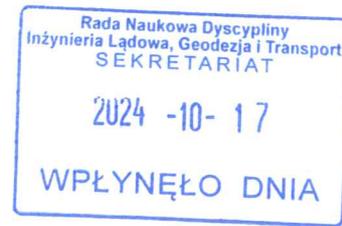


Warszawa, 14 października 2024 r.

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



## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgra inż. Viktora Szabó  
pt. „Analiza możliwości synergii obserwacji teledetekcyjnych z grawimetrycznymi oraz istotności czynników wpływających na obserwowane zmiany poziomu wód gruntowych rejestrowanych przez satelity GRACE i GRACE-FO”

Recenzja została przygotowana na prośbę Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny *Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport* Politechniki Warszawskiej, Pana dra hab. inż. Konrada Lewczuka, prof. uczelni, pismo nr WTBD.521.DR.112.2024 z dnia 20 sierpnia 2024 r.

### 1. Charakterystyka i ocena rozprawy doktorskiej

Misja grawimetryczna GRACE (ang. Gravity Recovery and Climate Experiment) zrewolucjonizowała pomiary globalnych zmian zasobów wodnych oraz udoskonaliła nasze zrozumienie cyklu hydrologicznego w systemie Ziemia. Naukowcy dzięki niej precyzyjnie skwantyfikowali topnienie lodowców na Grenlandii czy Antarktydzie, wysuszenie się Morza Kaspijskiego czy Morza Aralskiego, a także ocenili stopień ubytku wód gruntowych w skali globalnej. Ostatnie osiągnięcie jest niezmiernie ważne, zwłaszcza w kontekście postępujących zmian klimatycznych, które mogą doprowadzić w niedalekiej przyszłości do niedostępności wody pitnej dla ludności świata.

Misja GRACE dostarczała informacji o globalnych zmianach zasobów wodnych, potocznie nazywanych w niniejszej rozprawie wartościami TWS (ang. Total/Terrestrial Water Storage), w latach 2002-2017 z rozdzielczością czasową jednego miesiąca oraz przestrzenną około 3 stopni. Po ponad rocznej przerwie, wystartowała jej następczyni, misja GRACE Follow-On (GRACE-FO), która kontynuuje pomiary aż do dzisiaj. Zmiany wartości TWS, które są wyznaczone z obu misji, są sumą zmian mas zasobów wodnych w hydrosferze lądowej, określane poprzez sumę zmian mas jezior, rzek, zbiorników wodnych, lodu i śniegu oraz wód gruntowych i wilgotności gleby. Dwóm ostatnim składnikom poświęcona jest oceniana rozprawa doktorska.

Zmiany poziomu wód gruntowych są coraz powszechniej wyznaczone z obserwacji geodezyjnych, np. wykorzystując zmiany pola grawitacyjnego dostarczanego przez misję GRACE, opisane przez Doktoranta w ocenianej rozprawie doktorskiej. O ile misja GRACE ma już bardzo dobrze ugruntowaną pozycję w tego typu analizach, o tyle wyznaczenia z innych technik geodezyjnych są jeszcze w fazie badań. Wyznaczenia te stanowią dużą konkurencję do tradycyjnych metod in-situ, głównie ze względu na czasochłonność i kosztochłonność tychże. Poza tym, warto pomyśleć również o dostępności obserwacji. Zmiany poziomu wód gruntowych wyznaczone z obserwacji geodezyjnych możemy otrzymać już z kilkumiesięcznym opóźnieniem, co ma ogromny wpływ na analizy zmian bieżących. Znaczącym ograniczeniem obu misji GRACE jest jednak niewystarczająca rozdzielczość przestrzenna dostarczanych wartości TWS, zwłaszcza w kontekście analiz regionalnych i lokalnych. Z tego względu coraz powszechniej integruje się obserwacje GRACE z innymi technikami geodezyjnymi w celu uzyskania wysokorozdzielczych (czasowo i przestrzennie) zmian poziomu wód gruntowych.

W związku z powyższym, przedstawiona rozprawa doktorska opisuje istotne i aktualne zagadnienie wykrywania zmian poziomów wód gruntowych przez satelity GRACE i GRACE-FO, a także nowatorskie ich połączenie z obserwacjami teledetekcyjnymi wilgotności gleby. Autor stawia w rozprawie następującą tezę badawczą: „Istnieją uwarunkowania, dla których występuje duża zgodność rejestracji zmian zawartości wód przypowierzchniowych obserwowanych za pomocą mikrofalowych technik teledetekcyjnych w zestawieniu ze zmianami całkowitego ekwiwalentu wodnego obserwowanymi przez satelitarne misje grawimetryczne.”

Rozprawa doktorska mgra inż. Viktora Szabó stanowi cykl pięciu spójnych tematycznie artykułów opublikowanych w latach 2019-2024. Rozprawę doktorską, poza oryginalnymi treściami ww. publikacji, stanowi przewodnik zawierający streszczenia w języku polskim i angielskim, opis formy rozprawy doktorskiej, wstęp, opis podstaw teoretycznych, opis metodyki badań, syntetyczny opis wyników badań oraz podsumowanie. Literatura zawiera ponad 200 pozycji. Autor wykorzystuje dane dotyczące zmienności pola grawitacyjnego udostępniane w formie współczynników sferycznych harmonicznych przez różne (zagraniczne) centra obliczeniowe, które następnie przelicza na miesięczne zmiany wartości TWS. Testuje przy tym szereg metod filtracji przestrzennej oryginalnych danych, w celu usunięcia południkowych pasów wynikających z charakterystyki misji GRACE, a nazywanych „szumem”, i otrzymania spójnego obrazu zmian wartości TWS. Wartości te porównuje do naziemnych absolutnych pomiarów grawimetrycznych, co pozwala mu wskazać optymalny sposób filtracji danych GRACE. Następnie charakteryzuje dane dotyczące wilgotności gleby (ang. soil moisture, SM), pozyskiwane przez misję teledetekcyjną AMSR-E (ang. Advanced Microwave Scanning Radiometer) poprzez ich porównanie z wartościami TWS wyznaczanymi z obserwacji misji GRACE. Doktorant w końcu testuje różne metody uczenia maszynowego, aby ocenić przydatność wykorzystania zmiennych zawartych w modelu GLDAS oraz danych o wilgotności gleby SM do predykcji wartości TWS, również w przerwie pomiędzy misjami GRACE i GRACE-FO.

Publikacja 1 wydana została w 2019 roku w czasopiśmie „Journal of Applied Geodesy” (brak IF, 100 pkt. MNiSW, oba wskaźniki podane na rok publikacji pracy). Jest to praca wieloautorska, a Doktorant jest ostatnim autorem z 10% udziałem. Według oświadczenia zawartego w przedstawionej rozprawie, Doktorant odpowiadał jedynie za pobranie oraz opracowanie danych GRACE. Jest to czynność czysto techniczna, a nie naukowa, a więc w mojej ocenie niepodlegająca recenzji rozprawy doktorskiej. W związku z powyższym, pomijam ocenę wspomnianej publikacji.

Publikacja 2 wydana została w 2020 roku w czasopiśmie „Artificial Satellites: Journal of Planetary Geodesy” (brak IF, 40 pkt. MNiSW, oba wskaźniki podane na rok publikacji pracy). W publikacji Doktorant podjął się porównania różnych rodzajów filtracji danych GRACE w celu usunięcia południkowych pasów, zwanych szumem. Wykorzystał do tego dwie kolejne wersje danych GRACE, a mianowicie RL05 oraz RL06 (skrót RL od angielskiego słowa ‘release’, czyli wydanie), udostępnianych przez trzy centra analiz: Centrum Badań Kosmicznych w Austin, USA (Center for Space Research, CSR), Niemieckie Centrum Badawcze ds. Nauk o Ziemi GFZ (Deutsches GeoForschungsZentrum, GFZ) oraz Laboratorium Napędu Odrzutowego, JPL, NASA, USA (Jet Propulsion Laboratory, JPL). Dane poziomu 2, a więc współczynniki sferycznych harmonicznych filtruje wykorzystując filtr izotropowy Gaussa o różnym promieniu uśredniania przestrzennego, a także filtry nieizotropowe, opublikowane w 2007 r. przez prof. Jürgena Kusche, nazwane ‘DDK’, które wykorzystują założenie a-priori dotyczące budżetu błędów, a skutkujące różnym przestrzennym uśrednieniem. Doktorant następnie porównuje wartości różnic zaburzenia grawimetrycznego pomiędzy przefiltrowanymi danymi GRACE oraz absolutnymi pomiarami grawimetrycznymi wykonanymi grawimetrem FG5 nr 230 w latach 2002-2016 w Obserwatorium Astronomiczno-Geodezyjnym w Józefosławiu (AGO JOZE). Autor konkluduje, że wybór strategii przetwarzania danych GRACE jest niezwykle istotny w kontekście porównania z pomiarami naziemnymi. Stwierdza również, że najlepszym filtrem izotropowym do ‘odszumiania’ danych GRACE jest filtr Gaussa o promieniu wygładzania równym 300 km, a najlepszym filtrem anizotropowym są filtry DDK oznaczone numerami od 3 do 6.

Udział Doktoranta w omawianym artykule wyniósł 80%. Według oświadczenia dołączonego do rozprawy doktorskiej był odpowiedzialny za przygotowanie danych, pracę nad koncepcją i metodyką badań, przeprosowanie i analizę rozwiązań, przegląd literatury, przygotowanie treści artykułu w języku polskim.

Publikacja 3 została opublikowana w 2023 roku w czasopiśmie „International Journal of Hydrology Science and Technology” (IF=0.900, 100 pkt. MEiN, oba wskaźniki podane na rok publikacji pracy). Doktorant wykorzystał w niej metodę bazującą na uczeniu maszynowym algorytmem XGBoost oraz dane z modelu GLDAS w wersji Noah do uzupełnienia rocznej przerwy w danych pomiędzy misjami GRACE i GRACE-FO. Wartości TWS były wyznaczane dwójako: podejściem czasowym i czasowo-przestrzennym. W pierwszym przypadku Autor podjął się rekonstrukcji wartości TWS w węzłach siatki. W drugim przypadku, rekonstruował wartości w zlewniach rzek. Wykorzystał do tego celu dane z 254 zlewni rzek na świecie. Dla każdej z tych zlewni użył wartości zawartych w modelu GLDAS, a mianowicie składowych TWS: wilgotności gleby i wody zawartej w śniegu oraz parametrów fizycznych, jak np. temperatury gruntu, jako predyktorów do wyznaczenia wartości TWS. Wartości te zostały następnie porównane z wartościami TWS wyznaczanymi przez GRACE, a ich efektywność oszacowana szeregiem statystyk. Doktorant podsumował, że metody uczenia maszynowego mogą być z powodzeniem wykorzystywane do rekonstrukcji sygnału TWS, co jest spójne z dotychczas opublikowanymi w tym zakresie pracami.

Publikacja 3 jest publikacją jednoautorską, udział Doktoranta wynosi 100%.

Publikacja 4 wydana została w 2023 roku w czasopiśmie „Artificial Satellites: Journal of Planetary Geodesy” (IF=0.700, 70 pkt. MEiN, oba wskaźniki podane na rok publikacji pracy). Doktorant porównuje w niej wartości TWS wyznaczone z misji GRACE z wartościami wilgotności gleby SM wyznaczonymi przez misję AMSR-E. Do tego celu, dane dotyczące wilgotności gleby z misji AMSR-E przelicza do rozdzielczości przestrzennej 0,5 stopnia i epok zgadzających się z epokami wartości TWS. Następnie dane poddaje analizie maksymalnej kowariancji i wyznacza składowe główne dla wartości TWS i wilgotności gleby SM. Wyniki porównuje do danych dotyczących pokrycia terenu pobranych z bazy danych o glebie (ang. Harmonized World Soil Database). Doktorant konkluduje, że (1) wykorzystanie obserwacji mikrofalowych jest ograniczone dla obszarów wiecznej zmarzliny, (2) uśrednianie sygnału na całe zlewnie rzek może powodować zbytne jego wygładzenie oraz (3) różnice pomiędzy wartościami TWS z GRACE a wilgotnością gleby SM z misji AMSR-E dla obszaru Europy wynikają z ‘ograniczeń glebowych’ i znacznej urbanizacji obszaru.

Udział Doktoranta w omawianym artykule wyniósł 85%. Doktorant był odpowiedzialny za przygotowanie koncepcji i metodyki badań, wykonanie przeglądu literatury, napisanie kodu umożliwiającego analizę rozwiązań, opracowanie danych, analizę wyników, dyskusję wyników i wnioski, przygotowanie oryginalnej wersji artykułu oraz korektę artykułu na podstawie otrzymanych recenzji.

Publikacja 5 wydana została w 2024 roku w czasopiśmie „Miscellanea Geographica – Regional Studies on Development” (IF=0.600, 100 pkt MNiSW, oba wskaźniki podane na rok publikacji pracy). Doktorant przeanalizował w niej skuteczność algorytmów uczenia maszynowego do modelowania wartości TWS. Wykorzystał do tego celu dane o wilgotności gleby dostarczane przez misję AMSR-E. Eksperyment obejmował okres 2002-2012, pokrywający się z działaniem misji GRACE. Jako dane wejściowe wykorzystał dane z lat 2002-2008, natomiast pozostałe lata posłużyły mu za zbiór testowy. Doktorant przetestował szereg metod uczenia maszynowego, a ich efektywność podsumował wielkościami statystycznymi. Doktorant konkluduje, że techniki uczenia maszynowego pozwalają na wiarygodne odtworzenie wartości  $\Delta TWS$  w skali globalnej. Jedynie obszary wiecznej zmarzliny oraz obszary intensywnej działalności rolniczej mogą nie być do końca wiarygodnie przewidywane.

Udział Doktoranta w omawianym artykule wynosi 80%. Doktorant był odpowiedzialny za przygotowanie koncepcji i metodyki badań, sporządzenie przeglądu literatury, napisanie kodu umożliwiającego analizę rozwiązań, opracowanie danych, analizę wyników, ich dyskusję oraz wysnucie wniosków.

Doktorant podjął się dyskusji naukowej niezwykle ważnego wśród geodetów tematu, a mianowicie łączenia (lub synergii) różnych rodzajów danych geodezyjnych w celu zwiększenia efektywności interpretacyjnych, poprzez zwiększenie ich wiarygodności. Doktorant łączy dane dotyczące wilgotności gleby SM, pochodzące z obserwacji teledetekcyjnych z danymi dotyczącymi wartości zmian zasobów wód kontynentalnych TWS, pochodzącymi z misji grawimetrycznych. Pokazuje, że dane z misji teledetekcyjnych mogą być z powodzeniem wykorzystane do predykcji zmian wartości TWS, wykorzystując metody uczenia maszynowego. Doktorant w swojej rozprawie zaadresował kilka istotnych kwestii. A mianowicie: (1) jak efektywnie filtrować dane GRACE w celu uzyskania spójnego i interpretowalnego obrazu zmian wartości TWS, (2) jak efektywnie uzupełnić przerwę obserwacyjną pomiędzy misjami grawimetrycznymi, jest to aktualne zarówno dla przerwy pomiędzy misjami GRACE i GRACE-FO, jak i przyszłymi przerwami pomiędzy dowolnymi misjami, (3) wyjaśnił, że dane teledetekcyjne dotyczące wilgotności gleby SM korespondują z obserwacjami TWS prowadzonymi przez GRACE oraz (4) pokazał, że metody uczenia maszynowego nadają się do predykcji wartości TWS. Trend badań jest zgodny z trendem światowym, a wysnute wnioski zgadzają się z opublikowanymi dotychczas w tej tematyce pracami. Doktorant uzupełnił powyższe o synergię z obserwacjami z misji teledetekcyjnej, co jest wartością dodaną przedstawionej rozprawy doktorskiej.

Pomimo iż nie podjęłam się oceny pierwszej publikacji, ze względów, które wcześniej wymieniłam, rozprawa jako cykl 4 publikacji stanowi już spójne opracowanie. Uważam, że odjęcie pierwszej pracy nie stanowi przeszkody dalszego procedowania rozprawy. Podjęty temat uważam za aktualny, a jego rozwiązanie za oryginalne. Praca przygotowana jest w rzeczowy i staranny sposób. Mam jedynie uwagę do częstego (a nawet nadmiarowego) stosowania kolokwializmów, które nie powinny się pojawić w rozprawie doktorskiej, jak np. „siatki lądowe i oceaniczne”, czy „paski N-S”. Doktorant stosuje również szereg skrótów, które niekiedy utrudniają zrozumienie głównego przekazu rozprawy.

## 2. Uwagi i pytania

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

- 1) Doktorant naprzemiennie używa w rozprawie doktorskiej skrótów TWS, TWSA oraz  $\Delta$ TWS, które nie powinny być w rzeczywistości mieszane. Proszę o wyjaśnienie pojęć.
- 2) Doktorant naprzemiennie używa pojęć wód gruntowych, wód podziemnych oraz wilgotności gleby. Proszę o wyjaśnienie pojęć.
- 3) Doktorant w swojej rozprawie wykorzystał rozwiązanie GRACE bazujące na współczynnikach sferycznych harmonicznych. Proszę o wyjaśnienie w czym to rozwiązanie jest lepsze od rozwiązania wykorzystującego maskony i dlaczego autor nie zdecydował się wykorzystać gotowych produktów GRACE poziomu 3, które mają lepszą rozdzielczość przestrzenną?
- 4) W publikacji 2 Autor wymienia stopień oraz rząd (d/o) wykorzystanych rozwiązań GRACE, tj.: „CSR – d/o 96, GFZ – 90 and JPL – 90”, a następnie stwierdza, że dla niektórych rozwiązań wykorzystał rozwiązanie do stopnia i rzędu 60 (‘for certain solutions up to 60’). Dla których rozwiązań, skoro wszystkie są zdefiniowane przez wyższy stopień oraz rząd?
- 5) Publikacja 2: Doktorant porównuje dane GRACE o rozdzielczości przestrzennej 300 km do punktowych pomiarów grawimetrycznych przeprowadzonych na stacji AGO JOZE. Proszę o wyjaśnienie jak uśrednianie przestrzenne GRACE może wpłynąć na jakość porównania do pomiarów punktowych.

- 6) Publikacja 3: Doktorant wykorzystał algorytm XGBoost. Jakie inne algorytmy uczenia maszynowego są bliskie Doktorantowi i dlaczego wybór padł akurat na XGBoost? Proszę o wyjaśnienie.
- 7) Publikacja 3: Model GLDAS nie zawiera wszystkich składowych wartości TWS, obserwowanych przez GRACE. Proszę o komentarz jak to wpłynie na jakość wyznaczonych wartości TWS oraz porównania ich z wartościami obserwowanymi przez GRACE.
- 8) Publikacja 3: Wartości TWS dostarczane są przez GRACE z rozdzielczością przestrzenną 3 stopni, co Doktorant zauważa w rozprawie. Wartości składowych TWS oraz zmienne fizyczne zawarte w modelu GLDAS umożliwiają odtworzenie wartości TWS z rozdzielczością przestrzenną 0,25 stopnia. Proszę o komentarz jak na porównanie wyznaczonych wartości TWS wpływa różnica w rozdzielczościach przestrzennych obu zbiorów danych.
- 9) Publikacja 4: Doktorant wykorzystuje dane z AMSR-E do wyznaczenia wartości wilgotności gleby SM. Misja ta zbiera dane o wilgotności gleby do głębokości 7,5 cm. Proszę o komentarz jak to się ma do wartości SM zbieranych przez GRACE oraz do tytułowych wód gruntowych.
- 10) Publikacja 4: Proszę o komentarz jak obecność innych składowych wartości TWS wpływa na przeprowadzone przez Doktoranta porównanie pomiędzy wartościami wilgotności gleby (SM) wyznaczonymi z misji AMSR-E a wartościami TWS wyznaczonymi z GRACE?
- 11) Publikacja 4: Doktorant stwierdza w rozprawie: „Sensory mikrofalowe nie będące wrażliwymi na zmiany w ekwiwalencie śniegu charakteryzuje duży szum obserwacyjny w tych obszarach ([w obszarach wiecznej zmarzliny]), podczas gdy GRACE rejestruje zmiany masy wynikające ze zmiany pokrywy lodowej.” Co oznacza w tym przypadku ‘duży’?
- 12) Publikacja 4: Co Autor ma na myśli pisząc o ‘ograniczeniach glebowych’?
- 13) Publikacja 4: Czy różnice między TWS z GRACE a SM z AMSR-E dla obszaru Europy nie wynikają z dominacji warstw, które nie zostały odjęte od TWS w procesie analiz?
- 14) Publikacja 5: Doktorant stwierdza, że mimo ograniczonej korelacji pomiędzy GRACE i AMSR-E w niektórych obszarach „modelowanie  $\Delta TWS$  przy użyciu danych z AMSR-E okazuje się skuteczne”. Skoro misja AMSR-E dostarcza danych o wilgotności gleby SM, to w jaki sposób Doktorant uwzględnił pozostałe warstwy TWS? Proszę o wyjaśnienie.
- 15) Misja AMSR-E zakończyła swoją działalność w 2012 roku. Jakie aktualne dane teledetekcyjne można by wykorzystać do porównań z wartościami TWS? Proszę o komentarz.

### 3. Wnioski końcowe

Uważam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska, składająca się z cyklu 5 publikacji powiązanych ze sobą tematycznie, stanowi oryginalne rozwiązanie problemu badawczego dotyczącego połączenia różnych obserwacji geodezyjnych w celu wyznaczenia zmian zasobów wód kontynentalnych.

Doktorant udowodnił, że potrafi prowadzić badania naukowe, a ich wyniki analizować i interpretować. Biorąc pod uwagę powyższe, stwierdzam, że rozprawa doktorska mgra inż. Viktora Szabó pt. „Analiza możliwości synergii obserwacji teledetekcyjnych z grawimetrycznymi oraz istotności czynników wpływających na obserwowane zmiany poziomu wód gruntowych rejestrowanych przez satelity GRACE i GRACE-FO” 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.).

Wniosuję do Rady Naukowej Dyscypliny *Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport* Politechniki Warszawskiej o dopuszczenie mgra inż. Viktora Szabó do publicznej obrony przedstawionej rozprawy doktorskiej.

*Anna Kłos*

Anna Kłos

