rozprawy Doktorant przedstawił prawidłowe i dobrze udokumentowane spostrzeżenia i zalecenia, które mogą być przydatne podczas projektowania hydraulicznego szczelinowania w gorących suchych skałach w Polsce.

Autoreferat kończy rozdział 8 „Podsumowanie i wnioski”, które moim zdaniem jest prawidłowo sformułowany i zawiera 15 ogólnych wniosków, podzielonych na pięć etapów pracy nawiązujących do pięciu publikacji.

Ocena rozprawy doktorskiej

Recenzowana rozprawa doktorska mgra Moski jest dojrzałym studium poświęconym określeniu wpływu parametrów sprężystości wybranych perspektywicznych formacji gorących suchych skał na proces hydraulicznego szczelinowania dla potrzeb wspomaganych systemów geotermalnych. Autor w sposób właściwy zaprojektował i wykonał laboratoryjne badania geomechaniczne, ultradźwiękowe i termiczne, a następnie na ich podstawie, uwzględniając

szczegółowy i wyczerpujący przegląd literatury światowej i polskiej, wykonał symulacje numeryczne geometrii szczelin w gorących suchych skałach oraz wyznaczył wpływ parametrów sprężystości na geometrię szczelin. Zarówno podczas badań laboratoryjnych jak i symulacji numerycznej Doktorant wykazał się doskonałym opanowaniem warsztatu badawczego. Pomimo szeroko zakrojonych prac laboratoryjnych i numerycznych przygotował jasno, czytelnie i przejrzystie skonstruowaną rozprawę doktorską. Na uwagę zasługują bardzo jasne i czytelne wnioski przedstawione w ostatnim ósmym rozdziale autoreferatu.

Doktorant w pracy mającej charakter wdrożeniowy zintegrował praktyki stosowane w Instytucie Nafty i Gazu z wiedzą zdobytą w trakcie analizy dostępnej literatury przedmiotu oraz z wynikami i interpretacją własnych badań laboratoryjnych oraz symulacją numeryczną.

Do najważniejszych osiągnięć mgra Moski należy zaliczyć wykonanie modeli geometrii szczelin w gorących suchych skałach z wykorzystaniem oprogramowania komputerowego oraz sformułowanie rekomendacji technologicznych do zabiegów szczelinowania hydraulicznego w gorących suchych skałach w Polsce, z uwzględnieniem mechaniki ośrodka skalnego, w tym jego parametrów sprężystości.

Za bardzo cenne uważam również wyznaczenie parametrów sprężystości próbek skalnych w warunkach ciśnienia i temperatury charakterystycznych dla rejonów potencjalnych systemów geotermalnych na terenie Polski oraz określenie zależności dynamicznych parametrów sprężystości w funkcji zmian naprężenia w górotworze oraz wyznaczenie korelacji pomiędzy dynamicznymi i statycznymi parametrami sprężystości. Doktorant stworzył również Autorską metodykę badań ultradźwiękowych skał w warunkach wysokich ciśnień i temperatur wraz z modyfikacją oprzyrządowania do badań ultradźwiękowych umożliwiającego prowadzenie badań w warunkach złożowych, typowych dla perspektywicznych obszarów wspomaganych systemów geotermalnych w Polsce.

Na koniec należy podkreślić, że wszystkie cele naukowe i wdrożeniowe w pracy zostały zrealizowane, a Autor określił geometrię szczelin powstających w procesie hydraulicznego szczelinowania dla dwóch geologicznych formacji o odmiennych cechach litologicznych, uznanych za perspektywiczne z punktu widzenia rozwoju wspomaganych systemów geotermalnych.

Recenzowana praca znacząco poszerza również wiedzę o wpływie parametrów sprężystości skał na geometrię szczelin hydraulicznych w wspomaganych systemach geotermalnych na terenie Polski.

Uwagi szczegółowe i dyskusyjne

Po zapoznaniu się z treścią pracy nasuwają się pewne ogólne pytania:

- Dlaczego Doktorant wyciął próbki do badań o średnicy 2,54 i smukłości 2?
- Dlaczego Doktorant wyciął próbki tylko równoległe do osi rdzenia?
- Czy sposób wycinania próbek - równoległy do osi rdzenia miał wpływ na uzyskane wyniki ultradźwiękowe i wytrzymałościowe?
- Czy model geometrii szczelin wykonany dla piaskowców z obszaru niecki mogileńsko-lódzkiej można bezpośrednio przełożyć na pozostałe obszary perspektywiczne dla geotermii wspomaganej w Polsce, czyli na karbońskie formacje osadowe z GZW i skały osadowe niecki szczecińskiej?
- Czy model geometrii szczelin wykonany dla karbońskich granitów z rejonu Karkonoszy można bezpośrednio przełożyć na ryolity bloku Gorzowa?
- w autoreferacie Doktorant używał termin „naprężen”, który jest nieprawidłowy, należy używać termin „naprężenia” (tensor naprężenia) w liczbie pojedynczej.

Wniosek końcowy

Praca doktorska mgra Rafała Moski, w mojej opinii, jest bardzo wartościową pracą naukową. Autor wykazał dobrą i szeroką znajomość przedmiotu badań oraz wykazał się umiejętnością w prowadzeniu samodzielnych badań naukowych.

W wyniku przeprowadzonej analizy rozprawy doktorskiej mgra Moski stwierdzam, że:

- rozprawa znacznie poszerza i systematyzuje dotychczasowy stan wiedzy na temat wpływu parametrów sprężystych na proces szczelinowania hydraulicznego dla potrzeb wspomaganych systemów geotermalnych na terenie Polski,
- Doktorant wykazał się bardzo dobrą znajomością przedmiotowego zagadnienia, odpowiednim poziomem wiedzy teoretycznej, umiejętnością samodzielnego prowadzenia prac badawczych, wnikliwością i starannością ich interpretacji oraz kreatywnością w prowadzeniu analiz i poszukiwaniu rozwiązań,
- rozprawa zawiera szereg nowych elementów stanowiących oryginalny dorobek Autora,
- Doktorant osiągnął wszystkie zaplanowane cele wdrożeniowe.

Biorąc to wszystko pod uwagę należy stwierdzić, że przedłożona mi do recenzji rozprawa doktorska mgra Rafała Moski stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i wdrożeniowego, prezentuje ogólną wiedzę Doktoranta do stopnia doktora w dyscyplinie Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka oraz spełnia warunki stawiane rozprawie doktorskiej określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce.

Stwierdzenie to upoważnia mnie do przedstawienia Wysokiej Radzie Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka wniosku o dopuszczenie mgra Rafała Moski do publicznej obrony rozprawy doktorskiej na temat „Wpływ parametrów sprężystych skał na proces szczelinowani hydraulicznego dla potrzeb wspomaganych systemów geotermalnych (EGS) na terenie Polski”.

dr hab. Paweł Łukaszewski