

**Dr.-Eng. Grzegorz Kwiatek**  
**Section 4.2 Geomechanics and Scientific Drilling**  
**Telegrafenberg D422, D14473 Potsdam**  
kwiatek@gfz-potsdam.de  
Telephone: +49 (0)331 288-1384

Poczdam, 1 Sierpnia 2022

## Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Pawła Wandycza

pt. „Wyznaczenie współczynnika dobroci Q na podstawie zdarzeń mikrosejsmicznych indukowanych podczas procesu szczelinowania hydraulicznego oraz ocena możliwości jego wykorzystania w przetwarzaniu danych mikrosejsmicznych”

### 1. Wstęp

Recenzję rozprawy doktorskiej autorstwa mgr. inż. Pawła Wandycza pt. „Wyznaczenie współczynnika dobroci Q na podstawie zdarzeń mikrosejsmicznych indukowanych podczas procesu szczelinowania hydraulicznego oraz ocena możliwości jego wykorzystania w przetwarzaniu danych mikrosejsmicznych” opracowałem w odpowiedzi na pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej – Nauki o Ziemi i Środowisku, prof. dr. hab. inż. Jacka Matyszkiewicza, z 1.06.2022, o sygnaturze WGGiOŚ-dz.51/510-75/2022. Rozprawa doktorska powstała w Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie na Wydziale Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska pod kierunkiem promotora dr. hab. inż. Michała Stefaniuka oraz promotora pomocniczego dr. inż. Tomasza Maćkowskiego.

Recenzowana praca składa się z 59 stron tekstu, na który składają się streszczenia w języku polskim i angielskim, opis struktury pracy oraz dwie główne części pracy. Część pierwsza pracy zawiera 6 rozdziałów z podrozdziałami przedstawiającymi cel i zakres rozprawy, wprowadzenie oraz dyskusję publikacji stanowiących rozprawę doktorską. Ta część zawiera także spis literatury zawierający w sumie 83 pozycji (publikacje polskich i zagranicznych autorów). Część druga zawiera streszczenia 3 publikacji, oświadczenia współautorów publikacji naukowych o ich wkładzie oraz załączniki – przedruki opublikowanych prac. W skład pracy wchodzi 12 rysunków (wyłączając rysunki w samych publikacjach). W rozprawie doktorskiej w części drugiej wyszczególniono zakres prac prowadzonych bezpośrednio przez doktoranta, co umożliwia ocenę jego wkładu w badania. Rozprawa napisana jest w języku polskim. Tytuł pracy odzwierciedla jej treść.

Celem pracy, jak czytamy w streszczeniu, było „wyznaczenie współczynnika Q w warstwach syluru

i ordowiku” w obrębie obniżenia bałtyckiego oraz „wykorzystanie tego parametru do oszacowania sprawności powierzchniowej sieci monitorującej proces szczelinowania hydraulicznego” za pomocą „opracowanej autorskiej metody analizy sprawności powierzchniowej sieci monitorującej proces szczelinowania hydraulicznego”. Główne rezultaty pracy obejmują stworzenie katalogów sejsmicznych dla dwóch kampanii szczelinowania hydraulicznego przeprowadzonych w otworach Lubocino 1H oraz Wysin 2H/2Hbis w północnej Polsce, analizę tego katalogu i korelację z dostępnymi danymi geofizycznymi i geologicznymi/tektonicznymi, wyznaczenie współczynników jakości fal P i S, jakościową i ilościową ocenę wpływu tłumienia na efektywność monitoringu w otworach oraz dyskusję problemów związanych z monitoringiem powierzchniowym (w sensie detekcji zjawisk).

## 2. Analiza rozdziałów rozprawy

### Część pierwsza pracy

Rozdział 1. „Wprowadzenie” prezentuje cztery tezy badawcze rozprawy doktorskiej oraz strukturę pracy doktorskiej. Niewątpliwie teza (I) „Efektywne tłumienie fali sejsmicznej w ośrodku geologicznym może zostać wyznaczone na podstawie charakterystyki spektralnej danych mikrosejsmicznych” jest szeroko prezentowana i dyskutowana w samej rozprawie (w części pierwszej i części drugiej, tj. w dołączonych publikacjach) na podstawie przeprowadzonej analizy danych pasywnego monitoringu sejsmicznego z obu stymulacji. Tezy (II) „Istnieje zależność pomiędzy zasięgiem oraz liczbą detekcji zdarzeń mikrosejsmicznych a rozkładem współczynnika dobroci Q w ośrodku geologicznym” oraz (IV) „Wykorzystanie współczynnika dobroci Q obliczonego na podstawie otworowych danych mikrosejsmicznych pozwala na bardziej efektywne przetwarzanie powierzchniowych danych mikrosejsmicznych” dyskutowane/udowodnione są w znacznie mniejszym stopniu, do czego wrócę w dalszej części recenzji. Natomiast teza (III) „Współczynnik dobroci Q nie zależy od wartości magnitudy zdarzenia mikrosejsmicznego” nie została według mnie przedyskutowana w wystarczający sposób. Autor rozprawy nie formułuje wyraźnie żadnej hipotezy badawczej, formułuje za to konkretne cele pracy w kolejnym rozdziale.

Rozdział 2 „Cel i zakres pracy” stanowi ogólne wprowadzenie do zagadnienia szczelinowania hydraulicznego oraz zagrożeń związanych z tym technologicznym procesem. Autor koncentruje się na dyskusji wokół hazardu sejsmicznego oraz sposobów jego redukcji, analizując dane z pasywnego monitoringu mikrosejsmicznego. Widoczny jest tutaj niemal kompletny brak odwołań do publikacji krajowych i zagranicznych, jak również wąskie przedstawienie tematu szczelinowania hydraulicznego w sensie związanych z nim zagrożeń oraz sposobów jego redukcji. Autor koncentruje się właściwie tylko na pasywnym monitoringu sejsmicznym i jego wykorzystaniu w sensie „traffic light systems”, pomija natomiast użycie danych sejsmicznych na przykład w analizie procesów szczelinowania czy ich korelacji z przeprowadzanymi operacjami technologicznymi mającymi zredukować hazard sejsmiczny. Koniec rozdziału to przedstawienie celów pracy oraz sposobów osiągnięcia tych celów w samej pracy. Założone cele pracy to (tekst został nieco zmieniony na potrzeby recenzji, ale bez utraty znaczenia): (A) detekcja i lokalizacja zjawisk zarejestrowanych podczas dwóch kampanii szczelinowania hydraulicznego w otworach Wysin i Lubocino, (B) określenie współczynnika dobroci fal P i S w warstwach szczelinowanych, (C) porównanie i ocena efektywności powierzchniowej i otworowej sieci monitorującej, (D) wybór optymalnej metodyki monitoringu w warunkach geologicznych w północnej Polsce, oraz (E) określenie i dyskusja założeń optymalizacji sieci monitorującej. Ponieważ praca nie zawiera bezpośrednio przedstawionych hipotez naukowych, skupię się na sprawdzeniu, czy poszczególne

tezy/cele zostały osiągnięte i/lub dokładnie przedyskutowane, zakładając, że w świetle Art. 13 ust. 1 (Dz.U. 2017 poz. 1789) o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki oznaczałoby to „oryginalne rozwiązanie problemu naukowego (...)”.

Rozdział 3 przedstawia lokalizację badań oraz opis budowy geologicznej rejonu. Rozdział ten zdominowany jest przez nieproporcjonalnie rozbudowaną sekcję dotyczącą geologii/tektoniki obszarów obu kampanii szczelinowana hydraulicznego. Sekcja ta, co należy docenić, jest wyjątkowo dobrze udokumentowana odwołaniami do innych prac oraz rysunkami. Uważam jednak, że ten rozdział pracy nie wnosi praktycznie nic do samej dyskusji celów/tez w rozprawie doktorskiej i ogólnie jest słabo połączony z następnymi rozdziałami – przeglądem analizy danych, interpretacją wyników i wnioskami.

Rozdział 4 prezentuje skrócony opis metodyki badań oraz wyników, włączając opis monitoringu sejsmicznego, procedury prowadzącej do uzyskania katalogów zjawisk sejsmicznych, oraz metodykę obliczania współczynnika tłumienia wraz z opisem rezultatów badań nad tłumieniem.

Podrozdział 4.1 przedstawia przegląd otworowego monitoringu sejsmicznego (zasadniczo dobrze udokumentowany odwołaniami do publikacji innych autorów), a także skrócony opis przetwarzania danych z sieci otworowych obu projektów wraz z referencjami do załączonych publikacji będących częścią rozprawy.

W podrozdziale 4.2 autor wskazuje prace Dunkana (2005) i Lakingsa jako jedne z pierwszych wykorzystujących sieci powierzchniowe do monitoringu szczelinowania, co jest nieco zaskakujące, jako że powierzchniowy monitoring sejsmiczny był wykorzystywany już w 1961 roku w Rocky Mountain Arsenal, Colorado (np. Healy et al., 1968: 10.1126/science.161.3848.1301). Sam rozdział dyskutuje sposoby, zalety i wady monitoringu powierzchniowego, płynnie przechodząc do skróconej prezentacji i dyskusji wyników przetwarzania z otworu Lubocino 2H i porównania efektywności monitoringu powierzchniowego z otworowym.

Podrozdział 4.3 przedstawia podstawy szacowania tłumienia fali sejsmicznej oraz jego wykorzystanie jako ważnego atrybutu sygnału sejsmicznego. Szkoda, że ten ogólnie interesujący rozdział (szczególnie że parametr ten jest kluczowym elementem pracy) został napisany lakonicznie. Brak tu rozszerzonej dyskusji nt. sposobów wyznaczania współczynnika tłumienia i jego zastosowań w analizie i interpretacji danych sejsmicznych (tym niemniej Autor odsyła nas od czasu do czasu do kilku innych prac). Dla przykładu: w rozdziale nie ma informacji, jakich wartości  $Q$  można się spodziewać dla różnych ośrodków geologicznych, jaka jest teoretyczna różnica pomiędzy  $Q$  obliczanym dla fali P i S i co z tego może wynikać dla interpretacji współczynnika tłumienia (dodam, że nie ma tych informacji również w załączonych publikacjach!). Te dodatkowe informacje umożliwiłyby lepsze zrozumienie, dlaczego właściwie Autor zajmuje się tłumieniem. Jest tu też poważny błąd merytoryczny w zdaniu: „Spadek amplitudy związany jest m.in. z efektem rozwierania sferycznego, a wielkość tego spadku (...) jest proporcjonalna do kwadratu odległości od źródła” – spadek amplitudy jest bowiem odwrotnie proporcjonalny od odległości od źródła.

Rozdział 5 przedstawia podsumowanie przeprowadzonych przez Autora rozprawy badań, które – cytuję – „koncentrowały się na przetwarzaniu i interpretacji powierzchniowych i otworowych danych mikrosejsmicznych”. Pomijając detale samej analizy w publikacjach wchodzących w skład rozprawy, do których odniosę się w dalszej części recenzji, wydaje się, że przedstawione w tym rozdziale wnioski powinny w jakiś sposób odnosić się do założonych celów pracy i/lub założonych tez, a nie (w większości) przedstawiać prawie wyłącznie podsumowanie obserwacji poczynionych

przez Autora na podstawie analizy danych. Szczególnie przedstawione wnioski w mojej ocenie nie omawiają wyczerpująco celów (D) i (E), i tylko w niewielkim stopniu cel (C). Sugeruję zatem modyfikację tego rozdziału – powinien on podsumowywać poczynione obserwacje oraz skonfrontować je założonymi cele i tezami pracy.

Rozdział 6 zawiera spis literatury. Odnośniki 2, 5, 8, 20, 21, 28, 48, 53, 63, 78 zawierają błędy typograficzne, które powinny zostać poprawione. Ponadto, niektóre refererowane prace mają sygnaturę DOI, a niektóre nie (choć taką zapewne posiadają z uwagi na ich datę publikacji). Sugeruję, by Autor rozprawy poprawił błędy w referencjach, usystematyzował interpunkcję i poszczególne składowe referencji.

### Część druga pracy

Część druga rozprawy rozpoczyna się Rozdziałem 7, który przedstawia streszczenia trzech prac naukowych w recenzowanych czasopismach wchodzących w skład rozprawy doktorskiej. Dla prac Z1, Z2, Z3 *impact factor* to odpowiednio 1.176 (*Acta Geodynamic et Geomaterialia*), 1.201 (*Interpretations*) oraz 2.054 (*Acta Geophysica*). Streszczenia (Rozdział 8) przedstawiają konkretny wkład Autora rozprawy w załączone publikacje (Rozdział 9). Wkład Autora w publikacje jest znaczny (70%) dla prac Z2 i Z3 i nieco mniejszy dla pracy Z1 (40%). Ponieważ prace te zostały opublikowane w recenzowanych czasopismach, moje komentarze i pytania do tych publikacji (załącznik A recenzji) będą dotyczyły wyłącznie niejasności związanych z celami/tezami stawianymi w rozprawie.

### 3. Ocena rozprawy

Niewątpliwie tematyka pracy doktorskiej mgr. inż. Pawła Wandycza dotyka ważnych zagadnień związanych z przetwarzaniem pasywnych danych sejsmicznych. Optymalizacja sieci sejsmicznej służącej monitoringowi niewielkich zjawisk sejsmicznych pozwala zasadniczo na uniknięcie (w przyszłości) dodatkowych kosztów przez operatora przemysłowego. Przeprowadzone optymalizacje pozwalają zapewnić lepsze jakościowo dane sejsmiczne w przyszłych kampaniach, które później mogą posłużyć zarówno do lepszej oceny jakości szczelinowania hydraulicznego, sejsmo-mechanicznych procesów z nim związanych, jak i efektywniejszej analizy i ostatecznie redukcji hazardu sejsmicznego. Wyznaczanie współczynnika jakości Q jest tutaj ważnym elementem takiej optymalizacji, szczególnie w sytuacji gdy mamy do czynienia (jak dla danych wykorzystanych w tej pracy) z niewielkimi zjawiskami sejsmicznymi w ośrodku geologicznym charakteryzującym się silnym tłumieniem. Wybraną tematykę rozprawy doktorskiej uważam zatem za zasadną, zasadniczo interesującą, a samą pracę Autora jako niewątpliwie stanowiącą wkład w zrozumienie problemów i wyzwań wobec jakich stoi lokalny pasywny monitoring sejsmiczny szczelinowań hydraulicznych (i lokalny monitoring mikrosejsmiczny w ogólności) w rejonie północnej Polski.

Autor rozprawy doktorskiej podjął się, wraz z Współautorami, analizy wymagających danych sejsmicznych o obiektywnie słabej jakości „wejściowej” dostarczonych przez operatora. Słaba jakość dostępnych danych w obu szczelinowaniach hydraulicznych ograniczyła jednak widocznie możliwość interpretacji i wyciągnięcia szerszych wniosków co do niektórych z postawionych początkowo celów (D)-(E) oraz tez badawczych (II)-(IV), o czym będzie mowa poniżej. Tym niemniej, należy zdecydowanie docenić determinację Autora (i współautorów) w stworzeniu jak najlepszych i jednolitych katalogów sejsmicznych dla obu stymulacji oraz w ich zinterpretowaniu. Wybrana droga przetwarzania danych, pomimo pewnych problemów i niejasności (załącznik A

recenzji), wydaje się recenzentowi *optymalna*. Autor rozprawy wykazał się umiejętnością korzystania z nowoczesnych metod analizy danych sejsmicznych, a także potrafi samodzielnie stworzyć własne narzędzia do przetwarzania wymagających danych. Podsumowując ten fragment, Autor rozprawy wykazał ogólną wiedzę teoretyczną w danej dyscyplinie naukowej, a także umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Ponadto należy docenić współpracę Autora rozprawy (tu reprezentującego środowisko naukowe) z przemysłem w ramach grantów NCB „Blue Gas” oraz w ramach stażu w firmie Seismik s.r.o. Spodziewany transfer wiedzy w ramach takiej współpracy międzysektorowej powinien ostatecznie prowadzić do pojawienia się bardziej optymalnych rozwiązań monitoringu sejsmicznego szczelinowania hydraulicznego, a w konsekwencji zwiększenie konkurencyjności odpowiednich podmiotów komercyjnych i bezpieczeństwa prowadzenia działalności tych podmiotów.

Zagadnienia naukowe opracowywane przez Doktoranta zostały ujęte w formie czterech tez oraz pięciu celów. Cele (A) „detekcja i lokalizacja zjawisk (...)”, (B) „określenie współczynnika dobroci fal P i S (...)”, oraz (C) „porównanie efektywności powierzchniowej i otworowej sieci sejsmicznej (...)” zostały w ogólności osiągnięte dzięki całościowemu przetwarzaniu i interpretacji surowych danych monitoringu sejsmicznego stymulacji otworów Lubocino 2H i Wysin 2H/2Hbis (publikacje Z1-Z3). To samo dotyczy tezy (I) „Efektywne tłumienie fali sejsmicznej (...) może zostać wyznaczone na podstawie charakterystyki spektralnej danych mikrosejsmicznych”, która została dokładnie omówiona w publikacji Z3 (wraz z przykładami). Należy jednak nadmienić, że cel (C), z uwagi na niezależną od Autora słabą jakość danych powierzchniowych i ograniczony materiał wejściowy (tylko niewielka ilość wstrząsów została zarejestrowana przez sieć sejsmiczną na powierzchni), został osiągnięty tylko w sensie „jakościowym”. Autor wspomina o tym fakcie i wskazuje braki w kampanii monitoringowej, których nieobecność umożliwiłaby lepsze zrealizowanie celu.

**Komentarze do strony technicznej pracy.** Układ pierwszej części pracy jest w miarę przejrzysty, choć można mieć wrażenie pewnego braku spójności pomiędzy poszczególnymi rozdziałami. Jak już wspomniałem, kluczowe Rozdziały 2 i 4 nie dają czytelnikowi pełnego przeglądu stanu wiedzy zarówno w dziedzinie (monitoringu) szczelinowania, jak i metodologii stosowanych do obliczania tłumienia fal, a także przeglądu pracy dot. interpretacji tłumienia fal. Wydawało by się, że taka informacja powinna się pojawić właśnie w części pierwszej, ponieważ artykuły w części drugiej nie zawierają więcej szczegółów. Zupełnie inaczej jest z Rozdziałem 3 zawierającym wyczerpujące informacje o geologii i tektonikę regionu, które nie są znacząco wykorzystane w pozostałych rozdziałach rozprawy doktorskiej. Dla przykładu, przeprowadzona interpretacja sprawności sieci powierzchniowej praktycznie nie dyskutuje wpływu płytszych warstw na wyniki monitoringu, a jedynie wspomina w ich właściwościach tłumiących/rozpraszających fale sejsmiczne (bez odnośników). Rysunki są ogólnie dobrej jakości, choć czasami brakuje na nich pewnych informacji (patrz załącznik A recenzji). Uważam, że sam wybór rysunków w pierwszej części pracy jest nieco nieintuicyjny. Spodziewałbym się, że będą one wspierać dyskusję tez/celów/wyników rozprawy, agregując informację z załączonych publikacji Z1-Z3. Tymczasem rysunki skupiają na położeniu i geologii regionu (Fig. 1-4), sieci monitoringu sejsmicznego (Fig. 5,6,8), jakości sygnałów, detekcji i lokalizacji (Fig. 7, 9, 10, 11 i 12), czyli ogólnie na tematach związanych z akwizycją i analizą danych, a nie ich interpretacją/dyskusją w świetle postawionych celów i tez w pracy. Czytelnik zmuszony jest zatem do ciągłego kartkowania pomiędzy załącznikami, a pierwszą częścią pracy, aby zrozumieć tok rozumowania Autora w części pierwszej. Dodatkowe komentarze do strony

technicznej zawarłem w załączniku A recenzji, sugeruję ich uwzględnienie w poprawkach.

**Komentarze do strony merytorycznej pracy.** Prezentowana praca ma charakter skumulowany, tzn. jej główny wkład naukowy stanowią publikacje w recenzowanych czasopismach, które powinny stanowić logiczne dopełnienie/rozwinięcie/przedyskutowanie tez oraz celów rozprawy z części pierwszej pracy. Odnoszę jednak wrażenie, że niektóre cele i tezy postawione w rozprawie nie zostały w niej w wystarczający sposób przedyskutowane – ani bezpośrednio (tj. w części pierwszej pracy), ani nawet w jednym przypadku pośrednio, co z kolei wnioskuje ze szczegółowej lektury prac z załączników drugiej części rozprawy. Proszę zatem o odpowiedź na moje zamieszczone poniżej pytania i komentarze na dalszych etapach przewodu doktorskiego, np. poprzez odpowiednie korekty wprowadzone do pracy doktorskiej oraz odpowiedź na nie podczas publicznej obrony pracy doktorskiej:

1. Postawiona teza (II) „Istnieje zależność pomiędzy zasięgiem oraz liczbą detekcji zdarzeń mikrosejsmicznych, a rozkładem współczynnika dobroci  $Q$  w ośrodku geologicznym” wydaje się nie uwzględniać magnitud analizowanych zjawisk. Zgadzam się całkowicie z Autorem, że wartość tłumienia i odległość wpływają na poziom detekcji zjawisk, ale już absolutna liczba zjawisk sejsmicznych jest przecież funkcją magnitudy, parametrów hydraulicznych (np. *injection rate*), i samego ośrodka geologicznego (np. litologia, tektonika, naprężenia), które, oprócz jakościowego odniesienia do wpływu ośrodka geologicznego, nie są zasadniczo elementem dyskusji w rozprawie. Nie jest dla mnie jasne, jak Autor zatem udowodnił słuszność (II) na podstawie przykładów z obu kampanii szczelinowania hydraulicznego. Dodatkowo, estymacje współczynników tłumienia są obarczone błędem. Choć sam Autor nie podaje błędów estymacji (sic!), te można wizualnie oszacować, analizując ilustracje w załączonych publikacjach (Fig. 8, 10 w publikacji Z3). Co ciekawe, można też zauważyć, że wartości  $Q$  dla kampanii w otworze Lubocino-2H są zależne od niewielkich zmian w głębokości czujników (np. Fig. 9 w Z3), co ku mojemu rozczarowaniu nawet nie jest przedyskutowane. Rodzi to kolejne pytanie, czy dyskutowane różnice w wartościach współczynnika tłumienia pomiędzy otworami Lubocino i Wysin, biorąc pod uwagę znaczne niepewności i widoczne *state* odchylenia, są w stanie prowadzić do sporej, bo prawie jedno-dwuzędekowej różnicy w ilości zjawisk obserwowanych pomiędzy dwoma eksperymentami. Różnica ta sugeruje, zgodnie z zasadą Gutenberga-Richtera, i zakładając, że inne parametry nie grają znaczącej roli, że tłumienie musiałoby zmienić próg detekcji o co najmniej jedną jednostkę magnitudy.
2. Teza (III) „Współczynnik dobroci  $Q$  nie zależy od wartości magnitudy zdarzenia mikrosejsmicznego” jest zapewne zgodna ze stanem wiedzy naukowej, i jest także zapewne prawdziwa dla danych analizowanych przez Autora, ale cała praca nie podaje dowodów na jej słuszność, wykorzystując dane z obu eksperymentów.
3. Teza (IV) „Wykorzystanie współczynnika dobroci  $Q$  obliczonego na podstawie otworowych danych mikrosejsmicznych pozwala na bardziej efektywne przetwarzanie powierzchniowych danych mikrosejsmicznych” wymaga według mnie szczegółowego rozwinięcia. W obu eksperymentach tłumienie zostało obliczone na podstawie zapisów sieci otworowej (praca Z3), a współczynniki  $Q$  są uśrednionymi wartościami otrzymanymi na trasach pomiędzy wstrząsami a wszystkimi czujnikami otworowymi położonymi stosunkowo blisko miejsca szczelinowania. Tak więc współczynniki tłumienia są właściwe dla utworów syluru (Fig. 4 w części pierwszej rozprawy), ale już ich użycie dla tras promieni

sejsmicznych dla całego profilu geologicznego aż do powierzchni ziemi (Z2) jest *niewielko* dyskusyjne. Nasuwa się tutaj pytanie ogólne: jaka jest użyteczność obliczonych współczynników tłumienia dla „bardziej efektywnego przetwarzania *powierzchniowych* danych mikrosejsmicznych”? Na drodze fali propagującej z miejsca szczelinowania do czujników sieci powierzchniowej stają przecież choćby utwory Cechsztynu i osady polodowcowe, jak zresztą wspomina sam Autor, które zapewne znacznie zmieniają charakterystykę tłumienia.

4. Cel (C) pracy, tj. porównanie i ocena efektywności powierzchniowej i otworowej sieci monitorującej, jest ograniczony przez jakość danych dostępnych dla eksperymentu Lubocino. Autor porównuje dane sejsmiczne z czujników otworowych i powierzchniowych dla zjawisk sejsmicznych i strzelań perforacyjnych, korzystając z metodologii prezentowanej m.in. w pracy Einspigel i Eisner (2014). Mam tutaj pytanie do samej analizy, która zasadniczo jest prowadzona w zakresie 10-40 Hz (Fig. 7 w pracy Z2). Wydaje się, że obserwowane spektra amplitudowe prędkości drgań gruntu dla wstrząsów sejsmicznych i strzelań perforacyjnych, zarejestrowane na czujnikach otworowych, mają częstotliwości dominujące w zakresie 300-400 Hz. Wydaje się też, że spektra obu typów sygnałów opadają zgodnie z ogólnie znanymi modelami źródła sejsmicznego aż do częstotliwości ok. 100 Hz (jak, jeśli rozumiem dobrze skalę pionową na tym rysunku,  $\sim f^{-1}$ ). Poniżej 100 Hz uśrednione spektrum sygnału dla wstrząsów zmienia jednak kompletnie trend (amplituda stabilizuje się lub nawet rośnie ze spadkiem częstotliwości), co zasadniczo nie pojawia się dla strzelań. Prawie na pewno nie może to być efekt fizyczny, a więc jaka jest tego przyczyna? Zgaduję (ponieważ na dostępnych ilustracjach brakuje spektrów szumu), że przyczyną jest różna charakterystyka szumu w tym zakresie częstotliwościowym, w czasie kiedy odbywają się strzelania wstrząsowe i kiedy rejestrowane są tak naprawdę trzęsienia ziemi (np. obecność lub brak obecności zakłóceń związanych z pracą pomp). Można oczekiwać, że szumy pochodzące z prac inżynierskich mają poważny wpływ właśnie dla niskich częstotliwości. Alternatywnie, być może magnituda wstrząsów sejsmicznych jest znacznie mniejsza niż magnituda strzelań i *tak naprawdę nie ma* fizycznego sygnału w zakresie częstotliwościowym 10-40 Hz dla trzęsień ziemi. Moje hipotezy łatwo jest zweryfikować, np. poprzez porównanie spektrów szumów bezpośrednio przed interesującymi nas sygnałami (strzelań lub wstrząsów) ze spektrami następujących sygnałów (strzelań lub wstrząsów). Proszę Autora rozprawy o ustosunkowanie się do tego komentarza, choć ostatecznie wydaje się, że moje hipotezy nie wpływają zasadniczo na rozważania dla celu (C).
5. Uważam że omówienie celu (D) „wybór optymalnej metodyki monitoringu w warunkach geologicznych w północnej Polsce” zasadniczo nie został odpowiednio wyróżniony w pracy. Autor wspomina we wnioskach (Rozdział 5) o preferencji co do układu czujników na powierzchni w formie „patch array” wraz z odnośnikiem do pracy Z2. W tej ostatniej (a także w Z1 i Z3), mimo intensywnych poszukiwań, nie udało mi się odnaleźć żadnego fragmentu dyskutującego przeważą tego, a nie innego rozkładu powierzchniowego ani jakichś szerszych rozważań co do optymalnego monitoringu sejsmicznego. Uważam dyskusję tego celu za *szczególnie* interesującą, ponieważ byłaby korzystna dla efektywności przyszłych kampanii pasywnego monitoringu sejsmicznego w północnej Polsce, a wydaje się, że Autor posiada wartościową wiedzę praktyczną w tym temacie.

Zatem, jak tak naprawdę wygląda optymalna metodyka monitoringu mikrosejsmicznego dla szczelinowań hydraulicznych w warunkach geologicznych północnej Polski w świetle geologii, tłumienia, oczekiwanych magnitud z zakresu częstotliwościowego *versus* tłumienie, odległość, charakterystyka czujników, szum?

6. Podobnie do pkt. 5, także w przypadku celu (E) „określenie i dyskusja założeń optymalizacji sieci monitorującej” trudno stwierdzić, czy został on osiągnięty. Problemem jest tutaj fakt, że tak naprawdę nie wiem, co dokładnie Autor definiuje jako „założenia optymalizacji”. Pytanie, które chciałbym zadać, to jakie są, *dokładnie*, założenia optymalizacji sieci monitorującej?

Pozostałe, mniej istotne komentarze dotyczące spraw merytorycznych zawarte są w załączniku A recenzji.

#### 4. Podsumowanie

Mimo przedstawionych uwag krytycznych, które z całą pewnością możliwe są do skorygowania w toku następnych etapów przewodu doktorskiego, uważam, że wyznaczone cele rozprawy zostały zrealizowane. Recenzowana praca prezentuje oryginalne osiągnięcia badawcze Autora, które mają znaczenie użytkowe i metodyczne. Przeprowadzona analiza i interpretacja wymagających danych świadczy o praktycznej wiedzy Doktoranta i umiejętności prowadzenia badań i stanowi „oryginalne rozwiązanie projektu naukowego” w świetle art. 13 ust. 1 (Dz.U. 2017 poz. 1789). Tematyka pracy jest z całą pewnością istotna dla monitoringu sejsmicznego i interpretacji danych mikrosejsmicznych w rejonie północnej Polski. Należy także docenić fakt, że praca doktorska jest również solidnym przykładem współpracy międzysektorowej.

Wobec powyższego uważam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Pawła Wandycza pt. *„Wyznaczenie współczynnika dobroci Q na podstawie zdarzeń mikrosejsmicznych indukowanych podczas procesu szczelinowania hydraulicznego oraz ocena możliwości jego wykorzystania w przetwarzaniu danych mikrosejsmicznych”* spełnia warunki określone w art. 13 ust. 1 ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. 2017 poz. 1789). Wnoszę więc o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie mgr. inż. Pawła Wandycza do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora, w tym do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

Dr hab. inż. Grzegorz Kwiatek  
GFZ German Research Centre for Geosciences  
Section 4.2 Geomechanics and Scientific Drilling  
Telegrafenberg, D14473 Potsdam, Germany



## Załączniki

### A. Uwagi dodatkowe

Poniższe uwagi dotyczą zarówno części pierwszej doktoratu, jak i niejasności w załączonych publikacjach, które mają wpływ na cele i tezy realizowane przez doktoranta w ramach prowadzonego przewodu doktorskiego. Proszę doktoranta o gotowość do odpowiedzi na poniższe pytania podczas dalszych etapów przewodu doktorskiego lub w formie o bezpośrednich korekt do treści doktoratu.

Pierwsza część pracy:

S. 17: „W oparciu o studium efektywności wykonanej dla sieci powierzchniowej monitorującej zabieg szczelinowania w otworze Lubocino 2H przedstawiono rekomendacje dotyczące geometrii powierzchniowego rozkładu monitorującego podczas szczelinowania otworu Wysin 2H/2Hbis”. Dalej, na S. 39: „Uzyskane wyniki pozwoliły również na przedstawienie rekomendacji dotyczących sposobu prowadzenia akwizycji z wykorzystaniem sieci powierzchniowej w przyszłych planowanych eksperymentach szczelinowania hydraulicznego w warstwach ordowiku i syluru w północnej Polsce”. Niestety, nie znalazłem takich rekomendacji ani w pozostałej części pracy, ani załączonych publikacjach.

S. 30: „Mechanizmu fokalnego” jest niezbyt szczęśliwą kalką z języka angielskiego. Proponuję: „mechanizmu ogniska”.

S. 32: „W następnym kroku zarejestrowane przebiegi czasowe są sumowane wzdłuż obliczonej ścieżki frontu falowego”. Trudno zrozumieć, co Autor rozprawy miał tutaj na myśli.

S. 33: Dla Fig. 6, skoro w ilustracji przedstawiony układ sieci powierzchniowej, to można by dla porządku przedstawić sieć otworową.

S. 33, Fig. 7: Autor rozprawy wspomina o wysokim poziomie szumu antropogenicznego, referując do Fig. 7, która – bez wystarczającego opisu, co jest sygnałem, co szumem i dlaczego szum jest „wysoki” – nie pozwala na wyciągnięcie żadnych użytecznych wniosków z obserwacji tego rysunku. Brakuje też na przykład reprezentatywnych spektrów sygnału i szumu na jednym rysunku i pokazania, w których zakresach częstotliwości posiadamy użyteczny sygnał.

S. 34: Autor wspomina o metodach MAA i MVL, odsyłając do Fig. 8 jako przedstawiającego przykład działania algorytmu. Zastanawiające jest, że Autor wspomina na stronie 34, że szum zanika 300 m od głowicy otworu. Fig. 8 sugeruje jednak, że także czujniki znajdujące się znacznie dalej niż 300 m nie były zaakceptowane do dalszego przetwarzania. Autor nie komentuje tego w żaden sposób.

Fig. 9. Brak jakiegokolwiek informacji mogącej pomóc zidentyfikować, która grupa czujników jest pokazana.

S. 37: Przedstawiona dyskusja lokalizacji strzału perforacyjnego *versus* model prędkościowy jest niejasna. W szczególności nie rozumiem, czy ostatecznie mam ufać modelowi prędkościowemu, czy nie? Jeśli model prędkościowy został oszacowany niezależnie, to dlaczego nie został on poprawiony na podstawie danych ze strzelań, nawet jeśli są one złej jakości? Rozumiem kłopoty związane ze złą jakością sygnału, jednak różnica 1000 metrów pomiędzy prawdziwą i oszacowaną lokalizacją perforacji dyskwalifikuje według mnie użycie modelu prędkościowego z Fig. 6. Być może nie zrozumiałem do końca wywodów autorów, ale jak w takiej sytuacji mam ufać lokalizacjom zjawisk? Ponownie, brakuje szerszego komentarza Autora w tej kwestii.

Fig. 11. Być może się mylę, ale całki „funkcji gęstości prawdopodobieństwa” nie wyglądają jakby się sumowały do wartości 1.0, co dyskwalifikuje je jako przedstawiające funkcję gęstości prawdopodobieństwa. Może to są raczej „funkcje wiarygodności”?

S. 39: Dla pola dalekiego amplituda sygnału przy rozwieraniu sferycznym skaluje się jak  $1/R$ , nie jak  $1/R^2$ , jak sugeruje Autor rozprawy, co jest błędem merytorycznym. Po sprawdzeniu cytowanej referencji sądzę, że Autor nieprawidłowo zinterpretował cytowany fragment, który raczej odnosi się do energii fal, a nie

amplitudy.

S. 40: „Apparent attenuation” zwane znacznie częściej określane jest „scattering attenuation”, od którego zresztą wzięto się polskie „rozpraszanie fali”, które Autor używa nieco później. Być może Autor powinien wspomnieć o tej alternatywnej nazwie.

S. 41: Jaka jest różnica między „parametrami źródła” i „określeniem magnitudy”? Magnituda wstrząsu jest przecież parametrem ogniska sejsmicznego!

S.41: Istnieje znacznie więcej metod szacowania współczynnika Q, choćby najbardziej chyba popularna bezpośrednia inwersja ze spektrów wstrząsów (*spectral fitting*). Pominięte w tym akapicie są również bardzo popularne metody bazujące na fali coda.

S.41: Jakie są założenia metody proponowanej przez Eisnera i in. (2013) i dlaczego ich prezentacja/dyskusja została całkowicie pominięta zarówno w samej pracy, jak i w publikacjach? Nasuwa się choćby takie pytanie: Czy magnituda obserwowanych zjawisk pozwala w ogóle na zastosowanie metody?

S.42: Jakie są niepewności oszacowania parametru Q dla fal P i S z obu eksperymentów? Praca Z3 nie podaje wprost konkretnych wartości (choć rozrzut obserwacji można ocenić z ilustracji), które jednak mogą być ważne w świetle tez stawianych przez Autora.

Komentarze do publikacji będących częścią rozprawy doktorskiej

Praca Z3. SH107: Zapewniam, że publikacja Kwiatek i Ben-Zion (2016) nie odnosi się w żaden sposób do różnic w detekcji pomiędzy strzelaniami perforacyjnymi a wstrząsami sejsmicznymi, jej użycie jako odnośnika w tym miejscu jest niezrozumiałe.

Praca Z3. SH110: „The attenuation increases exponentially with frequency (Aki and Richards, 2002) reducing the high frequency content of the signal at the surface monitoring. This explains the fact that microseismic events recorded by surface arrays usually contain a signal in the range of 10–40 Hz (Duncan and Eisner, 2010)”. Zdanie to uzasadnia decyzję Autorów o skupieniu się na dolnym zakresie częstotliwości, ale zawiera trochę (wierzę, że niezamierzonych) niedopowiedzeń. Z całą pewnością tłumienie nie jest jedynym ani nawet najważniejszym czynnikiem takiego, a nie innego zakresu częstotliwości obserwowanego na powierzchni, a wypadkową własności ogniska sejsmicznego, radiacji, tłumienia, odległości i innych czynników.

Praca Z2. SH112 (Fig. 7). Analiza spektrów wstrząsów sejsmicznych sugeruje, że z jakiegoś powodu nie ma użytecznego sygnału w paśmie 10-100 Hz. Jeśli założyć, że częstotliwość narożna wynosi co najmniej 300 Hz (co ma sens, biorąc pod uwagę magnitudy i kształt spektrów amplitudowych prędkości drgań gruntu), widać wyraźnie, że dla wstrząsów widmo amplitudowe opada wyłącznie do mniej więcej 100 Hz, a później ponownie wzrasta. Taki efekt nie jest naturalny, i albo jest spowodowany innym przetwarzaniem (co raczej wykluczam) dla zjawisk sejsmicznych (w stosunku do strzelań), albo po prostu faktem, że te małe zjawiska nie mają energii < 100 Hz. Dołożenie spektrów szumu z fragmentów sejsmogramów poprzedzających same zjawiska prawdopodobnie wiele by wyjaśniło i dodatkowo wyjaśniłoby, czy są jakieś zmiany w charakterystyce szumu podczas faz *shut-in* i szczelinowana hydraulicznego.

Praca Z3. Fig. 9: Wyraźnie widać, że płytsze czujniki mają wyraźnie wyższe wartości Q dla poszczególnych zjawisk. Autor nie odnosi się zupełnie do tych obserwacji, choć obserwowane odchylenia wydają się znaczące, a Autor ostatecznie używa wartości średnich z wszystkich stacji dla każdego zjawiska. Jaka jest przyczyna takiego zjawiska? Czy takie zjawisko występuje także dla wartości Q z otworu Wysin?