Wrocław, 30.01.2025 r.

Prof. dr hab. inż. Jan Blachowski
Katedra Geodezji i Geoinformatyki
Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii
Politechnika Wrocławska

Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgra inż. Bartosza Naumowicza pt. „Wyznaczenie ruchów pionowych skorupy ziemskiej na obszarze Polski przy użyciu różnych zbiorów danych”

1. Podstawa formalna recenzji

Recenzja została przygotowana na podstawie uchwały Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie z dnia 14 października 2025 r., w oparciu o treść pracy doktorskiej przekazaną przez Przewodniczącego Rady Dyscypliny, dra hab. inż. Jacka Rapińskiego, prof. UWM

2. Ogólna charakterystyka rozprawy

Recenzowana rozprawa została przygotowana przez Doktoranta, Pana mgra inż. Bartosza Naumowicza w Katedrze Geoinformacji i Kartografii Instytutu Geodezji i Budownictwa, pod kierunkiem Promotora dra hab. inż. Kamila Kowalczyka, prof. UWM oraz Promotor pomocniczej dr inż. Beaty Wieczorek. Praca ma formę cyklu czterech publikacji (P1-P4) oraz wprowadzenia wraz ze zwięzłym omówieniem artykułów stanowiących cykl.

Wprowadzenie ma formę autoreferatu i składa się z sześciu rozdziałów. Są to: wstęp, cele (główny i szczegółowe), hipotezy oraz zadania badawcze, metody i dane, wyniki, dyskusja i podsumowanie wraz z kierunkami dalszych badań. Rozprawa zawiera także streszczenia w jęz. polskim i angielskim, zestawienie skrótowców i spisy bibliografii, rysunków oraz tabel, kopie publikacji stanowiących cykl i oświadczenia autorów.

Autoreferat pełni ważną rolę porządkującą, zawiera bowiem elementy przeglądu stanu wiedzy i przedstawia spójną koncepcję badawczą. Artykuły dokumentują wyniki kolejnych etapów prac a zarazem rozwoju naukowego Doktoranta. Opisują one poszczególne aspekty podjętego zagadnienia badawczego i stanowią logiczną sekwencję badań. Wymienione niżej prace opublikowane w latach 2022-2025 prowadzą czytelnika kolejno od wyników badań wstępnych, poprzez analizę różnych metod wyznaczania pionowych ruchów powierzchni ziemi do autorskiej metody integracji wyników z zastosowaniem podejścia hybrydowego obejmującego pomiary niwelacji precyzyjnej, GNSS i PS InSAR.

Praca 1 [P1] Naumowicz B., Wieczorek B., Pelc-Mieczkowska R. (2022) *Possibility of using the DInSAR method in the development of vertical crustal movements with Sentinel-1 data*. Open Geosciences, 14(1), 1290-1309. https://doi.org/10.1515/geo-2022-0401

Praca 2 [P2] Naumowicz B., Kowalczyk K., Pelc-Mieczkowska R. (2024) *PPP Solution-Based Model of Absolute Vertical Movements of the Earth's Crust in Poland With Consideration of Geological, Tectonic, Hydrological and Mineral Information*. Earth and Space Science, 11(12). https://doi.org/10.1029/2023EA003268

Praca 3 [P3] Naumowicz B., Kowalczyk K., (2025) *Integration of Leveling and GNSS Data to Develop Relative Vertical Movements of the Earth's Crust Using Hybrid Models*. Applied Sciences, 15(15) 8224. https://doi.org/10.3390/app15158224

Praca 4 [P4] Naumowicz B., Wieczorek B., Kowalczyk K., (2025) *The use of hybrid data: PsInSAR, GNSS and levelling in the development of a modern model of vertical movements of the Earth's crust in Poland*. Geodynamics, 2(39), 5-15. https://doi.org/10.23939/jgd2025.02.005

Wkład Doktoranta w te prace obejmował opracowanie koncepcji, istotny udział w opracowaniu metodyki badań, przygotowanie danych, przeprowadzenie obliczeń i analiz oraz wizualizację i interpretację ich wyników.

Badania opisane w autoreferacie oraz publikacjach realizowane były w ramach kształcenia w Szkole Doktorskiej Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie i zostały sfinansowane ze środków Uczelni, a także środków z programu PROM Narodowej Agencji Wymiany Akademickiej przeznaczonych na staż naukowy na Uniwersytecie Technicznym w Rydze (Łotwa).

W pierwszej z prac stanowiących cykl [P1] przedstawiono wyniki obliczeń, które miały na celu zweryfikowanie przydatności satelitarnej interferometrii radarowej z zastosowaniem metody różnicowej interferometrii SAR (ang. DInSAR) do wyznaczenia pionowych ruchów powierzchni ziemi. Badania obejmowały wyznaczenie przemieszczeń tą metodą dla trzech okresów (12, 24 i 336 dni) na podstawie danych z roku 2020 w sąsiedztwie czterech krajowych stacji GNSS (ang. Global Navigation Satellite System) wchodzących w skład ASG-EUPOS, tj. Borowa Góra, Borowiec, Lamkówko i Józefosław. Jako dane referencyjne wykorzystano szeregi czasowe GNSS PPP (ang. Precise Point Positioning). Porównanie przeprowadzono dla uśrednionych wartości w sąsiedztwie pięciu pikseli wokół stacji. Uzyskano zbieżne co do kierunku przemieszczeń wyniki analizy porównawczej, jednak odmienne o rząd do kilku rzędów wielości wartości. Doktorant słusznie stwierdził, że testowana metoda względnego wyznaczenia przemieszczeń powierzchni ziemi, m.in. ze względu na szereg czynników wpływających na koherencję (np. dekorelacji czasowej) nie jest przydatna w wyznaczaniu pionowych ruchów skorupy ziemskiej w skali regionalnej i wskazał dalsze kierunki badań np. wykorzystanie metody satelitarnej interferometrii radarowej trwałych rozpraszaczy (ang. PS InSAR).

Drugi etap badań, którego wyniki zaprezentowano w pracy [P2], dotyczył wyznaczenia absolutnego współczesnych pionowych ruchów skorupy na obszarze Polski w oparciu o rozwiązania GNSS. Wykorzystano szeregi czasowe z lat 2011-2021 dla 100 stacji GNSS na obszarze Polski i cztery metody wyznaczania prędkości wybrane na podstawie analizy literatury. W rezultacie otrzymano cztery zestawy prędkości stacji GNSS o wysokim współczynniku spójności (determinacji). Wynoszą one od -1 mm/rok do +1 mm/rok. Wyniki te

są zgodne z rezultatami otrzymanymi przez innych badaczy. Doktorant wykazał, że zarejestrowane dla 20% stacji prędkości nie odzwierciedlają ruchu skorupy ziemskiej, a prawdopodobnie ruch powierzchni Ziemi lub ruch własny. Jako potencjalne czynniki tego zjawiska zasugerował wpływy działalności człowieka, takich jak eksploatacja kopalin czy pobór wód podziemnych. Nie zostały one jednak poparte pogłębioną analizą statystyczną i stanowią interesujący kierunek dalszych badań.

Ciekawe i istotne są wyniki badań przedstawionych w pracy [P3] ukierunkowanych na analizę możliwości integracji pionowych ruchów skorupy ziemskiej opracowanych na podstawie niezależnych zestawów danych, tj. (względnych) niwelacji i (absolutnych) obserwacji GNSS PPP. Wykorzystano obliczone ruchy pionowe między wspólnymi punktami węzłowymi z kampanii niwelacyjnych przeprowadzonych w latach 1974/1982 i 1997/2004 oraz ruchy pionowe dla 100 stacji permanentnych polskiej sieci ASG EUPOS z lat 2011-2021 [P2]. Sieć podwójnej niwelacji (sieć ruchów pionowych) składała się łącznie z 222 wspólnych punktów węzłowych. Na podstawie analizy literatury Doktorant zastosował metody (hybrydowego) wyrównania sieci (metoda nieliniowa) i transformacji matematycznej. Wyrównanie przeprowadzono metodą najmniejszych kwadratów. Do oceny statystycznej wyników transformacji zastosowano średni błąd jednostkowy oraz błąd transformacji. Analizy przeprowadzono dla dwóch wariantów 50 i 11 punktów wspólnych przy założeniu jednorodności ruchów w ich sąsiedztwie.

Czwarta publikacja [P4] formułuje kluczowy wkład rozprawy, tj. zbadanie możliwości wyznaczenia względnych pionowych ruchów skorupy ziemskiej, opartego na danych z różnych (trzech) źródeł pomiarów: GNSS rejestrowanych na stacjach ASG-EUPOS, podwójnej niwelacji precyzyjnej oraz przetwarzanych techniką PSInSAR. Na podstawie wyników analiz podstawowych miar statystycznych wyznaczono zasięg bufora wokół stacji GNSS. Został on użyty do wyznaczenia przemieszczeń z danych PSInSAR (mediana ich wartości). Ostatecznie na podstawie integracji trzech zbiorów danych, uwzględniających wartości przemieszczeń określonych na podstawie metody PSInSAR w lokalizacjach, w których stacje GNSS wykazywały prawdopodobnie ruchy własne zaproponowano model współczesnych pionowych ruchów skorupy ziemskiej dla Polski.

3. Ocena merytoryczna

Przedmiotem rozprawy doktorskiej Pana mgra inż. Bartosza Naumowicza jest opracowanie i weryfikacja metodyki integracji różnych zbiorów danych do opracowania aktualnego modelu względnych ruchów pionowych skorupy ziemskiej z uwzględnieniem potencjalnego wpływu czynników lokalnych, takich jak np. górnictwo czy pobór wód podziemnych.

Uważam, że temat podjęty przez Autora jest aktualny, ważny a równocześnie trudny. Wyznaczanie i analiza pionowych ruchów skorupy ziemskiej stanowią jeden z kluczowych elementów współczesnych badań geodezyjnych i geofizycznych. Wiedza o ruchach pionowych skorupy ziemskiej jest wykorzystywana i niezbędna do wyjaśnienia procesów zachodzących na powierzchni, jak i wewnątrz Ziemi. Obserwacje i interpretacja pionowych ruchów skorupy ziemskiej i powierzchni ziemi, w połączeniu z innymi zjawiskami, pozwalają na lepsze zrozumienie zachodzących w litosferze procesów, w tym także ich wykorzystanie w innych dziedzinach, np. zagospodarowaniu przestrzennym, hydrogeologii, badaniach zmian klimatu i wielu innych. Rozwój metod satelitarnych obserwacji powierzchni Ziemi, w szczególności

satelitarnej interferometrii radarowej, stanowi istotny kierunek rozwoju możliwości wyznaczania przemieszczeń a jednocześnie rodzi szereg trudności w ich wykorzystaniu do obserwacji pionowych ruchów skorupy ziemskiej. Wynikają one m.in. z charakterystyki różnych technik przetwarzania danych InSAR oraz konieczności ich integracji z tradycyjnie stosowanymi „punktowymi" metodami takimi jak niwelacja precyzyjna i obserwacje z wykorzystaniem stacji GNSS. W tym znaczeniu zagadnienie badawcze podjęte przez Doktoranta stanowi cenny wkład do aktualnego stanu wiedzy w zakresie analizy pionowych ruchów skorupy ziemskiej.

Głównym celem badań określonym w rozprawie jest pozyskanie aktualnej wiedzy na temat względnych ruchów pionowych skorupy ziemskiej w Polsce. Doktorant założył, że jest to możliwe poprzez użycie i integrację różnych zbiorów danych, geodezyjnych i satelitarnych zarejestrowanych w różnych okresach.

Zaproponowana i opracowana w ramach metodyka obejmowała 7 zadań badawczych odpowiadających 4 celom szczegółowym, tj.

1. Zbadanie możliwości wykorzystania danych opracowanych technikę różnicowej satelitarnej interferometrii radarowej (DInSAR) do wyznaczenia ruchów pionowych skorupy ziemskiej;
2. Obliczenie absolutnych ruchów pionowych skorupy ziemskiej na podstawie różnych metod wyznaczania prędkości z szeregów czasowych GNSS;
3. Zbadanie możliwości integracji pionowych ruchów skorupy ziemskiej opracowanych na podstawie dwóch niezależnych zestawów danych (niwelacja i dane GNSS PPP) z użyciem metody wyrównania sieci (metoda nieliniowa) i transformacji matematycznej;
4. Zbadanie możliwości wyznaczenia współczesnych, względnych ruchów pionowych skorupy ziemskiej, opartych na danych z trzech źródeł: pomiarów GNSS (ASG-EUPOS), podwójnej niwelacji precyzyjnej oraz produktów EGMS.

Ich wyniki przedstawiono w publikacjach stanowiących cykl, a efektem końcowym jest propozycja hybrydowego modelu współczesnych pionowych ruchów skorupy ziemskiej.

Wyniki oceny przydatności techniki różnicowej satelitarnej interferometrii radarowej do wyznaczenia pionowych ruchów skorupy ziemskiej, przedstawione w pierwszej publikacji [P1] można traktować jako prace wstępne. Ze względu na istotne różnice w metodach DinSAR i GNSS właściwie nie można było spodziewać się innego rezultatu. Przeprowadzone badania mają jednak istotny walor poznawczy.

Obliczenie absolutnych ruchów pionowych skorupy ziemskiej w oparciu o rozwiązanie PPP (ang. *Precise Point Positiong*) na podstawie danych ze stacji GNSS dla okresu około dekady (2011-2021) pozwoliło Doktorantowi na ich określenie dla obszaru Polski w zakresie ±1 mm/rok. Przeprowadzone badania stanowią kontynuację i rozszerzenie prac prowadzonych przez Promotora (K. Kowalczyk & Bogusz, 2017) i kontynuowanych przez Łyszkowicza (2021). Uzyskał zgodność wyników dla czterech testowanych, wybranych na podstawie analizy literatury, strategii obliczeniowych. Cenne jest porównanie otrzymanych wyników z wcześniejszymi pracami. Istotnym osiągnięciem jest wykazanie, że 20 stacji charakteryzuje

się zmianami, które nie odzwierciedlają ruchu skorupy ziemskiej, a jedynie ruch powierzchni Ziemi lub ruch własny. Doktorant wiąże to z wpływem czynników o charakterze geologiczno-górniczym i hydrogeologicznym (lokalizacja złóż kopalin i ośrodków górniczych oraz głównych zbiorników wód podziemnych). Analiza ta ma jednak charakter jakościowy i stanowi interesujący kierunek do dalszych badań np. z zastosowaniem metod statystyki (regresji) przestrzennej czy grupowania, których wyniki mogłyby dostarczyć dowodów ilościowych.

Kolejny, logiczny etap badań, to analiza i selekcja metod integracji danych niwelacyjnych i GNSS oraz ocena wpływu położenia punktów dostosowania na wynik integracji tych danych. Obliczenia obejmowały wyrównanie sieci metodą najmniejszych kwadratów i transformacje sieci z wykorzystaniem metod izometrycznej, konforemnej oraz afinicznej, z zastosowaniem, jak i bez zastosowania poprawki Hausbrandta. Jako punkty wspólne wykorzystano tzw. punkty pseudowęzłowe, tj. lokalizacje zidentyfikowane jako wspólne w obu sieciach. Ich wagi określono zgodnie z założeniami teorii sieci bezskalowych. W wyniku przeprowadzonych analiz Doktorant dowiódł, że (1) obie testowane metody, tj. metoda nieliniowa i transformacji matematycznej mogą być stosowane do opracowania modelu hybrydowego, (2) zmniejszenie liczby punktów traktowanych jako wspólne (z 50 do 11) oraz ich nierównomierne rozmieszczenie na obszarze kraju nie wpływa istotnie na otrzymane dokładności. Zauważył także, że na największe różnice wystąpiły na stacjach zidentyfikowanych jako posiadające charakterystyki wartości odstających.

W rezultacie opisanych wyżej badań, w ostatnim etapie zaproponował metodę opracowania modelu współczesnych ruchów pionowych skorupy ziemskiej z użyciem danych hybrydowych, tj. obejmujących wyniki pomiarów niwelacyjnych, obserwacji GNSS na stacjach ASG-EUPOS uzupełnionych ruchami określonymi dla sąsiedztwa wybranych stacji, które wykazywały ruchy pionowe odmienne od ogólnych trendów, na podstawie produktów EGMS. Została ona poprzedzona określeniem sąsiedztwa na podstawie statystycznej analizy wyników dla odległości od 0.1 km do 10 km oraz analizą zależności zarejestrowanych ruchów pionowych stacji GNSS i wyznaczonych na podstawie produktów EGMS statystyk opisowych (mediana).

Opracowany końcowy hybrydowy model jest najbardziej aktualną i kompletną reprezentacją współczesnych względnych ruchów skorupy ziemskiej dla obszaru Polski. Zaproponowane podejście ma cechy rozwiązania uniwersalnego, które może być dostosowane do innych zbiorów danych, w tym nie tylko dla obszaru Polski. W efekcie Doktorant wniósł wkład w rozwój metod wyznaczania pionowych ruchów skorupy ziemskiej, dowodząc skuteczności rozwiązań hybrydowych

Oceniając poprawność metodyki, wyników i wniosków uważam, że przeprowadzone przez Doktoranta analizy zostały przeprowadzone prawidłowo, z zachowaniem rzetelności naukowej. Otrzymane wyniki są wiarygodne, a zastosowane procedury generalnie pozwalają na odtworzenie badań. Interpretacja rezultatów w kontekście analizowanego zjawiska, pionowych ruchów skorupy ziemskiej została przeprowadzona poprawnie. Wnioski są logiczną konsekwencją przeprowadzonych analiz i wynikają z uzyskanych rezultatów. Co istotne Doktorant wykazał się umiejętnością krytycznego spojrzenia na otrzymane wyniki. Istotne są także sformułowane w rozprawie kierunki dalszych badań.

4. Komentarze i uwagi do rozprawy

Po wnikliwej analizie autoreferatu oraz artykułów przygotowałem poniższe uwagi i pytania dotyczące treści rozprawy, które chciałbym przedyskutować z Doktorantem.

1. Czy, a jeśli tak jaki wpływ, zdaniem Doktoranta, mogą mieć różne okresy obserwacji charakteryzujące wykorzystane zbiory danych pomiarowych naziemnych i satelitarnych na uzyskane wyniki?

2. Jakie znaczenie, może mieć niepełna detekcja składowej północ–południe (N–S) wektora przemieszczeń wyznaczanego metodą PS InSARdla dla uzyskanych wyników?

3. Jakie podejście można zastosować do statystycznej analizy związku pomiędzy ruchami pionowymi rejestrowanymi na stacjach GNSS a czynnikami antropogenicznymi, takimi jak eksploatacja surowców, wód podziemnych jak również czynników związanych ze zmianą klimatu?

4. Na podstawie jakich kryteriów wybrano metodę interpolacji opartą na lokalnym wielomianie? Czy analizowano możliwość zastosowania innych metod interpolacji, w tym uwzględniających zależność przestrzenną?

5. Czy dekompozycja danych EGMS L2a przeprowadzona według procedury stosowanej do opracowania danych EGMS L3 uwzględniała kalibrację GNSS?

6. Jak Doktorant ocenia, w kontekście badań pionowych ruchów skorupy ziemskiej, zasadność modernizacji aktywnej sieci geodezyjnej polegającej na integracji pomiarów GNSS z techniką PS InSAR poprzez instalację reflektorów narożnych?

5. Ocena formalna

Struktura opisowej części rozprawy doktorskiej, jest poprawna i zgodna z przyjętymi standardami akademickimi. Układ pracy jest spójny, a kolejność rozdziałów i ich treść logiczne. Styl pisania Doktoranta jest dobry i charakteryzuje się generalnie jasnością i precyzją wypowiedzi. W tekście dostrzegłem niewielkie uchybienia stylistyczne i redakcyjne. Nie mają one znaczenia z punktu widzenia oceny merytorycznej i nie wpływają na ogólną wartość pracy. Poniżej przytaczam kilka wybranych jako wskazówki dla Autora,

- we „Wstępie" przydatna byłaby mapa przedstawiająca przestrzenne rozmieszczenie istotnych ośrodków górnictwa w relacji do położenia stacji GNSS i linii niwelacyjnych,
- brak logicznej ciągłości pomiędzy ostatnim akapitem na stronie 11 a pierwszym akapitem na stronie 12,
- brak końca zdania (przedostatnie zdanie na stronie 12).

Zwróciłbym jeszcze uwagę na nieco ograniczony i rozproszony przegląd aktualnego stanu wiedzy, którego elementy znajdują się w pierwszym rozdziale oraz częściowo w publikacjach. Taka sytuacja wynika z faktu, że cykl publikacji nie obejmuje pracy o charakterze przeglądowym. Doktorant nie zdecydował się na zdefiniowanie tezy pracy, wskazując bezpośrednio na 5 hipotez badawczych. Można ją jednak odtworzyć z treści wprowadzenia.

Podsumowanie i ocena końcowa

Rozwiązanie podjętego przez Doktoranta zagadnienia badawczego traktuję jako kompleksowe podejście do wyznaczania współczesnych ruchów skorupy ziemskiej i monitorowania geodynamiki przy użyciu integracji różnych, komplementarnych, zbiorów danych. Do realizacji celu rozprawy, a także potwierdzenia postawionych hipotez badawczych, Doktorant musiał wykazać się bardzo dobrą znajomością problematyki geodezji wyższej i satelitarnej oraz satelitarnej interferometrii radarowej, a także szerszego kontekstu procesów geodynamicznych. Należy podkreślić, że recenzowana praca świadczy o bardzo dobrej orientacji Autora w aktualnym stanie badań światowych oraz umiejętności krytycznej analizy stosowanych metod.

Na podstawie szczegółowej analizy przedstawionej mi do recenzji rozprawy doktorskiej pt. „Wyznaczenie ruchów pionowych skorupy ziemskiej na obszarze Polski przy użyciu różnych zbiorów danych" autorstwa mgra inż. Bartosza Naumowicza uważam, że Doktorant:

- wykazał się bardzo dobrym poziomem wiedzy teoretycznej i praktycznej w zakresie dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport, ze szczególnym uwzględnieniem geodezji satelitarnej, teledetekcji satelitarnej i geoinformatyki,
- potrafi samodzielnie formułować nowe problemy badawcze oraz planować i realizować kompleksowe i złożone zadania badawcze,
- posiada umiejętność wykorzystania różnych źródeł danych i narzędzi obliczeniowych do rozwiązywania zadań badawczych,
- kompleksowo i jednoznacznie zrealizował cele rozprawy doktorskiej, której wyniki stanowią istotne walory naukowe i przyczyniły się do rozwoju metodyki obserwacji i analizy współczesnej dynamiki skorupy ziemskiej.

W ten sposób Doktorant dowiódł, że posiada solidne i odpowiednie przygotowanie do samodzielnego prowadzenia badań naukowych.

Biorąc pod uwagę przedstawione wyżej aspekty oryginalności pracy oraz samodzielność w prowadzeniu badań naukowych uważam, że rozprawa doktorska Pana mgra inż. Bartosza Naumowicza pt. „*Wyznaczenie ruchów pionowych skorupy ziemskiej na obszarze Polski przy użyciu różnych zbiorów danych* " spełnia wymagania Ustawy z dnia 20 lipca 2018 Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2024, poz. 1571 z późn. zm.). Składam wniosek do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie o jej przyjęcie i dopuszczenie mgra inż. Bartosza Naumowicza do publicznej obrony.



/podpisano elektronicznie/
prof. dr hab. inż. Jan Blachowski