Warszawa, 26 stycznia 2026 r.

dr hab. inż. Anna Kłos, prof. WAT
Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji
Wojskowa Akademia Techniczna im. J. Dąbrowskiego
ul. gen. S. Kaliskiego 2
00-908 Warszawa

RECENZJA

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

Recenzja została przygotowana w odpowiedzi na uchwałę nr 48 z dnia 14 października 2025 r. Rady Naukowej Dyscypliny *Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport* Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie.

1. Charakterystyka i ocena rozprawy doktorskiej

Ruchy pionowe skorupy ziemskiej są obecnie przedmiotem badań w geodezji, geodynamice i geofizyce. Stanowią także kluczowy element podczas tworzenia układów odniesienia, a ich zastosowanie jest coraz szersze. Prędkości te są wykorzystywane na przykład w monitorowaniu tempa osiadania wybrzeży oceanicznych, monitorowaniu osuwisk czy terenów górniczych, a także coraz częściej wykorzystuje się je w szybko rozwijającym się obszarze geodezji, zwanym hydrogeodezją, w którym świadczą o długoterminowych zmianach zasobów wód kontynentalnych, lub ich komponentach, jak na przykład wody gruntowe. W związku z tym, ich wyznaczenie z dużą wiarygodnością i rozdzielczością przestrzenną, a także dokładne zdefiniowanie ich przyczyn, jest tematem wielu badań.

Ruchy pionowe skorupy ziemskiej można wyznaczać na kilka sposobów – wykorzystując zmiany wysokości punktów wyznaczane metodą klasycznej niwelacji, czy technikami satelitarnymi, jak Globalne Systemy Nawigacji Satelitarnej (GNSS, ang. Global Navigation Satellite Systems) i satelitarna interferometria radarowa (InSAR, ang. Interferometric Synthetic Aperture Radar). Każda z tych technik ma swoje wady i zalety, a ich integracja pozwala na uzyskanie wiarygodnych, wysokorozdzielczych ruchów pionowych skorupy ziemskiej. W związku z powyższym, przedstawiona rozprawa doktorska opisuje istotne i aktualne zagadnienie, a także nowatorskie łączenie ruchów pionowych wyznaczonych różnymi technikami w jeden, spójny model stworzony dla obszaru Polski. Celem nadrzędnym rozprawy doktorskiej jest „zdobycie wiedzy na temat względnych ruchów pionowych skorupy ziemskiej w Polsce”, który to Autor realizuje poprzez cztery, dokładnie zdefiniowane na początku rozprawy, cele szczegółowe. Oprócz nich, Doktorant definiuje również pięć hipotez badawczych, których dowodzi w kolejnych krokach rozprawy.

Rozprawa doktorska mgra inż. Bartosza Naumowicza stanowi cykl czterech publikacji powiązanych ze sobą tematycznie, w których Doktorant jest pierwszym autorem. Artykuły zostały opublikowane w latach 2022-2025. Poza oryginalnymi treściami ww. publikacji, treść rozprawy doktorskiej stanowi również wykaz publikacji naukowych wchodzących w skład cyklu, z ich streszczeniami w języku polskim oraz przewodnik zawierający wykaz skrótów, streszczenia w języku polskim i angielskim, obszerny wstęp, zdefiniowanie celu, zakresu badań i hipotez badawczych, opis metodyki badań, opis wyników badań, dyskusję otrzymanych wyników, podsumowanie i wnioski. Literatura zawiera 89 pozycji. Doktorant wykorzystuje pomiary niwelacji precyzyjnej, dane GNSS ze

stacji permanentnych systemu ASG-EUPOS, oraz dane z satelitarnej interferometrii radarowej InSAR do wyznaczenia pionowych ruchów skorupy ziemskiej w Polsce, które definiuje wykorzystując dwa pojęcia: pionowe ruchy skorupy ziemskiej (VCM, ang. vertical crustal motion) oraz pionowe ruchy powierzchni Ziemi (VLM, ang. vertical land motion). Doktorant dokładnie opisuje każdy z wykorzystanych zbiorów danych, a następnie na ich podstawie wyznacza wspomniane ruchy pionowe, definiując wady i zalety każdego z podejść. Następnie Doktorant podejmuje się integracji trzech typów danych ze sobą w celu stworzenia spójnego modelu ruchów pionowych dla obszaru Polski, dokładnie omawiając zagadnienie transformacji wartości bezwzględnych do wartości względnych ruchów pionowych oraz metody interpolacji wartości punktowych do ciągłego modelu ruchów pionowych. Dokonuje również porównania otrzymanych wartości z zewnętrznymi wartościami, jak na przykład wartości prędkości stacji permanentnych GPS (ang. Global Positioning System) wyznaczane przez Laboratorium NGL (ang. Nevada Geodetic Laboratory), czy informacjami o warunkach geologicznych, tektonicznych, hydrologicznych i mineralnych, podejmując się wyjaśnienia i interpretacji otrzymanych wartości ruchów pionowych.

Publikacja 1 (oznaczona jako P1) została opublikowana w 2022 roku w czasopiśmie „Open Geosciences" (IF=2.0, 40 pkt. MNiSW, oba parametry podaję na rok opublikowania pracy). Doktorant w tej pracy podjął się próby oceny przydatności wykorzystania danych InSAR do wyznaczenia ruchów pionowych skorupy ziemskiej (VCM) dla obszaru Polski. Wykorzystał do tego dane z misji Sentinel-1A i 1B z 2020 roku z orbity wstępującej i zstępującej, rejestrowane w odstępie 12, 24 i 336 dni pomiędzy sobą. Wartości ruchów pionowych wyznaczył dla lokalizacji czterech stacji permanentnych GNSS z obszaru Polski, a mianowicie stacji w Borowej Górze (BOGI), Borowcu (BOR1), Lamkówku (LAMA) i Józefosławiu (JOZE). Dla każdej z lokalizacji zdefiniował jej otoczenie w kontekście urbanizacji, geologii, hydrologii oraz pokrycia terenu, z uwzględnieniem aktywności górniczej. Wartości ruchów pionowych skorupy ziemskiej wyznaczone techniką InSAR porównał z wartościami trendów szeregów zmian pionowych pozycji stacji GNSS, interpretowanych jako ruchy pionowe skorupy ziemskiej. Wartości te otrzymał na podstawie samodzielnie opracowanych danych GNSS dla okresu 2010-2021 w oprogramowaniu GipsyX oraz na podstawie wartości uzyskanych z laboratorium NGL, dla okresu 1994-2022. Wyniki przedstawił w postaci map interferogramów oraz tabelarycznie. Publikację podsumował stwierdzeniem, że uzyskane wartości ruchów pionowych skorupy ziemskiej są zbieżne pomiędzy technikami InSAR i GNSS, a dane InSAR mogą być wykorzystywane do rozwijania modeli ruchów pionowych skorupy ziemskiej na obszarze Polski.

W powyższym artykule Doktorant był odpowiedzialny za opracowanie koncepcji badań, częściowe opracowanie metodyki badań, wykonanie analiz oraz wizualizację wyników, opracowanie i interpretację wyników oraz przygotowanie wstępnej i ostatecznej wersji manuskryptu.

Publikacja 2 (oznaczona jako P2) została wydana w 2024 roku w czasopiśmie „Earth and Space Science" (IF=2.6, 100 pkt. MNiSW). Doktorant wykorzystał w niej dane satelitarne rejestrowane na stu stacjach systemu ASG-EUPOS w okresie 2011-2021, a następnie samodzielnie je opracował w oprogramowaniu GipsyX, wykorzystując rozwiązanie PPP (ang. Precise Point Positioning). Otrzymał w ten sposób szeregi czasowe pionowych zmian współrzędnych stacji w układzie ITRF2014, na podstawie których wyznaczył ich prędkości pionowe (trendy szeregów), interpretowane jako ruchy pionowe skorupy ziemskiej (VCM). W artykule pojawia się również pojęcie pionowych ruchów lądu (VLM), jednak (niestety) różnica pomiędzy tymi dwoma pojęciami nie została wyjaśniona. Nie wyjaśniono również jak rozróżnia się VCM od VLM rejestrowanych za pomocą zmian współrzędnych stacji GNSS. Doktorant wyznaczył pionowe ruchy skorupy ziemskiej wykorzystując do tego cztery niezależne od siebie metody. Pierwszą z nich była metoda najmniejszych kwadratów, zawarta w module „staFit.py" oprogramowania GipsyX. Drugą z nich była metoda VSED (ang. Vertical Surface Elevation Detection), polegająca na wyznaczeniu skoków szeregów algorytmem Grubbsa, a następnie wyznaczeniu trendu szeregu. Trzecią metodą było wykorzystanie oprogramowania Hector, szeroko wykorzystywanego w geodezji w analizach szeregów czasowych. Czwartą metodą było uśrednienie prędkości z trzech wspomnianych metod, nadając im wagi na podstawie wyznaczonych błędów

prędkości. Z literatury wiadomo, że wyznaczone wartości prędkości, jak i ich błędów, są silnie uzależnione od parametrów modeli deterministycznego i stochastycznego założonych podczas analizy szeregów czasowych zmian współrzędnych. Nie jest jednak (niestety) jasne jakich modeli Doktorant używa podczas analiz każdą ze wspomnianych metod. Doktorant następnie analizuje wyznaczone pionowe ruchy skorupy ziemskiej i porównuje je z tektoniką, geologią, hydrologią regionu i lokalizacją zasobów mineralnych, podsumowując, że wyznaczony model ruchów pionowych koresponduje z warunkami geologicznymi i tektonicznymi regionu.

Doktorant w publikacji 2 był odpowiedzialny za opracowanie koncepcji badań, opracowanie danych, częściowe opracowanie metodyki badań, wykonanie analiz, wizualizację, opracowanie i interpretację wyników badań, przygotowanie wstępnej i ostatecznej wersji manuskryptu.

Publikacja 3 (oznaczona jako P3) została opublikowana w 2025 roku w czasopiśmie „Applied Sciences" (IF=2.5, 100 pkt. MNiSW). Doktorant wykorzystał w niej względne ruchy pionowe skorupy ziemskiej wyznaczone podczas 3. i 4. kampanii niwelacyjnej oraz bezwzględne ruchy pionowe skorupy ziemskiej wyznaczone z szeregów czasowych zmian współrzędnych stacji ASG-EUPOS, wyznaczone na podstawie opracowania danych satelitarnych GNSS w oprogramowaniu GipsyX w trybie PPP. Do transformacji ruchów bezwzględnych do wartości względnych wykorzystał transformację izometryczną, konforemną i afiniczną, z poprawką Hausbrandta i bez niej. W wyniku przeprowadzonych badań i analiz, stwierdził, że najlepszą metodą transformacji jest 12-parametrowa transformacja afiniczna oraz że integracja ruchów pionowych z kampanii niwelacyjnej oraz tych wyznaczonych na podstawie obserwacji GNSS daje spójny, wiarygodny model względnych ruchów pionowych skorupy ziemskiej na obszarze Polski.

Doktorant w publikacji P3 był odpowiedzialny za opracowanie koncepcji badań, częściowe opracowanie metodyki badań, wykonanie analiz, wizualizację, opracowanie i interpretację wyników badań, przygotowanie wstępnej i ostatecznej koncepcji manuskryptu.

Publikacja 4 (oznaczona jako P4) została opublikowana w 2025 roku w czasopiśmie „Geodynamics" (IF=0.3, 20 pkt. MNiSW). W publikacji Doktorant wykorzystał bezwzględne ruchy pionowe skorupy ziemskiej wyznaczone techniką GNSS i InSAR oraz względne ruchy pionowe wyznaczone metodą podwójnej niwelacji precyzyjnej do stworzenia zintegrowanego modelu względnych ruchów pionowych na obszarze Polski. Do transformacji ruchów bezwzględnych do ruchów względnych wykorzystał transformację afiniczną. Przed wykonaniem transformacji, Doktorant wykonał analizę porównawczą wartości trendów pionowych wyznaczonych techniką GNSS i InSAR dla stacji permanentnych systemu ASG-EUPOS, tworząc wokół stacji „mikroobszary". Na podstawie przeprowadzonych analiz, stwierdził, że najbardziej reprezentatywnym mikroobszarem wokół stacji GNSS jest okrąg o promieniu 0.3 km, dla którego wyznaczył medianę ruchów pionowych techniką InSAR, zastępując w ten sposób odstające wartości ruchów pionowych z techniki GNSS. Ostateczny, ciągły model względnych ruchów pionowych na obszarze Polski otrzymał poprzez interpolację punktowych ruchów względnych metodą wielomianową.

Doktorant w publikacji P4 był odpowiedzialny za opracowanie koncepcji badań, częściowe opracowanie metodyki, wykonanie analiz, a następnie wizualizację, opracowanie i interpretację wyników badań, a także przygotowanie wstępnej i ostatecznej wersji manuskryptu.

Doktorant w przedstawionej rozprawie doktorskiej podjął się ważnego tematu integracji ruchów pionowych skorupy ziemskiej wyznaczonych różnymi technikami geodezyjnymi do jednego, spójnego, ciągłego modelu ruchów pionowych. Zagadnienie integracji technik geodezyjnych jest niezwykle istotne, zarówno w temacie analiz ruchów pionowych, jak i innych analiz geodezyjnych, ponieważ pozwala na eliminację słabości każdej z nich, wykorzystując przy tym ich zalety, czy mocne strony. W ten sposób można otrzymać model ruchów pionowych skorupy ziemskiej, który cechuje się wysoką rozdzielczością przestrzenną i wysoką wiarygodnością. Doktorant w przedstawionej rozprawie doktorskiej pokazał jak wiarygodnie opracowywać dane z trzech, niezależnych od siebie technik

geodezyjnych, jak je interpretować, analizować i porównywać z danymi zewnętrznymi, jak je opracowywać w celu stworzenia spójnego odniesienia, a w końcu integrować do stworzenia ciągłego modelu ruchów pionowych. W tym celu przeprowadził szereg badań i analiz, które udowadniają, że potrafi samodzielnie prowadzić badania naukowe. Metodyka wykonania badań jest prawidłowa, zgodna ze współczesnymi trendami w nauce. Praca przygotowana jest rzeczowo, aczkolwiek sposób przedstawienia i opisu poszczególnych publikacji w przygotowanym przewodniku, mógłby być w mojej ocenie nieco lepszy. Ocenie podlega bowiem przewodnik po publikacjach, z którego często ciężko jest wnioskować o przeprowadzonych analizach, a opisy poszczególnych publikacji, poprzeplatane pomiędzy sobą, utrudniają zrozumienie głównego przekazu rozprawy doktorskiej. Autor nie oszczędza wykorzystania kolokwializmów, dużych skrótów myślowych, czy tłumaczeń wprost z angielskiego, jak „rozpakowanie fazy", „promień bufora", „Glacjalne Dostosowanie Izostatyczne (GIA)", „baza/podstawa czasowa różnic między SAR", i inne. Część załączonych rysunków i tabel jest w języku angielskim, część w języku polskim. W niektórych zdaniach brakuje czasowników.

2. Uwagi i pytania

Chciałabym, aby Doktorant podczas publicznej obrony rozprawy doktorskiej odniósł się do następujących kwestii:

1) Doktorant w przedstawionej rozprawie używa skrótów VCM i VLM, oznaczających odpowiednio pionowe ruchy skorupy ziemskiej oraz pionowe ruchy lądu, jednak ich nie definiuje. Proszę o przedstawienie definicji obu pojęć oraz ich różnic i odniesienie się do kwestii, który z ruchów jest wyznaczany za pomocą wykorzystywanych przez Doktoranta zbiorów danych (GNSS, InSAR oraz niwelacja precyzyjna) i jak to wyznaczyć.
2) Czy Doktorant przeprowadzał testy stabilności prędkości stacji permanentnych dla obszaru Polski, to znaczy, jak długość wykorzystanych szeregów czasowych, czy epoki, w których te szeregi były rejestrowane, wpłynie na wiarygodność wyznaczanych wartości?
3) W publikacji 1 (P1), Doktorant porównuje wyznaczone przez siebie prędkości pionowe dla 4 stacji permanentnych GNSS z prędkościami wyznaczonymi przez laboratorium NGL, uzyskując dość rozbieżne wyniki. Jak sam wspomina, prędkości te zostały wyznaczone dla niekorespondujących ze sobą długości szeregów czasowych. Proszę o wyjaśnienie jak prędkości te zmieniłyby się, gdyby Doktorant użył tych samych (identycznych) długości szeregów czasowych i czy ich zgodność byłaby większa.
4) W opisie publikacji 1 (P1), str. 39 przedstawionej rozprawy, Doktorant opisuje prędkości pionowe, a następnie porównuje „przemieszczenia pionowe" uzyskane z technik InSAR i GNSS. Proszę o informację, czy porównywane wartości to wspomniane „przemieszczenia pionowe", czy jednak prędkości pionowe, opisywane wcześniej.
5) Proszę o wyjaśnienie jak Doktorant wyznaczył błędy prędkości przedstawione w tabeli 3.
6) Proszę o wyjaśnienie jakie modele deterministyczne i stochastyczne były zakładane podczas analiz szeregów czasowych przemieszczeń stacji GNSS w publikacji P2 metodami GipsyX, VSED oraz Hector, na podstawie których wyznaczono prędkości przedstawione w opisie publikacji na rys. 13.
7) W opisie publikacji P2 Doktorant stwierdza: „Analiza przestrzenna wykazała, że dla 20 stacji, prędkości nie odzwierciedlają ruchu skorupy ziemskiej, a jedynie ruch powierzchni Ziemi lub własny". Proszę o przedstawienie uzasadnienia (strona 41 rozprawy doktorskiej).
8) W publikacji P2, Tabela 1, Doktorant przedstawia prędkości wyznaczone 4 technikami oraz ich odchylenia standardowe. Proszę o informację, czy są to rzeczywiście odchylenia standardowe szeregów, czy może jednak błędy wyznaczonych prędkości?
9) Proszę o przedstawienie analizy geologiczno-hydrologicznej, która wykazała, że stacje KROL i LAMA charakteryzują się większymi ruchami pionowymi niż pozostała część regionu (str. 41 przedstawionej rozprawy doktorskiej).

10) W publikacji P2, tabela 6, Doktorant przedstawia potencjalne czynniki wpływające na prędkości pionowe wyznaczane na konkretnych stacjach GNSS. Jednym z czynników jest „aglomeracja". Proszę o informację według jakich kryteriów Doktorant klasyfikował stacje oraz dlaczego do czynników „aglomeracja" nie zaliczył stacji położonych we Wrocławiu (WROC), Katowicach (KATO), czy Poznaniu (POZN)?
11) Doktorant deklaruje, że wyznacza przemieszczenia stacji w najnowszym układzie odniesienia ITRF2014, podczas, gdy takim układem jest ITRF2020. Proszę o sprostowanie.
12) Doktorant wykorzystuje przemieszczenia wyznaczone techniką InSAR, pozyskane z serwisu EGMS i integruje je z przemieszczeniami wyznaczonymi techniką GNSS. Pierwsze przemieszczenia są wyznaczane w układzie ETRF2000. Niestety, nie udało mi się znaleźć informacji na temat układu, w którym Doktorant wyznacza przemieszczenia z GNSS. Czy jest to ITRF2014, jak w poprzednich publikacjach? Proszę o informację w jakim układzie są wyznaczone przemieszczenia oraz ewentualne uzupełnienie dotyczące transformacji do układu ETRF2000.
13) Czy Doktorant wyznaczał wartości GIA na obszarze Polski? Jak wpłynęłyby one na wyznaczane pola prędkości pionowych?

3. Wnioski końcowe

Uważam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska, składająca się z cyklu 4 publikacji powiązanych ze sobą tematycznie, stanowi oryginalne rozwiązanie problemu badawczego dotyczącego wyznaczenia ruchów pionowych skorupy ziemskiej na obszarze Polski.

Doktorant udowodnił, że potrafi prowadzić badania naukowe, a ich wyniki analizować i interpretować. Biorąc pod uwagę powyższe, stwierdzam, że rozprawa doktorska mgra inż. Bartosza Naumowicza pt. „Wyznaczenie ruchów pionowych skorupy ziemskiej na obszarze Polski przy użyciu różnych zbiorów danych" odpowiada wymogom określonym w Art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce" (Dz.U. 2023 r. poz.742 z późn. zm.).

Wnioskuję do Rady Naukowej Dyscypliny *Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport* Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie o dopuszczenie mgra inż. Bartosza Naumowicza do publicznej obrony przedstawionej rozprawy doktorskiej.

Anna Kłos

Anna Kłos