



UNIWERSYTET
WARMIŃSKO-MAZURSKI
W OLSZTYNIE



WYDZIAŁ
GEOINŻYNIERII

WYDZIAŁ: GEOINŻYNIERII

Dziedzina: Nauki techniczne
Dyscyplina: Inżynieria lądowa, geodezja i transport

mgr inż. Bartosz Naumowicz

Rozprawa doktorska:

**Wyznaczenie ruchów pionowych skorupy ziemskiej
na obszarze Polski przy użyciu różnych zbiorów
danych**

**Determination of vertical movements of the Earth's
crust in Poland using various data sets**

Praca wykonana w Instytucie Geodezji i Budownictwa, Katedrze Geoinformacji i Kartografii

Promotor: dr hab. inż. Kamil Kowalczyk, prof. Uczelni,
Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie,
Wydział Geoinżynierii,
Instytut Geodezji i Budownictwa,
Katedra Geoinformacji i Kartografii

Promotor pomocnicza: dr inż. Beata Wieczorek,
Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie,
Wydział Geoinżynierii,
Instytut Geodezji i Budownictwa,
Katedra Geoinformacji i Kartografii

Olsztyn, rok 2025

Wykaz publikacji naukowych wchodzących w skład cyklu

Publikacja 1 (P1)

- **Tytuł:** *Possibility of using the DInSAR method in the development of vertical crustal movements with Sentinel-1 data*
- **Autorzy:** Bartosz Naumowicz, Beata Wieczorek, Renata Pelc-Mieczkowska
- **Rok i czasopismo:** 2022, Open Geosciences (Vol. 14, Issue 1, s. 1290-1309)
- **DOI:** 10.1515/geo-2022-0401
- **Indeksacja / punkty ministerialne / IF:**
 - Open Geosciences / 40 / 1.3
- **Rola w artykule:** Pierwszy autor, koncepcja artykułu, prowadzenie analizy DInSAR, walidacja wyników, proces wydawniczy

Abstrakt:

Zbadana została możliwość wykorzystania różnicowego interferometrycznego radaru z syntetyczną aperturą (DInSAR) do opracowania modeli pionowych ruchów skorupy ziemskiej (VCM). Wyznaczono VCM metodą DInSAR w lokalizacjach czterech polskich stacji GNSS: Borowa Góra, Borowiec, Lamkówko i Józefosław. Są one włączone do międzynarodowej usługi GNSS i stałych sieci GNSS EUREF. Wszystkie dane satelitarne Sentinel-1A i 1B pochodziły z 2020 roku, a przedziały czasowe utworzonych interferogramów wynoszą 12, 24 i 336 dni dla każdej z orbit: wstępującej i zstępującej. Zweryfikowano obliczone wyniki VCM w oparciu o dane GNSS zarejestrowane przez poszczególne stacje. Opracowano dane referencyjne metodą precyzyjnego pozycjonowania punktu (PPP). Skonfrontowano je z usługą Nevada Geodetic Laboratory. Dane GNSS obejmowały większe przedziały czasowe niż dane radaru z syntetyczną aperturą (SAR). Do obliczania dziennych pozycji metodą PPP użyto oprogramowania GipsyX. Uzyskane wyniki kierunków przemieszczeń są zbieżne dla danych SAR i GNSS. Wartości różnią się między sobą, zarówno pomiędzy typami orbit, jak i danymi GNSS. Uzyskane wyniki pozwalają przypuszczać, że dane SAR opracowane metodą DInSAR mogą stanowić dodatkowe wsparcie w rozwoju modeli VCM w obszarze Polski, ale nie mogą być jedynym źródłem takich wyników.

Publikacja 2 (P2)

- **Tytuł:** *PPP Solution-Based Model of Absolute Vertical Movements of the Earth's Crust in Poland With Consideration of Geological, Tectonic, Hydrological and Mineral Information*
- **Autorzy:** Bartosz Naumowicz, Kamil Kowalczyk, Renata Pelc-Mieczkowska
- **Rok i czasopismo:** 2024, Earth and Space Science, 2024, 11(12)
- **DOI:** 10.1029/2023EA003268
- **Indeksacja / punkty ministerialne / IF:**
 - Earth and Space Science / 100 / 2.6
- **Rola w artykule:** Pierwszy autor, koncepcja artykułu, współprowadzenie analizy PPP, walidacja wyników, proces wydawniczy

Abstrakt:

Celem niniejszego badania jest wyznaczenie absolutnego współczesnych pionowych ruchów skorupy ziemskiej (VCM) i pionowych ruchów lądu (VLM) na obszarze Polski w oparciu o rozwiązania GNSS. Prędkości na stacjach stałych poddano analizie informacji geologicznej, tektonicznej, hydrologicznej i mineralnej. Przeprowadzono analizę niezawodności i oszacowanie prędkości na poszczególnych stacjach GNSS, analizę porównawczą wyników oraz analizę przestrzenną. Prędkości pionowe wyznaczono za pomocą czterech strategii obliczeniowych. Dzielne dane satelitarne w systemie ITRF2014 zebrane ze stałych stacji GNSS polskiej części systemu ASG EUPOS uzyskano z Głównego Urzędu Geodezji i Kartografii. Wszystkie dane pochodziły z okresu 2011–2021 (około 11 lat) i uzyskano je w formacie Rinex. Wykorzystano szeregi czasowe z rozwiązania Precise Point Positioning (PPP) obliczone za pomocą oprogramowania GipsyX. Absolutne prędkości pionowe skorupy ziemskiej uzyskane dla Polski wahają się głównie między +1,0 a –1,0 mm/rok, co stanowi 95% wartości uzyskanych w ekstremach lokalnych. Ten region Polski można uznać za stabilny tektonicznie, a opracowany model VCM koreluje z budową geologiczną i tektoniczną regionu. Uwzględnienie wpływu tektoniki, geologii, hydrologii i lokalizacji zasobów mineralnych pozwoliło na lepszą interpretację prędkości pionowych i korektę powiązanego modelu. Proponowana strategia obliczeniowa oparta na łączeniu zbiorów danych uzyskanych różnymi metodami przyniosła dobre rezultaty.

Publikacja 3 (P3)

- **Tytuł:** *Integration of Leveling and GNSS Data to Develop Relative Vertical Movements of the Earth's Crust Using Hybrid Models*
- **Autorzy:** Bartosz Naumowicz, Kamil Kowalczyk
- **Rok i czasopismo:** 2025, Applied Sciences
- **DOI:** 10.3390/app15158224
- **Indeksacja / punkty ministerialne / IF:**
 - Applied Sciences / 100 / 2.5
- **Rola w artykule:** Pierwszy autor, koncepcja artykułu, prowadzenie analiz, walidacja wyników, proces wydawniczy

Abstrakt:

W niniejszym badaniu porównano dwa podejścia do integracji danych niwelacyjnych i GNSS w celu określenia względnych ruchów pionowych skorupy ziemskiej. Nowe podejścia przetestowano przy użyciu transformacji i hybrydowego dopasowania siatki. Wyniki pomiarów podwójnego niwelacyjnego w Polsce wykorzystano jako dane testowe, a pomiary GNSS opracowane przy użyciu techniki PPP jako dane uzupełniające. Do dopasowania zastosowano metodę najmniejszych kwadratów, a do transformacji użyto metod izometrycznej, konforemnej i afinicznej, z poprawką Hausbrandta i bez niej. Jako punkty całkowania wykorzystano tzw. punkty pseudo-węzłowe, tj. punkty zidentyfikowane jako wspólne w obu sieciach, których wagę określono zgodnie z założeniami teorii sieci bezskalowych. Obie metody całkowania dają podobne wyniki i nadają się do integracji danych niwelacyjnych i GNSS w celu określenia względnych ruchów pionowych skorupy ziemskiej. Średni błąd jednostkowy m_0 transformacji wyniósł 0,1 mm/rok, a średni błąd po dopasowaniu sieci hybrydowej wyniósł 0,1 mm/rok. Zastosowanie poprawki Hausbrandta nie poprawia znacząco wyników transformacji. Jako metodę transformacji zaleca się 12-parametrową transformację afiniczną.

Publikacja 4 (P4)

- **Tytuł:** *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*
- **Autorzy:** Bartosz Naumowicz, Beata Wieczorek, Kamil Kowalczyk
- **Rok i czasopismo:** 2025, Geodynamics 2(39)/2025
- **DOI:** 10.23939/jgd2025.02.005
- **Indeksacja / punkty ministerialne / IF:**
 - Geodynamics / 20 / 1
- **Rola w artykule:** Pierwszy autor, koncepcja artykułu, prowadzenie analiz, walidacja wyników, proces wydawniczy

Abstrakt:

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie pierwszego w Polsce współczesnych względnych ruchów pionowych skorupy ziemskiej, opartych na integracji ruchów pionowych wyznaczonych z trzech źródeł: pomiarów GNSS (ASG-EUPOS), stałych rozpraszaczy PSInSAR z produktów EGMS oraz pomiarów podwójnej niwelacji precyzyjnej. Ze względu na różnice w rozdzielczości czasowej i przestrzennej danych, konieczne było opracowanie spójnej metodologii integracji. W procesie scalania danych, zastosowano transformację afiniczną do przekształcenia absolutnych ruchów pionowych (GNSS i PSInSAR) na układ względny zgodny z danymi niwelacyjnymi. Dane InSAR pochodziły z produktów EGMS L2a (po rozłożeniu na składową pionową) i EGMS L3. Analiza wykazała, że optymalny promień bufora dla danych InSAR w badaniu mikroobszarów wokół stacji GNSS wynosi 0,3 km, a użycie mediany jako wartości reprezentatywnej jest statystycznie uzasadnione. Średni błąd transformacji dla pojedynczego punktu wynosił około 0,20 mm/rok. Ostateczny model opracowano przy użyciu metody wielomianów lokalnych, a uzyskane wyniki stanowią podstawę dalszych badań geodynamicznych i mogą być wykorzystane w inżynierii lądowej i zarządzaniu ryzykiem geologicznym.

Finansowanie

Badania przedstawione w niniejszej rozprawie doktorskiej były realizowane w ramach kształcenia w Szkole Doktorskiej Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie. Prace te zostały sfinansowane z:

1. Środków własnych Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie przeznaczonych na badania
2. Środków pozyskanych z programu PROM Narodowej Agencji Wymiany Akademickiej na zrealizowanie stażu naukowego na Uniwersytecie Technicznym w Rydze w terminie 16.08-14.09.2021r.

Spis treści:

Wykaz publikacji naukowych wchodzących w skład cyklu	1
Publikacja 1 (P1)	1
Publikacja 2 (P2)	2
Publikacja 3 (P3)	3
Publikacja 4 (P4)	4
Finansowanie	5
Spis treści:	6
Wykaz skrótów:	8
Streszczenie	9
Abstract	10
1. Wstęp	11
2. Cel, zakres badań i hipotezy badawcze	21
2.1 Cel badań	21
2.2 Zakres badań	22
2.3 Hipotezy badawcze	22
3. Metodyka badań	24
3.1 Ocena przydatności DInSAR w wyznaczeniu pionowych ruchów skorupy ziemskiej (P1)	25
3.1.1 Obliczenie ruchów pionowych skorupy ziemskiej przy użyciu metody DInSAR w czterech lokalizacjach polskich stacji GNSS: Borowa Góra, Borowiec, Lamkówko i Józefosław	27
3.2 Opracowanie absolutnych ruchów pionowych skorupy ziemskiej dla obszaru Polski opartych na rozwiązaniu PPP z danych GNSS wraz z analizą wpływu czynników geologicznych, tektonicznych i hydrologicznych na wyznaczone prędkości pionowe (P2)	29
3.2.1 Obliczenie absolutnych ruchów pionowych skorupy ziemskiej na stacjach polskiej sieci ASG EUPOS wraz z analizą wpływu czynników geologicznych, tektonicznych i hydrologicznych na wyznaczone prędkości pionowe	31
3.3 Selekcja metod integracji danych niwelacyjnych i GNSS wraz z oceną wpływu lokalizacji punktów dostosowania na wynik integracji (P3)	32

3.3.1 Wyznaczenie względnych ruchów pionowych skorupy ziemskiej na podstawie danych niwelacyjnych i GNSS	34
3.4 Określenie buforu reprezentatywnego wokół stacji GNSS na podstawie danych PSInSAR wraz z oceną zależności pomiędzy ruchem pionowym na stacji GNSS, a ruchem pionowym w mikroobszarze (P4).....	35
3.4.1 Wyznaczenie względnych ruchów pionowych skorupy ziemskiej na podstawie danych niwelacyjnych, GNSS i PSInSAR	37
4. Wyniki	39
4.1 Możliwość wykorzystania metody DInSAR w badaniach pionowych ruchów skorupy ziemskiej z wykorzystaniem danych Sentinel-1 (P1).....	39
4.2 Ruchy pionowe skorupy ziemskiej w Polsce oparte na rozwiązaniu PPP z uwzględnieniem informacji geologicznych, tektonicznych, hydrologicznych i mineralnych (P2)	40
4.3 Integracja danych z niwelacji i GNSS w celu opracowania względnych ruchów pionowych skorupy ziemskiej przy użyciu sieci hybrydowych (P3)	41
4.4 Wykorzystanie danych hybrydowych: PSInSAR, GNSS i niwelacji w opracowaniu wyznaczeniu ruchów pionowych skorupy ziemskiej na obszarze Polski (P4).....	43
5. Dyskusja	45
6. Podsumowanie i wnioski	48
6.1 Dalsze kierunki badań	51
7. Bibliografia.....	54
8. Spis tabel, rysunków i wykresów	63

Wykaz skrótów:

DInSAR – *Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar* - Różnicowa interferometria radarowa z syntetyczną aperturą

DLN - sieci podwójnej niwelacji

EGMS – *European Ground Motion Service*

EPN - *European Permanent Network*

EVRF - *European Vertical Reference Frame*

GIA - *Glacial Isostatic Adjustment* - Glacjalne Dostosowanie Izostatyczne

GNSS – *Global Navigation Satellite System* - Globalny System Nawigacji Satelitarnej

GTN - sieć triangulacyjna GNSS

InSAR – *Interferometric Synthetic Aperture Radar* - Satelitarny interferometryczny radar z syntetyczną aperturą

NGL - *Nevada Geodetic Laboratory*

PPP – *Precise Point Positioning* - Precyzyjne Pozycjonowanie Punktowe

PSInSAR – *Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar* - Interferometria radarowa z wykorzystaniem stabilnych rozpraszaczy

SA - *Satellite Altimetry* - Altimetria Satelitarna

TG - *Tide Gauge* - Dane mareograficzne

TT - strefa Teisseyre’a-Tornquista

UELN - *United European Levelling Network*

VCM – *Vertical Crustal Movements* - Pionowe ruchy skorupy ziemskiej

VLM – *Vertical Land Movements* - Pionowe ruchy powierzchni Ziemi

Streszczenie

Celem nadrzędnym niniejszej rozprawy doktorskiej było zdobycie wiedzy na temat względnych ruchów pionowych skorupy ziemskiej w Polsce. Zbadano możliwości użycia różnych geodezyjnych zbiorów danych (satelitarnych i naziemnych) i ich integrację na potrzeby monitorowania pionowych ruchów skorupy ziemskiej w Polsce jako obszaru o niskiej dynamice. Wykorzystano dane ze stacji permanentnych GNSS ASG-EUPOS, pomiary niwelacji precyzyjnej wykonane na liniach podwójnej niwelacji obejmujące obszar Polski z 3 i 4 kampanii pomiarowej, dane satelitarne Sentinel-1A i 1B oraz dane interferometrii radarowej z produktu EGMS (European Ground Motion Service).

Zastosowano nowe lub zmodyfikowane podejścia do integracji, m.in. transformację jako sposób łączenia ruchów absolutnych i względnych, teorię sieci bezskalowych do typowania punktów dostosowania oraz analizę wpływu czynników geologicznych, tektonicznych i hydrologicznych na uzyskane prędkości pionowe. Przeprowadzono wyznaczenie absolutnych ruchów pionowych dla 100 stacji ASG EUPOS w technice PPP oraz określono mikroobszary wokół stacji do oceny spójności z danymi InSAR.

Udowodniono, że zastosowanie transformacji pozwala na przejście z absolutnego poziomu odniesienia do poziomu względnego, co jest jednym z głównych problemów podczas łączenia danych niwelacyjnych i GNSS w celu określenia pionowych ruchów skorupy ziemskiej. Wykazano, że teoria sieci bezskalowej nadaje się do wyznaczenia punktów łącznych w sieci hybrydowej. Klasyfikacja punktów przy użyciu teorii sieci bezskalowych umożliwia identyfikację punktów łącznych o największym znaczeniu w sieci. Te same punkty łączne mogą być wykorzystane w wyrównaniu sieci hybrydowej, jak i w transformacji. Wykazano, że istnieje możliwość opracowania względnych ruchów pionowych skorupy ziemskiej na podstawie integracji danych z pomiarów niwelacyjnych, GNSS, PSInSAR z dokładnością nie gorszą jak 0.2mm/rok.

Słowa kluczowe: VCM, InSAR, GNSS, niwelacja precyzyjna, modele hybrydowe, mikroobszary

Abstract

The primary goal of this doctoral dissertation was to gain knowledge about the relative vertical movements of the Earth's crust in Poland. The study explored the potential use of various geodetic datasets (satellite and ground-based) and their integration for monitoring vertical crustal movements in Poland, an area of low dynamics. Data from ASG-EUPOS permanent GNSS stations, precise leveling measurements performed on double-leveled lines covering Poland from the 3rd and 4th measurement campaigns, Sentinel-1A and 1B satellite data, and radar interferometry data from the European Ground Motion Service (EGMS) product were used.

New or modified integration approaches were employed, including transformation as a means of combining absolute and relative movements, scale-free network theory for selecting adjustment points, and analysis of the influence of geological, tectonic, and hydrological factors on the obtained vertical velocities. Absolute vertical movements were determined for 100 ASG-EUPOS stations using the PPP technique, and micro-areas around the stations were identified to assess consistency with InSAR data.

It was demonstrated that the use of transformations allows for the transition from absolute reference level to relative level, which is one of the main challenges when combining leveling and GNSS data to determine vertical crustal movements. It was demonstrated that scale-free network theory is suitable for determining junction points in a hybrid network. Classifying points using scale-free network theory allows for the identification of junction points of greatest importance in the network. These same junction points can be used in the hybrid network alignment as well as in the transformation. It was demonstrated that it is possible to derive relative vertical crustal movements based on the integration of leveling, GNSS, and PSInSAR data with an accuracy of no worse than 0.2 mm/year.

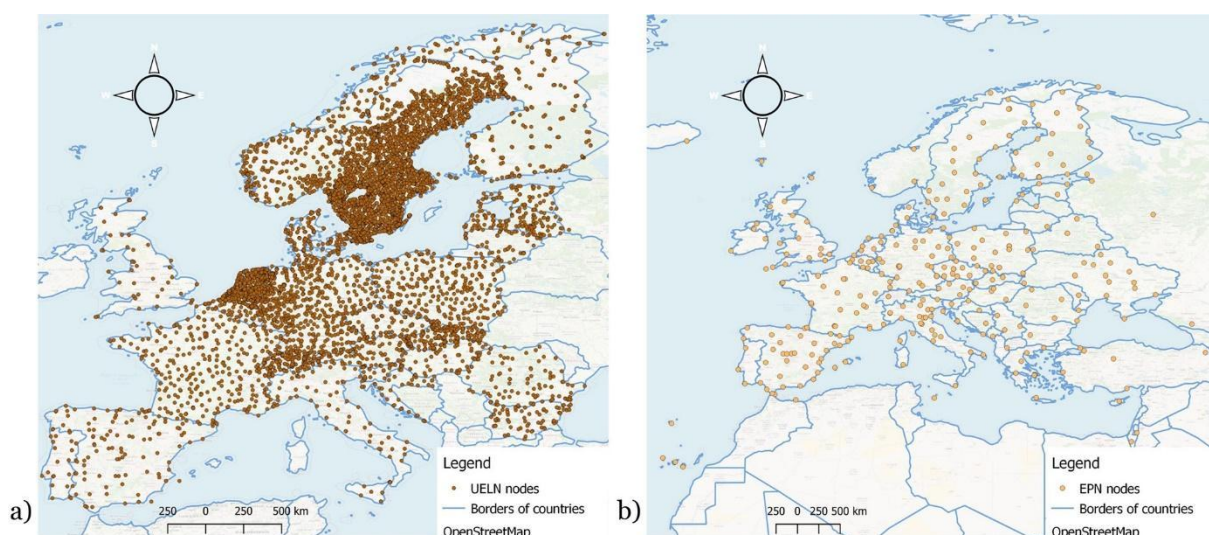
Keywords: VCM, InSAR, GNSS, precision leveling, hybrid models, micro-areas

1. Wstęp

Pionowe ruchy skorupy ziemskiej stanowią jeden z kluczowych elementów współczesnych badań geodezyjnych i geofizycznych. Obserwacje tych procesów pozwalają nie tylko na lepsze zrozumienie dynamiki litosfery, ale także na praktyczne wykorzystanie wyników w takich dziedzinach, jak inżynieria lądowa, gospodarka wodna, planowanie przestrzenne czy monitoring terenów górniczych i obszarów zagrożonych osuwiskami. Z punktu widzenia dyscypliny badania te mają również istotne znaczenie w kontekście utrzymania i doskonalenia państwowych systemów odniesień przestrzennych, których stabilność wymaga uwzględnienia długookresowych zmian wysokościowych.

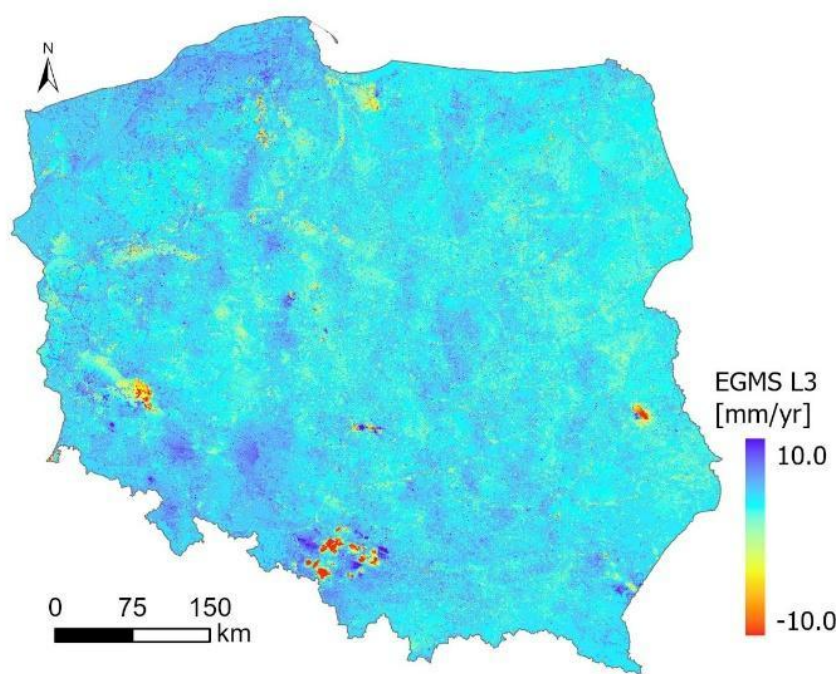
Tradycyjne techniki, takie jak niwelacja precyzyjna czy obserwacje Global Navigation Satellite Systems (GNSS), umożliwiają analizę zmian wysokościowych, jednak charakteryzują się ograniczeniami związanymi z gęstością przestrzenną pomiarów, czasochłonnością badań oraz kosztami. Rozwój metod satelitarnych, w tym interferometrii radarowej (InSAR, DInSAR, PSInSAR), otworzył nowe możliwości w zakresie obserwacji deformacji terenu na dużą skalę. Współczesne badania wymagają jednak integracji danych pochodzących z różnych źródeł, aby zapewnić możliwie najbardziej wiarygodny i kompletny opis badanych procesów.

Obecnie w Europie funkcjonuje United European Levelling Network (UELN) <https://evrs.bkg.bund.de> obejmująca ponad 8000 punktów węzłowych jak i European Permanent Network (EPN). Składa się na nią ponad 350 stacji GNSS <https://www.epncb.oma.be> (Rys. 1) oraz sieć stacji mareograficznych <https://psmsl.org>.



Rys. 1. a) punkty UELN; b) punkty stacji permanentnych EPN <https://evrs.bkg.bund.de>; <https://www.epncb.oma.be> (źródło: K. Kowalczyk, Kowalczyk, i inni, 2021)

Dodatkowo, pozyskano szeroko dostępne dane z Satelitarnej Interferometrii Radarowej (InSAR) zawierające informacje dotyczące względnych danych wysokościowych. Opracowywane są one różnymi metodami, np. różnicowego interferometrycznego radaru syntetycznego (DInSAR), czy interferometrią radarową z wykorzystaniem stabilnych rozpraszaczy (PSInSAR). Dla obszaru Polski dane InSAR z programu Copernicus Land Monitoring Service dostępne są w ramach European Ground Motion Service (EGMS) <https://land.copernicus.eu/en/products/european-ground-motion-service> i zawierają ponad 4 mln punktów (Rys. 2).



Rys. 2. Prędkości pionowe gruntu w Polsce na podstawie modelu EGMS L3, skala od -10mm/rok do +10mm/rok (2018-2022) (źródło: Naumowicz i inni, 2025)

Wiedza o ruchach pionowych skorupy ziemskiej jest niezbędna do wyjaśnienia procesów geofizycznych zachodzących zarówno na powierzchni, jak i wewnątrz Ziemi (Tregoning P & Rizos C., 2005). Potrzebna jest ona również do utrzymania i tworzenia kinematycznych, geodezyjnych systemów odniesienia oraz ujednolicenia regionalnych systemów wysokości np. European Vertical Reference Frame (EVRF) (Ihde i inni, 2005). Znajomość modeli ruchów pionowych skorupy ziemskiej (VCM) lub modeli ruchów powierzchni (VLM) umożliwia między innymi weryfikację zależności pomiędzy zmianami średniego poziomu morza wyznaczonymi z danych mareograficznych i altimetrycznych (Rocco, 2015) jak i weryfikację ruchów pionowych skorupy ziemskiej wyznaczonych z pomiarów innymi (Farolfi i inni, 2018). Monitorowaniem ruchów pionowych skorupy ziemskiej zajmuje się wiele instytucji naukowych np. USGS (United States Geological Survey, USA), ESA (European Space Agency), NASA (National Aeronautics and Space Administration, USA), GFZ Potsdam

(GeoForschungsZentrum, Niemcy), EUREF Permanent Network (EPN), Międzynarodowa Unia Geodezji i Geofizyki (IUGG).

W Polsce opracowano kilka map pionowych ruchów skorupy ziemskiej. Były to mapy i modele względne oparte na powtarzanych pomiarach niwelacji precyzyjnej (K. Kowalczyk, 2005; Wyrzykowski, 1987) oraz mapa absolutnych ruchów pionowych opracowana na podstawie danych GPS (Kontny & Bogusz, 2012). Obecnie obowiązujący model (K. Kowalczyk, 2005) został opracowany poprzez wyrównanie przewyższeń podwójnej niwelacji z lat 1974-1982, 1997-2003 (bez poprawek normalnych) względem mareografu we Władysławowie. Uzyskano dokładność $\pm 0.05\text{mm/rok}$ w przedziale od -4mm/rok do 0mm/rok . Model absolutny (Kontny & Bogusz, 2012) w układzie ITRF2005 wskazywał mniejsze ruchy pionowe, z przedziału od $+2\text{mm/rok}$ do -1mm/rok z dokładnością od $\pm 0.5\text{mm/rok}$ do $\pm 0.8\text{mm/rok}$.

Rozwój technik pomiarowych, ciągła aktualizacja baz danych pomiarowych oraz ich dostępność zbliża do monitorowania ruchów pionowych skorupy ziemskiej w czasie prawie rzeczywistym. Wzajemne pomiary tego samego obszaru przy użyciu różnych technik pozwalają nie tylko wspólnie opracowywać modele przemieszczeń lub deformacji, ale także weryfikować uzyskane wyniki (Vadivel i inni, 2019). Aby w pełni wykorzystać dostępne dane pomiarowe oraz tworzyć modele ruchów pionowych z danych hybrydowych niezbędne jest wypracowanie sposobów na ich integrację.

Polska leży wewnątrz kontynentu europejskiego, który charakteryzuje się powolną sub-milimetrową deformacją wewnątrzkontynentalną (Kontny & Bogusz, 2012) z małym wpływem Glacialnego Dostosowania Izostaticznego (Glacial Isostatic Adjustment - GIA) zależnego od użytych modeli lodu i Ziemi (Nocquet i inni, 2005). Podobnie jak w pozostałych częściach Europy, deformacje skorupy ziemskiej jak i jej powierzchni spowodowane są głównie różnymi czynnikami geologicznymi: wypiętrzaniem i obniżaniem się masywów górskich związanych z polem konwergencji tektonicznej między płytą afrykańską a stabilną płytą Europy (de Vicente & Vegas, 2009), utratą wód podziemnych jak też efektem GIA (Bogusz i inni, 2019; Lukk & Shevchenko, 2018) oraz działalnością człowieka (np. wydobywanie surowców mineralnych czy aglomeracje miejskie).

Kontynent europejski można podzielić na trzy główne obszary tektoniczne. W północno-wschodniej części położony jest on na prekambryjskiej platformie wschodnioeuropejskiej, która obejmuje ponad połowę całej Europy. W części zachodniej i środkowej, na paleozoicznym paśmie fałdowym Europy Zachodniej i Środkowej (kaledońskie na północy i

waryscyjskie na południu). W części południowej na alpejskim paśmie fałdowym Europy Południowej (Karpaty i zapadlisko przedkarpackie) (Stupnicka, 2013). Polska nie jest aktywna sejsmicznie. Nieliczne aktywności notowane są w obszarze Sudetów i bloku przedsudeckiego oraz Karpat i zapadliska przedkarpackiego. W Polsce znajduje się 175 głównych zbiorników wód podziemnych (pgi.gov.pl) (Rys. 3).

Rys. 3. Lokalizacja stacji ASG-EUPOS w odniesieniu do głównych podziemnych zbiorników wodnych
(źródło: Naumowicz i inni, 2024)

Pionowe ruchy skorupy ziemskiej można określić za pomocą niwelacji precyzyjnej (Rożić, 2015), danych GNSS (Kreemer & Blewitt, 2021) lub ich kombinacji (Fuhrmann i inni, 2015; Qin i inni, 2018). Podejmowane są również próby monitorowania przemieszczeń w oparciu o dane interferometrii radarowej (EGMS), lub połączenie danych GNSS, danych mareograficznych (Tide Gauge - TG), danych interferometrycznych InSAR, niwelacji,

altimetrii satelitarnej (Satellite Altimetry – SA) (Fuhrmann & Garthwaite, 2019; K. Kowalczyk, Pajak, i inni, 2021).

Pionowe ruchy skorupy ziemskiej można podzielić na względne i absolutne. Względne pionowe ruchy skorupy ziemskiej to ruchy odnoszące się do dowolnego punktu (lub powierzchni) uznawanego za stały w czasie. Ruchy absolutne skorupy ziemskiej, rozumiane są jako ruchy geocentryczne (A. , Kenyeres i inni, 2013) i określane są na podstawie bezpośrednich pomiarów GNSS, a także kombinacji pomiarów TG i SA (Wöppelmann & Marcos, 2014). Ruchy absolutne mogą być także wyznaczane z innych pomiarów satelitarnych. Nie pokazują one zależności pomiędzy zmianą powierzchni (ląd-ocean), a jedynie określają zmianę wysokości w czasie w stosunku do pewnego matematycznego przybliżenia kształtu Ziemi, czyli opisują zmiany wysokości względem elipsoidy odniesienia. Z punktu widzenia oceny ryzyka podtopień czy powodzi w obszarach przybrzeżnych (Le Gal i inni, 2024) użyteczne są modele względne, odnoszące zmiany ruchu lądu do lokalnych zmian poziomu mórz i oceanów. Modele ruchów pionowych skorupy ziemskiej mogą mieć zasięg lokalny (np. Polska), regionalny (np. Europa) lub globalny. W przypadku modeli globalnych i regionalnych stosuje się różnego rodzaju przybliżenia, uśrednienia oraz automatyzację procesów obliczeniowych (A. Kenyeres i inni, 2019; Piña-Valdés i inni, 2022). Takie podejście uniemożliwia szczegółową analizę mikroobszarów wokół stacji GNSS, niwelacyjnych punktów węzłowych, czy stałych rozpraszaczy InSAR. Modele lokalne, pozwalają na identyfikację zmian - często submilimetrowych, a także analizę zależności między ruchami gruntu, a czynnikami geologicznymi lub antropogenicznymi.

Sieć niwelacyjna składa się z reperów, pomiędzy którymi dokonuje się pomiarów wysokości i podlega wyrównaniu w odniesieniu do punktu lub punktów o znanej wysokości. Ponowne pomiary wysokości są przeprowadzane w określonych odstępach czasu (kampanie pomiarowe) i tworzą podwójną sieć niwelacyjną (Niewiarowski & Wyrzykowski, 1961). Stosowane są dwa podejścia. Statyczne, które oparte jest na różnicy wysokości punktów odniesienia, oraz nieliniowe, które oparte są na wyrównaniu sieci podwójnej niwelacji (wyrównaniu ruchu pionowego między punktami odniesienia).

Stosując dane satelitarne GNSS do opracowania modeli ruchów pionowych wykorzystuje się szeregi czasowe współrzędnych. Współrzędne te mogą pochodzić z rozwiązań sieciowych (Kontny & Bogusz, 2012) lub rozwiązania Precise Point Positioning (PPP) (Abdel-salam, 2005; Ye, 2002). Jedną z wad rozwiązania sieciowego jest trudność obliczeniowa, która pojawia się wraz ze wzrostem liczby przetwarzanych stacji (Łyszkowicz i inni, 2021). Dodatkowo pojawiają się również trudności w przypadku zwiększania się odległości między stacjami.

Jednak w przypadku strategii PPP nie ma ograniczeń dotyczących odległości, a szacowana pozycja jest określana niezależnie dla pojedynczej stacji i jest bezpośrednio odnoszona do ustalonego układu odniesienia. Pierwsze prace nad wykorzystaniem metody PPP do wyznaczenia ruchów pionowych skorupy ziemskiej w Polsce przeprowadzono w 2017 roku (K. Kowalczyk & Bogusz, 2017). Wykorzystano dobowe szeregi czasowe z rozwiązań PPP opracowanych przez Nevada Geodetic Laboratory (NGL). W pracy tej opracowano zarówno ruchy pionowe względne jak i absolutne. Obejmowały one północno-wschodnią Polskę, Litwę i Łotwę. W wyniku obliczeń uzyskano wartości ruchu pionowego od -1.0mm/rok do 1.5mm/rok z dokładnością od ± 0.1 mm/rok do ± 0.3 mm/rok.

Literatura dotycząca opracowywania szeregów czasowych GNSS jest bardzo bogata i szczegółowo rozwiązuje ważne problemy pojawiające się na etapie określania trendu. Szeregi czasowe współrzędnych uzyskanych dzięki technologii PPP nie są podatne na zmiany zachodzące w sąsiednich stacjach. Jednak poszczególne stacje mogą podlegać wpływowi globalnych procesów geofizycznych, lub lokalnych zmian. Wiele ośrodków obliczeniowych na świecie opracowuje szeregi czasowe współrzędnych na podstawie różnych zbiorów danych. Różnią się one przede wszystkim przedziałem czasowym, metodą opracowania i układem odniesienia. Generuje to problem z ich właściwą interpretacją i wspólnym opracowaniem. Dla obszaru Polski znaleźć można kilka opracowanych zbiorów zarówno w postaci szeregów czasowych współrzędnych jak i już gotowych prędkości na stacjach GNSS (rozwiązania EPOS, UGA, INGV, NGL, KIER, CEUR, KREE i EPND). Samodzielne obliczenie szeregów czasowych współrzędnych przy użyciu PPP z polskich stacji permanentnych systemu ASG-EUPOS przeprowadzono w roku 2021 (Łyszkowicz i inni, 2021). Opracowano dane z 15 stacji permanentnych z lat 2011-2018. Przeprowadzone analizy (Łyszkowicz i inni, 2021) pokazują dużą przydatność metody PPP do wyznaczania ruchów pionowych na polskich stacjach permanentnych. Obecnie w Polsce trwa proces aktualizacji danych niwelacyjnych. Zakłada się, że nowe dane dostępne będą najwcześniej w roku 2027.

Główną zaletą danych SAR jest szybkość pozyskiwania, rozdzielczość przestrzenna i dokładność. Czas ponownej akwizycji, wynosi od 6 do 12 dni. Dane te mają również różną rozdzielczość przestrzenną (terenową) w zależności od trybu ich pozyskiwania. Dane dostarczane są min. przez Europejską Agencję Kosmiczną (ESA). Dane SAR są coraz powszechniej wykorzystywane do określania przemieszczeń pionowych i poziomych, głównie na obszarach o znacznych zmianach, gdzie występują lub występowały na przykład osiadania gruntu spowodowane wyczerpywaniem się wód gruntowych (Parker i inni, 2021), trzęsienia ziemi (Thomas, 2020) lub są to obszary oddziaływania górnictwa (Ameen i inni, 2018; Meyer,

2007; Perski i inni, 2009; Trevoho i inni, 2020; Walters i inni, 2014; Wang i inni, 2019; Zulkifli i inni, 2018).

Procedura opracowania danych jest ugruntowana, jednak zarówno ze względu na dostępne metody jak i obszar, wymaga ona indywidualnego podejścia. Przewagą tej metody pozyskania danych nad niwelacją precyzyjną i pomiarami GNSS jest rozdzielczość przestrzenna. Dlatego integracja danych w celu stworzenia sieci hybrydowych napotyka wyzwania takie jak:

- różne systemy odniesień przestrzennych,
- pomiary nie są wykonywane na tych samych punktach,
- używane są różne metody opracowania danych,
- różna częstotliwość pomiaru i rozdzielczość przestrzenna danych,
- różne spodziewane dokładności.

Problemy te rozwiązuje się poprzez: uśrednianie danych, metody interpolacji i ekstrapolacji (Del Soldato i inni, 2021) w ustalonych węzłach siatki (Peifer H., 2011), określenie tzw. punktów pseudo węzłowych (pseudo nodal point) (Bednarczyk i inni, 2018) lub pseudo rozpraszaczy (pseudo-PS) (Ferretti i inni, 1999), ocenę istotności punktów w sieciach hybrydowych (A. M. Kowalczyk & Bajerowski, 2020), wyrównanie geodezyjnych sieci hybrydowych (K. Kowalczyk i inni, 2020) lub transformację zbiorów pomiędzy różnymi systemami odniesienia (Altamimi i inni, 2016; Naumowicz & Kowalczyk, 2025).

Wykorzystując sieci hybrydowe można łączyć ze sobą nie tylko zestawy danych oparte na różnych metodach pomiarowych, ale także zestawy tego samego typu, różniące się przetwarzaniem, zasięgiem czy epokami pomiarowymi (Roštínský i inni, 2020). Dominujące metody dla tego samego typu danych opierają się głównie na podejściu statystyczno-matematycznym:

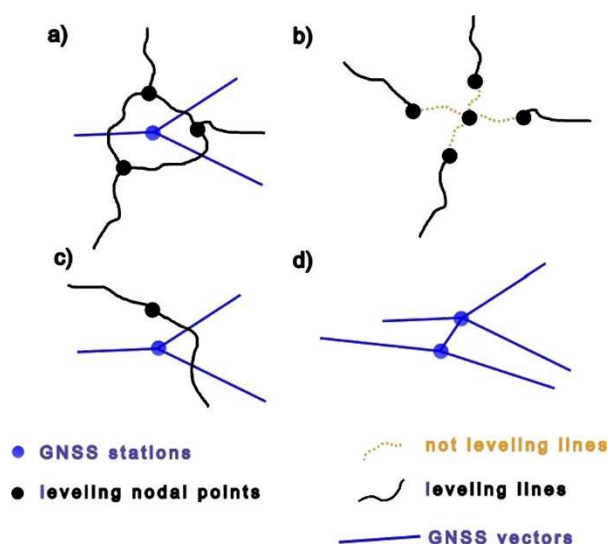
- uśrednianiu prędkości,
- wspólnym wyrównaniu kilku sieci ruchów pionowych (np. na podstawie potrójnej lub poczwórnej sieci niwelacyjnej) (K. Kowalczyk & Rapiński, 2013)
- transformacji (Piña-Valdés i inni, 2022)
- interpolacji (jeśli wykorzystywane dane są opracowane jako ruchy względne odnoszące się do tego samego układu odniesienia) (K. Kowalczyk i inni, 2020).

Zastosowanie metod nieliniowych umożliwia określenie ruchów pionowych związanych z trzęsieniami ziemi i ruchami o charakterze lokalnym. Pozwala to również na włączenie do

badania danych z mareografów (TG) i danych z innych metod pomiarowych. Włączenie TG to odbywa się jako ruch pionowy w punkcie. Jest to zmiana poziomu morza na podstawie danych z mareografów lub ruchów między punktami (np. stacje GNSS i punkty PS). Zaletą metod nieliniowych jest większa zdolność do wpływania na dane „obserwacyjne” poprzez błędy obserwacyjne. Wadą jest każdorazowa zmiana układu sieci hybrydowej, gdy dodaje się lub odejmuje punkty w sieci. Innym rozwiązaniem jest transformacja ruchów pionowych np. absolutnych do względnych. Zaletą transformacji jest szybkie przygotowanie nowych zestawów w przypadku dodania lub usunięcia stacji GNSS, lub punktów PS. Wadą jest trudność w ocenie wyboru lokalizacji i liczby punktów dostosowania oraz wiarygodności ruchów pionowych określonych na ich podstawie (Janicka, 2011; Watson, 2006).

Permanentne stacje GNSS nie są połączone ze sobą stałą strukturą sieciową, a odległości między nimi wynoszą od kilku do prawie stu kilometrów. Może to powodować, że ruchy pionowe określone na ich podstawie będą odzwierciedlać ruchy lokalne lub ruchy własne stacji. Jakość danych niwelacyjnych jest bardziej przewidywalna i zależy głównie od zastosowanej techniki pomiarowej. Zwykle jest to niwelacja precyzyjna, która pozwala ograniczyć wpływ lokalnych deformacji gruntu. Aktualnie, długość działania stacji permanentnych GNSS pozwala na określenie ruchów pionowych z dokładnością porównywalną do tej uzyskanej na podstawie danych niwelacyjnych.

Stacje GNSS i punkty odniesienia do niwelacji zazwyczaj nie są fizycznie tymi samymi punktami. Pionowe deformacje tektoniczne charakteryzują się zazwyczaj powolnym liniowym trendem osiadania lub podnoszenia, podczas gdy regiony aktywne sejsmicznie mogą doświadczać nagłych zmian (lub zdarzeń) w ruchach pionowych (Hollenstein i inni, 2008). Jeśli deformacja dotyczy wyłącznie tektoniki, ruchy tektoniczne powinny mieć podobny przebieg dla poszczególnych bloków tektonicznych. Należy zatem założyć, że dwa (lub więcej) zmierzane punkty oddalone od siebie o pewną odległość (spełniające kryterium odległości), mogą być traktowane jako jeden punkt reprezentatywny (punkt pseudowęzłowy) (Bednarczyk i inni, 2018) (Rys. 4).



Rys. 4. Przykłady punktów pseudowęzłowych: a) punkty sieci podwójnej niwelacji wokół stacji GNSS; b) punkty odniesienia wokół punktu węzłowego podwójnej niwelacji, dla których nie są dostępne dane dotyczące wysokości; c) pojedyncze punkty odniesienia wokół sieci podwójnej niwelacji w pobliżu stacji GNSS; d) bliskie stacje GNSS (źródło: K. Kowalczyk, Kowalczyk, i inni, 2021)

Określenie kryterium odległości jest arbitralne. Na jego wybór może mieć wpływ tektonika i sejsmiczność obszaru, geologia lub ukształtowanie terenu. Autorzy Ihde i inni, 2005, stwierdzają, że przy łączeniu sieci opartych na wielu technikach pomiarowych odległości między poszczególnymi punktami pomiarowymi powinny być wystarczająco bliskie, ale nie podają konkretnego kryterium odległości. Analiza ruchów pionowych na podstawie danych niwelacyjnych wykazała, że takim kryterium może być 10 km (Bednarczyk i inni, 2018), natomiast w Heiskanen & Moritz, 1967, stwierdzono, że ruchy pionowe skorupy ziemskiej są spójne w promieniu 40 km. Wybór takiej odległości powinien opierać się na szczegółowych analizach w każdej wybranej lokalizacji. Badania K. Kowalczyk, Kowalczyk, i inni, 2021, wykazały, że w sieciach hybrydowych nie jest wymagane 100% wspólnych punktów. Wystarczające jest około 3%, ale warunkiem jest wybór najbardziej odpowiednich punktów w sieci. W „Hausbrandt S, 1971; Janicka, 2011 wskazano kilka ogólnych zasad dotyczących ich lokalizacji, natomiast w Bednarczyk i inni, 2018; K. Kowalczyk, Kowalczyk, i inni, 2021, przedstawiono sposób wyboru odpowiednich punktów wspólnych w sieciach hybrydowych na podstawie teorii sieci bezskalowych (na przykładzie UELN i EPN) (Barabási i inni, 2001; A. M. Kowalczyk & Bajerowski, 2020).

Przytoczona powyżej literatura wskazuje na potrzebę poszukiwania rozwiązań i prowadzenia badań nad integracją geodezyjnych danych pomiarowych w celu tworzenia wiarygodnych i dokładnych modeli ruchów pionowych skorupy ziemskiej. Wiedza o ruchach pionowych jak i modele o wysokiej wiarygodności i szczegółowości mogą mieć zastosowanie nie tylko do badania procesów geodynamicznych czy kalibracji systemów odniesienia. Można

je również wykorzystywać podczas zarządzania zasobami naturalnymi, w planowaniu przestrzennym, a także podczas monitorowania bezpieczeństwa ludzi i infrastruktury (Blewitt i inni, 2018).

Przedstawiona rozprawa doktorska obejmuje cykl czterech artykułów naukowych, poświęconych problematyce wyznaczenia pionowych ruchów skorupy ziemskiej na obszarze Polski z wykorzystaniem nowoczesnych technik geodezyjnych i satelitarnych. Pierwszy artykuł (Naumowicz i inni, 2022) stanowił próbę oceny przydatności metody DInSAR opartej na danych Sentinel-1 do modelowania ruchów pionowych w odniesieniu do wyników pomiarów GNSS z wykorzystaniem techniki PPP. Drugi artykuł (Naumowicz i inni, 2024) poświęcono wyznaczeniu absolutnych ruchów pionowych skorupy ziemskiej na podstawie danych PPP, z uwzględnieniem czynników geologicznych, tektonicznych, hydrologicznych i mineralnych. Trzeci artykuł (Naumowicz & Kowalczyk, 2025) rozwijał tę problematykę, integrując dane GNSS i niwelacyjne w celu opracowania modeli względnych ruchów pionowych. Natomiast czwarty (Naumowicz i inni, 2025) przedstawiał rozwiązanie hybrydowe, łączące dane PSInSAR, GNSS i niwelacyjne, pozwalające na uzyskanie bardziej szczegółowego i wiarygodnego obrazu procesów zachodzących w skorupie ziemskiej.

2. Cel, zakres badań i hipotezy badawcze

2.1 Cel badań

Ruchy pionowe skorupy ziemskiej opracowuje się na podstawie różnorodnych danych takich jak pomiary geodezyjne, geologiczne, tektoniczne, sejsmiczne i inne. Wśród danych geodezyjnych wyróżnia się zarówno dane satelitarne, pozyskane z takich źródeł jak: SAR, SA, GNSS jak i dane z pomiarów naziemnych: Niwelacja precyzyjna (Lev) oraz mareografy (TG).

W literaturze naukowej można znaleźć próby wyznaczania ruchów pionowych skorupy ziemskiej zarówno z jednorodnych zbiorów danych jak i ich różnych konfiguracji. Aktualnie, duża dostępność danych satelitarnych (GNSS i InSAR) pozwala na określenie ruchów pionowych z dokładnością porównywalną do tej uzyskanej na podstawie danych niwelacyjnych. Pomiary satelitarne umożliwiają wyznaczenie absolutnych ruchów pionowych skorupy ziemskiej, odniesionych do elipsoidy. Dane naziemne służą do wyznaczania ruchów względnych odniesionych do lokalnego poziomu morza. Połączenie tych zbiorów pozwala na:

- ocenę lokalnego charakteru ruchu pionowego;
- wzajemną weryfikację otrzymanych ruchów pionowych;
- otrzymanie ruchów pionowych jako całości analizy;
- zwiększenie rozdzielczości przestrzennej danych;
- uzupełnienie, a nawet zastąpienie zbiorów, lub pojedynczych punktów.

Coraz liczniejsze próby opracowania deformacji z użyciem różnych zbiorów danych oraz wydłużone regularne okresy pomiarowe pozwoliły przypuszczać, że istnieje możliwość użycia tych danych do opracowania wiarygodnego modelu względnych ruchów pionowych skorupy ziemskiej.

Celem nadrzędnym niniejszej pracy było zdobycie wiedzy na temat względnych ruchów pionowych skorupy ziemskiej w Polsce. Osiągnąć ten cel można było poprzez zbadanie możliwości użycia różnych geodezyjnych zbiorów danych (satelitarnych i naziemnych) i ich integracja na potrzeby monitorowania pionowych ruchów skorupy ziemskiej w Polsce jako obszarze o niskiej dynamice. Cel nadrzędny został zrealizowany poprzez cele szczegółowe:

C1: Zbadanie możliwości wykorzystania danych z różnicowego interferometrycznego radaru z syntetyczną aperturą (DInSAR) do wyznaczenia ruchów pionowych skorupy ziemskiej.

C2: Opracowanie absolutnych ruchów pionowych skorupy ziemskiej (VCM) w nowym układzie współrzędnych ITRF2014 na podstawie różnych metod wyznaczania prędkości z szeregów czasowych GNSS.

C3: 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.

C4: Zbadanie możliwości wyznaczenia współczesnych, względnych ruchów pionowych skorupy ziemskiej, opartych na danych z trzech źródeł: pomiarów GNSS (ASG-EUPOS), stałych rozpraszaczy techniki PSInSAR z produktów EGMS oraz pomiarów podwójnej niwelacji precyzyjnej.

2.2 Zakres badań

Badania przeprowadzono na obszarze Polski, który jest stabilny tektonicznie. Kompleks struktur geologicznych i tektonicznych jest podobny do reszty obszaru Europy. Ze względu na położenie między dwiema płytami przez środek Polski przebiega strefa Teisseyre'a-Tornquista. Dlatego, określenie zmian kinematycznych zachodzących na tym obszarze jest szczególnie ważne dla zrozumienia wpływu ruchów izostatycznych na obszary śródlądowe. Na obszarach o znaczących ruchach tektonicznych, wielkość, zasięg i przyczyny tych ruchów były szeroko badane. Obszary o niewielkich ruchach i mikroobszary, które często nie są przedmiotem zainteresowania naukowego, są trudne do zbadania.

Badanie takich mikroobszarów geologicznych wokół stacji GNSS może mieć istotny wpływ na wykrywanie zmian współrzędnych stacji. Szczególnie przy zmianach temperatury oraz nawodnienia gruntu.

2.3 Hipotezy badawcze

W celu oceny jakości danych postawiono następujące hipotezy badawcze:

H1: Dane InSAR opracowane metodą DInSAR mogą stanowić dodatkowe wsparcie w wyznaczaniu ruchów pionowych w obszarze Polski.

H2: Uwzględnienie wpływu tektoniki, geologii, hydrologii i lokalizacji surowców mineralnych pozwala na lepszą interpretację ruchów pionowych skorupy ziemskiej.

H3: Wysokiej jakości obserwacje z obecnych stacji permanentnych GNSS, przetworzone z wykorzystaniem technologii PPP, mogą być źródłem bardzo dokładnego wyznaczania ruchów pionowych skorupy ziemskiej.

H4: Ruchy pionowe skorupy ziemskiej otrzymane z wyrównania sieci hybrydowej i transformacji matematycznej są względem siebie porównywalne, biorąc pod uwagę ich wartości i dokładności.

H5: Istnieje związek pomiędzy ruchami pionowymi wyznaczonymi na stacjach permanentnych GNSS, a ruchami pionowymi wokół tych stacji.

Weryfikację przedstawionych hipotez zaplanowano poprzez zadania badawcze, które obejmowały:

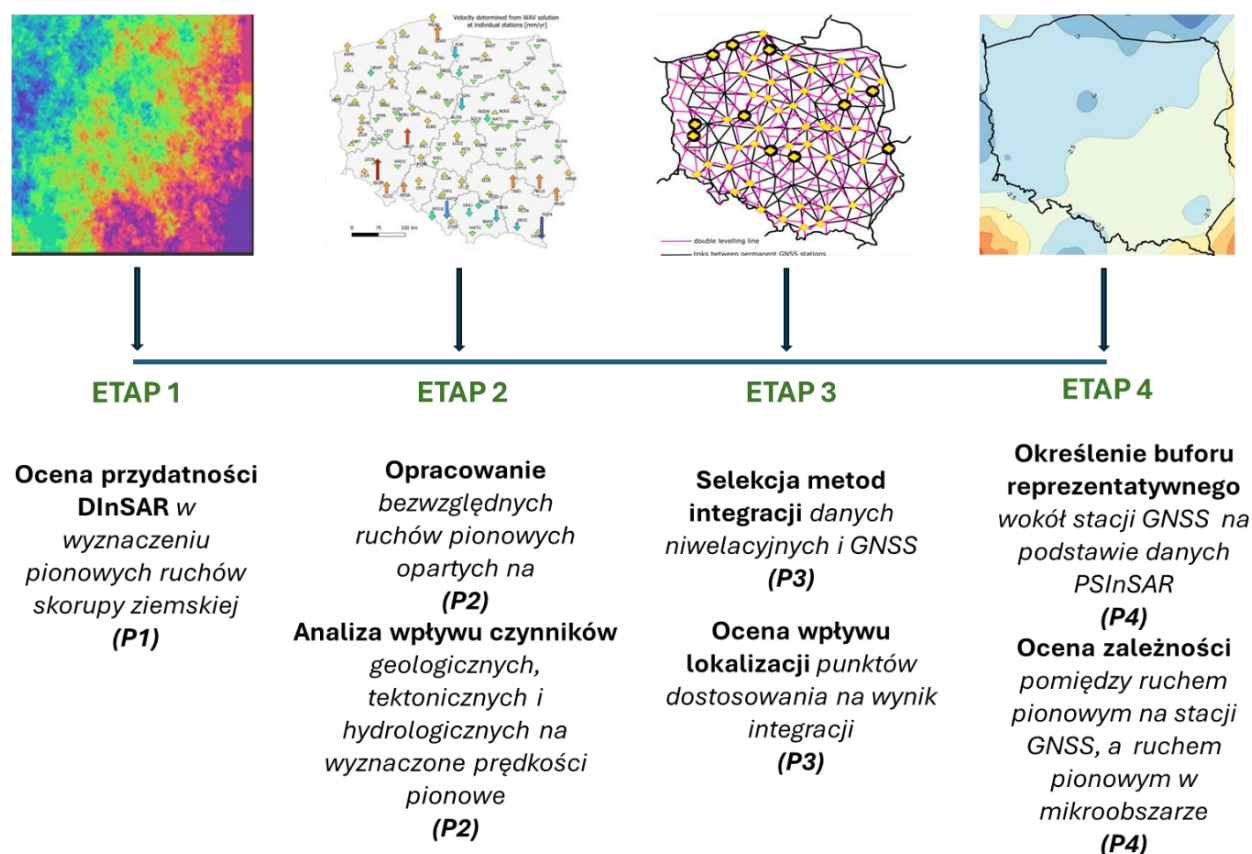
- ocenę przydatności DInSAR w wyznaczeniu pionowych ruchów skorupy ziemskiej (**P1**);
- opracowanie absolutnych ruchów pionowych skorupy ziemskiej dla obszaru Polski opartych na rozwiązaniu PPP z danych GNSS (**P2**);
- analizę wpływu czynników geologicznych, tektonicznych i hydrologicznych na wyznaczone prędkości pionowe (**P2**);
- selekcję metod integracji danych niwelacyjnych i GNSS (**P3**);
- ocenę wpływu lokalizacji punktów dostosowania na wynik integracji (**P3**);
- określenie buforu reprezentatywnego wokół stacji GNSS na podstawie danych PSInSAR (**P4**);
- ocenę zależności pomiędzy ruchem pionowym na stacji GNSS, a ruchem pionowym w mikroobszarze (**P4**).

3. Metodyka badań

Postawiony cel główny jest realizowany poprzez cele szczegółowe zawarte w powiązanych tematycznie artykułach (Naumowicz i inni, 2022, 2024, 2025; Naumowicz & Kowalczyk, 2025). Większość badań w tej pracy bazowało na przetwarzaniu satelitarnych i naziemnych pomiarów geodezyjnych oraz testowaniu metod ich integracji. Główne metody badawcze opierały się na:

- przetwarzaniu obserwacji geodezyjnych;
- ocenie przydatności wybranych metod do realizacji celu rozprawy;
- testowaniu różnych wariantów i konfiguracji danych;
- testowaniu i ocenie statystycznej metod transformacji matematycznej;
- ocenie lokalizacji i konfiguracji punktów dostosowania;
- porównaniu i ocenie jakościowej metod integracji danych;
- ocenie dokładności i analizach statystycznych;
- analizie wpływu czynników geologicznych, tektonicznych i hydrologicznych na wyznaczone prędkości pionowe;
- ocenie wzajemnej zależności pomiędzy wartościami ruchu pionowego wyznaczonego z różnych zestawów danych.

Badania zaplanowane w niniejszej rozprawie doktorskiej podzielono na 4 etapy badawcze przedstawione na Rysunku 5.



Rys. 5. Etapy badań prowadzonych w ramach rozprawy doktorskiej z uwzględnieniem publikacji wchodzących w jej skład (źródło: opracowanie własne)

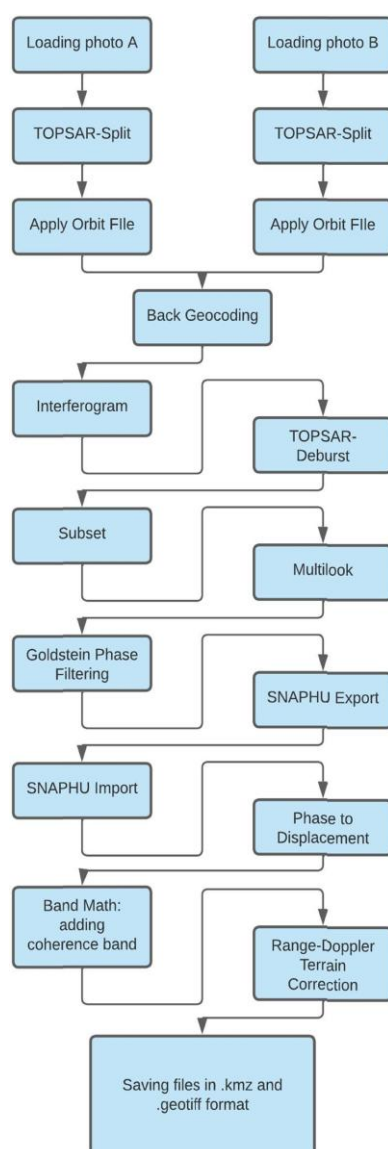
3.1 Ocena przydatności DInSAR w wyznaczeniu pionowych ruchów skorupy ziemskiej (P1)

InSAR wykorzystuje rejestracje SAR, wykonywane sekwencyjnie za pomocą jednej anteny SAR podczas kolejnych przelotów satelity nad tym samym obszarem (tzw. różnicowa interferometria SAR - DInSAR). Na podstawie różnic fazowych odpowiednich sygnałów radarowych z kolejnych obrazów SAR uzyskuje się informacje o względnych wartościach wysokości powierzchni terenu lub jej zmianach w czasie (Meng i inni, 2012). Metodę tę wybrano w celu sprawdzenia jej przydatności do monitorowania i badania VCM na dużych obszarach.

Technologia SAR opiera się na falach elektromagnetycznych (radarowych) o różnych pasmach (długościach fal) i mierzy czas powrotu fali odbitej. Każda fala ma sinusoidalny wzór, który ma wyraźne wartości minimalne i maksymalne mieszczące się w przedziale od $-\pi$ do $+\pi$. Sygnał odbity od powierzchni Ziemi jest rejestrowany w postaci złożonej, zachowując swoją fazę i amplitudę (Hanssen, 2002). Przetwarzanie interferometryczne danych SAR oblicza różnice fazowe między dwoma obrazami SAR. Wynikiem tego przetwarzania jest obraz różnic

fazowych, zwany interferogramem. Jest to obraz, który jest sumą wielu czynników. Najważniejsze z nich to składnik geometryczny (topografia terenu), składnik deformacji (ruchy pionowe i poziome między pozyskaniem danych), warunki atmosferyczne, pokrywa śnieżna, stała dielektryczna gruntu oraz odległość przestrzenna między satelitami wykonującymi dane zdjęcie. W zależności od tego, co chcemy zbadać, niektóre z powyższych wartości mogą być uznane za „szum” lub pominięte jako nieistotne (Osmanoğlu i inni, 2016). Do analizy i przetwarzania obrazów wykorzystano bezpłatne oprogramowanie SNAP 8.0.9 od ESA wraz z SNAPHU Unwrapping 8.0.0 oraz system operacyjny Linux Ubuntu 18.04.6 LTS.

Metodologia badania opierała się na „Sentinel-1 Toolbox Interferometry Tutorial” (Luis Veci, 2015) oraz własnych doświadczeniach. Ze względu na wykorzystanie w tym badaniu zdjęć SLC z misji Sentinel-1, przeprowadzono działania przedstawione na Rysunku 6.



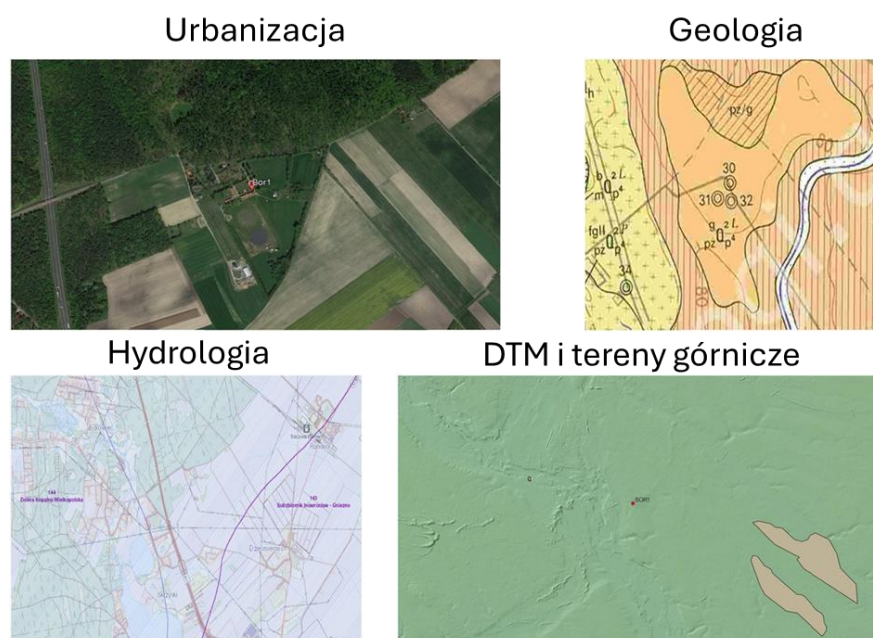
Rys. 6. Schemat metodologii i procesu badawczego (źródło: Naumowicz i inni, 2022)

Po przeanalizowaniu dostępności danych i przeprowadzeniu testów zgodności obrazów określono możliwe do zidentyfikowania przedziały czasowe i zebrano pary zdjęć dla 4 stacji wraz z oznaczeniem orbit wznoszących i opadających. W kolejnym kroku dokonano korekty orbity i przeprowadzono automatyczną korektę zdjęć. Wykorzystano do tego pełne obrazy. Obliczono współczynnik korelacji fazy interferometrycznej pary obrazów SAR. Następnie usunięto luki w pasmach i zapisano je w danych źródłowych. Przycięte obrazy poddano redukcji szumu (Multilooking) i filtrowaniu (filtrowanie fazowe Goldsteina). Dla wszystkich par obrazów zastosowano te same parametry. Przed ostatecznym rozpakowaniem fazy przeprowadzono dodatkowe testy i próby parametrów. Dla każdego obrazu przeprowadzono niezależne testy (z różnymi zestawami parametrów). Ostatecznie zdecydowano się zastosować wspólne ustawienia (tryb kosztu statystycznego jako tryb deformacji [DEFO] we wszystkich obrazach). W kolejnym etapie przetwarzania danych wartości fazowe zostały przekształcone na wartości przemieszczenia. Do obrazów dodano warstwę zawierającą wartości spójności. W celu skompensowania zniekształceń spowodowanych kątami padania fal radarowych innymi niż kąt nadiru, topografia terenu i nachylenie satelity, zastosowano korekcję terenu metodą Range-Doppler. Dodano maskę filtrującą dla punktów o współczynniku spójności ≥ 0.2 (Hanssen, 2002), aby wykluczyć wartości o najniższym prawdopodobieństwie. Kolejnym etapem było odczytanie wartości przemieszczenia terenu wokół stacji i w jej obrębie, w kierunku linii widoczności satelity (LOS). Ze względu na niejednoznaczność i różnorodność wartości przemieszczenia w przestrzeni zdecydowano się na zastosowanie dodatkowego testu weryfikacyjnego. Test polegał na określeniu wartości przemieszczenia z kilku sąsiednich pikseli wokół współrzędnych stacji (kwadrat o wymiarach 5×5 pikseli – obszar około 25×100 m). Wartości przemieszczenia zostały określone przy użyciu średniej ważonej. Otrzymane wyniki zestawiono z przygotowanymi wartościami ruchu pionowego obliczonego z danych GNSS.

3.1.1 Obliczenie ruchów pionowych skorupy ziemskiej przy użyciu metody DInSAR w czterech lokalizacjach polskich stacji GNSS: Borowa Góra, Borowiec, Lamkówko i Józefosław

Do realizacji etapu 1, wykorzystano 4 punkty podstawowej sieci wysokościowej jako jedne z najważniejszych punktów głównych (Ministerstwo Administracji i Cyfryzacji, 2012; Ustawa Prawo Geodezyjne i Kartograficzne, 2021). Punkty te należą do sieci ASG-EUPOS, sieci permanentnej GNSS EUREF (EPN) oraz są to stacje włączone do IGS: Borowiec (BOR1, Polska), Borowa Góra (BOGI, Polska), Lamkówko (LAMA, Polska) i Józefosław (JOZ2, Polska). Punkty te są umieszczone na litej skale, dachach budynków, lub słupach

zamontowanych na fundamentach zagłębionych poniżej poziomu zamarzania gruntu. W każdym punkcie znajduje się stacja GNSS z różnego typu antenami umieszczonymi na różnych wysokościach (na słupie lub dachu budynku). Każda stacja GNSS znajduje się na innym podłożu tektonicznym i geologicznym, o różnych warunkach wodnych, antropogenicznych i glebowych. Pozwala nam to analizować, jak czynniki te wpływają na wyniki DInSAR. Punkty te wybrano także pod kątem oceny ich przydatności jako punkty dostosowania w etapie 3 i 4. Przykładową charakterystykę otoczenia wokół stacji BOR1 przedstawia Rys 7.



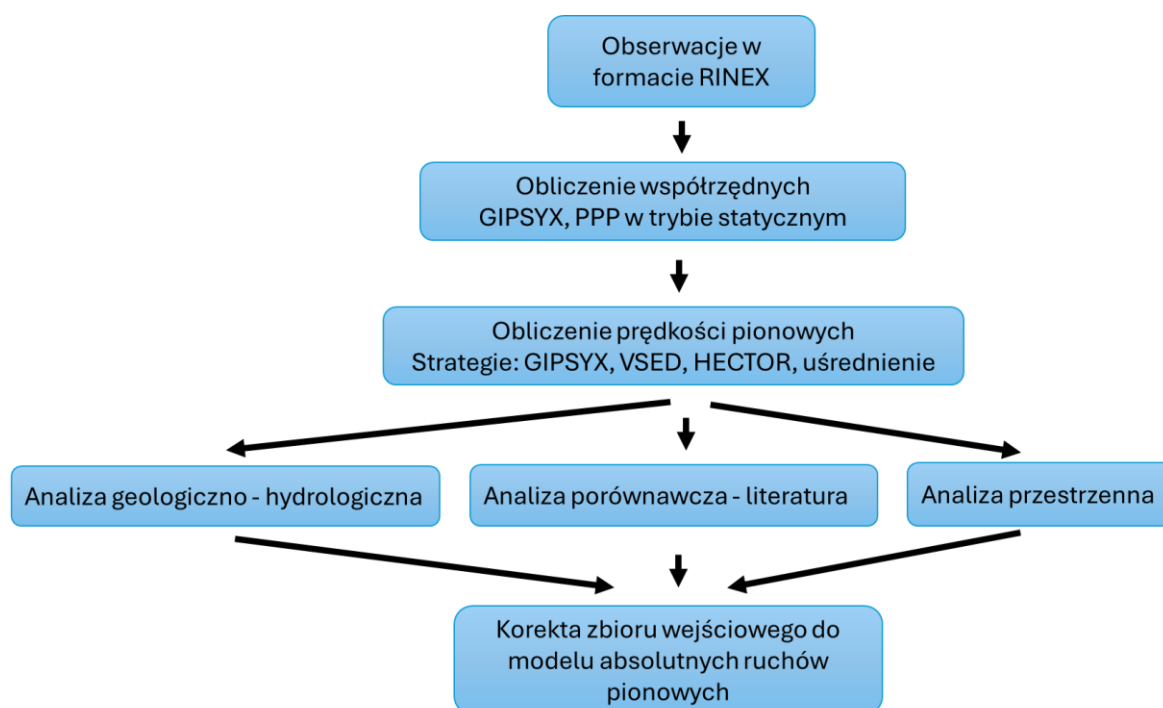
Rys. 7. Charakterystyka otoczenia wokół stacji GNSS Borowiec - BOR1 (źródło: Naumowicz i inni, 2022)

Jako dane satelitarne wykorzystano dostępne dane z misji Sentinel-1, pierwszy z dwóch satelitów (S1A) został wystrzelony 3 kwietnia 2014 r., a drugi (S1B) 22 kwietnia 2016 r. Radar ten emituje fale w paśmie C o częstotliwości 5.3 GHz (długość fali około 5,6 cm) (http://esards.eo.esa.int/socat/SAR-ASA_IMS_1P/pair_search). Do celów niniejszej analizy wykorzystano 24 obrazy radarowe ze źródeł ogólnodostępnych. Obrazy wykorzystane w niniejszym badaniu są produktami typu Single Look Complex (SLC). Odstęp czasowy między pozyskaniem obrazów satelitarnych różni się w zależności od stacji, ale wszystkie pary zostały skomponowane na podstawie obrazów z 2020 r. Obrazy analizowano w obszarze 10km wokół wybranych stacji. Do porównania wybrano cztery stacje sieci ASG-EUPOS (BOR1, BOGI, LAMA i JOZ2) wraz z otaczającym je obszarem o średnicy około 10 km (K. Kowalczyk, Kowalczyk, i inni, 2021). Umożliwia to śledzenie zachowania skorupy ziemskiej wokół stacji i sprawdzenie wpływu pokrycia terenu na spójność zdjęć (Touzi i inni, 1999). Na stacji JOZ2 fundament anteny nie pokrywa się z punktem sieci podstawowej, są one od siebie oddalone o około 84 m, co zostało uwzględnione podczas odczytywania wyników.

Jako dane referencyjne wykorzystano szeregi czasowe GNSS PPP i oszacowano prędkości pionowe stacji BOR1, BOGI, LAMA i JOZ2. Surowe obserwacje GNSS z poszczególnych stacji uzyskano w postaci danych dziennych w skompresowanym formacie RINEX. Zostały one udostępnione do celów niniejszej pracy przez Główny Urząd Geodezji i Kartografii w Warszawie. Zakres danych obejmował lata 2010–2021, co daje ponad 4000 dni obserwacji. Surowe dane GNSS oraz szeregi czasowe zostały przetworzone w trybie PPP przy użyciu oprogramowania GipsyX opracowanego przez Jet Propulsion Laboratory (JPL) w systemie ITRF14. Produkty GNSS (modele anten, zegary efemeryd końcowych itp.) zostały pobrane z serwera JPL: https://sideshow.jpl.nasa.gov/pub/JPL_GNSS_Products/Final. W procesie obliczeń uwzględniono wykrywanie nieciągłości, określenie sezonowości, usuwanie wartości odstających. Użyto także danych w postaci współrzędnych z NGL, które także były obliczone metodą PPP. Dane zostały uzyskane ze strony <http://geodesy.unr.edu/index.php> dla BOR1 (1994–2022), BOGI (2001–2022), LAMA (1994–2022) i JOZ2 (2002–2022).

3.2 Opracowanie absolutnych ruchów pionowych skorupy ziemskiej dla obszaru Polski opartych na rozwiązaniu PPP z danych GNSS wraz z analizą wpływu czynników geologicznych, tektonicznych i hydrologicznych na wyznaczone prędkości pionowe (P2)

Przetworzone surowe obserwacje GNSS dla 100 stacji w postaci szeregów czasowych współrzędnych wysokościowych poddano dekompozycji. Ma ona na celu uzupełnienie brakujących wartości w szeregach czasowych, usunięcie skoków i wartości odstających, eliminację szumu, a ostatecznie, wyznaczenie trendu zmian. W tym badaniu założono, że wartości współrzędnych zmieniają się liniowo. W zależności od przyjętych metod i kryteriów eliminacji poszczególnych czynników można otrzymać inny wynik końcowy. Na wynik wpływa także zastosowanie modeli matematycznych opracowanych przez różnych badaczy. Na Rysunku 8 pokazano schemat metodologii i procesu badawczego.



Rys. 8. Schemat metodologii i procesu badawczego (źródło: Naumowicz i inni, 2024)

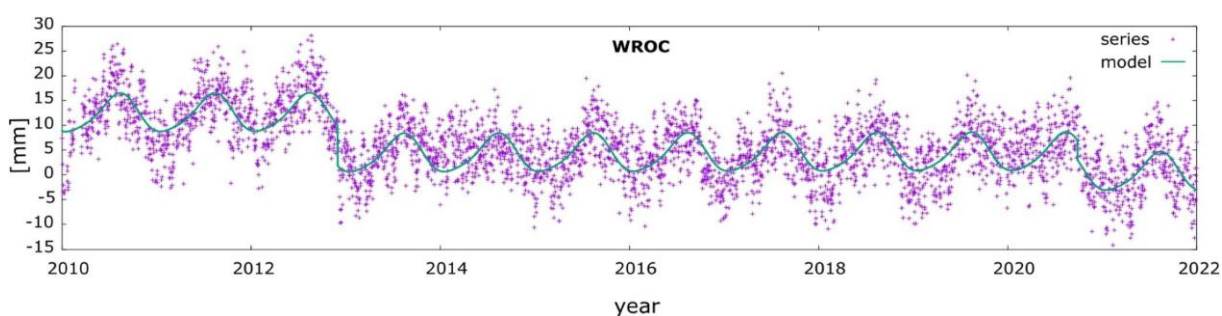
Ruchy pionowe wyznaczono przy użyciu trzech strategii obliczeniowych. Czwarta strategia łączyła otrzymane wyniki. Pierwsza strategia (GIPSYX) opierała się na metodologii przedstawionej w (Bertiger i inni, 2020). Druga strategia (Hector) była zgodna z Bos i inni, 2013, z uwzględnieniem Klos i inni, 2018. Trzecia strategia (VSED) była zgodna z K. Kowalczyk & Rapinski, 2018. Czwarta strategia (WAV) jest kombinacją wyników z pozostałych trzech strategii na podstawie Piña-Valdés i inni, 2022.

Przeprowadzono analizę niezawodności i szacowania prędkości na poszczególnych stacjach GNSS. Dla każdej stacji obliczono średnią prędkość ważoną. Jako wagi przyjęto błędy standardowe prędkości obliczone dla każdej stacji w strategiach 1-3. Wykonano analizę regresji wielorakiej i analizę korelacji. Sporządzono statystyki opisowe. Dane przeanalizowano pod kątem skośności i kurtozy, a także anizotropii.

Dodatkowo otrzymane wyniki skonfrontowano z wynikami uzyskanymi przez innych badaczy. Każdą ze stacji przeanalizowano pod kątem otoczenia: geologicznego, tektonicznego, hydrologicznego i antropogenicznego.

3.2.1 Obliczenie absolutnych ruchów pionowych skorupy ziemskiej na stacjach polskiej sieci ASG EUPOS wraz analizą wpływu czynników geologicznych, tektonicznych i hydrologicznych na wyznaczone prędkości pionowe

Do realizacji etapu 2, podobnie jak w etapie 1, wykorzystano surowe obserwacje GNSS w formacie RINEX udostępnione przez Główny Urząd Geodezji i Kartografii w Warszawie. Surowe dane GNSS zostały przetworzone na szeregi czasowe współrzędnych przy użyciu oprogramowania GipsyX (Bertiger i inni, 2020) w trybie statycznym, z wykorzystaniem systemu ITRF2014 (Altamimi i inni, 2016). Wykorzystano obliczenia zarówno GPS, jak i multi-GNSS. Dane obejmują codzienne obserwacje z ponad 100 permanentnych stacji GNSS z około 11 lat (od pełnego wdrożenia systemu do 2021r.). Łącznie przeprowadzono ponad 4000 obliczeń dla każdej stacji, co wymagało wykonania procedury ponad 400 000 razy dla 100 stacji. Wykorzystano dwuczęstotliwościowe obserwacje fazowe wraz z precyzyjnymi orbitami JPL (pliki .sp3) i zegarami (pliki .clk) (Kouba, 2003). Pozostałe parametry przyjęto zgodnie z artykułem (Łyszkowicz i inni, 2021). W celu zmniejszenia błędu jonosferycznego zastosowano kombinację liniową wolną od jonosfery, jednocześnie szacując troposferyczne opóźnienie zenitalne. Interwał przetwarzania wynosił 30 sekund, a maska elewacji 10° . W rezultacie utworzono 100 szeregów czasowych współrzędnych wysokościowych, po jednym dla każdej stacji GNSS (Rys. 9).



Rys. 9. Przykłady szeregów czasowych dla współrzędnych wysokościowych określonych metodą PPP z dopasowanym trendem. Dane opracowane za pomocą oprogramowania GipsyX (źródło: Naumowicz i inni, 2024)

Szeregi czasowe charakteryzowały się niewielkimi lukami w danych, skokami pionowymi, zmienną amplitudą i wartościami odstającymi – zwłaszcza w początkowej fazie uruchomienia stacji.

3.3 Selekcja metod integracji danych niwelacyjnych i GNSS wraz z oceną wpływu lokalizacji punktów dostosowania na wynik integracji (P3)

Przed przystąpieniem do zaplanowanych badań przeprowadzono analizę wad i zalet wyznaczania ruchów pionowych skorupy ziemskiej na podstawie różnych geodezyjnych zbiorów danych pomiarowych (Tab. 1).

Tab. 1. Wady i zalety wyznaczania ruchów pionowych skorupy ziemskiej na podstawie różnych geodezyjnych zbiorów danych pomiarowych (źródło: Naumowicz & Kowalczyk, 2025)

Appl. Sci. 2025, 15, 8224

4 of 24

Table 1. Disadvantages of methods for modeling vertical movements of the Earth's crust.

Leveling	low time resolution	hard-to-find archive material	labor-intensive calculations and data preparation	no stable points of reference over time	relative measurement only
GNSS	low spatial resolution	no physical network structure	accuracy depends on the length of station operation	sensitivity to local geotechnical effects or inherent movements	many variables affecting the result
Hybrid network-velocity averaging	sensitivity to outliers	additional analysis of variance required	statistical grouping and weighting of values	not very reliable accuracy	
Hybrid network-adjustment	sensitivity to incorrect input data	requires statistical assumptions	time required for data preparation	determining observation weights	high dependence on network configuration and 'fixed' points
Hybrid network-transformation	depends on the quality of input data	the need for even distribution of common points	non-modeling of non-linear deformations of the system		
Hybrid network-interpolation	sensitivity to outliers	overfitting	value estimation	sensitivity to point location and density	edge effect

Table 2. Advantages of methods for modeling vertical movements of the Earth's crust.

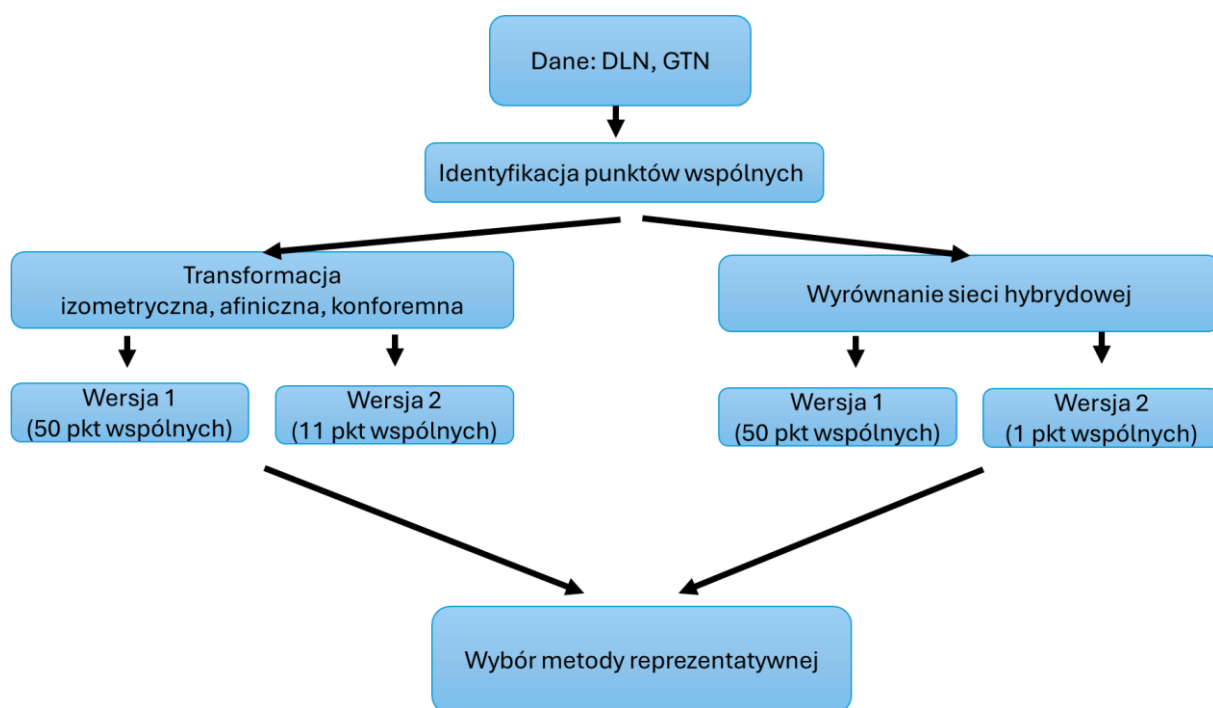
Leveling	high accuracy	direct measurement	error control	high measurement repeatability	high spatial resolution
GNSS	high time resolution	large spatial coverage (mountains, forests, cities)	high availability of collections		
hybrid network-	reduction in the impact of random errors	one value representative for the area			
velocity averaging	elimination of random errors	data control, possibility of weighting observations	statistical evaluation of results	one consistent frame of reference	geometric network consistency check
hybrid network-adjustment	no need to import data into a single reference system beforehand	allows one to combine archival data with contemporary data	increases spatial consistency	not very complicated preparation of input data	
hybrid network-transformation	completes values at any point	enables continuous modeling of the phenomenon	enables the creation of numerical models	wide range of interpolation methods	

Na podstawie literatury (K. Kowalczyk & Rapiński, 2013; Massonnet & Feigl, 1998; Peter J.G. Teunissen & Oliver Montenbruck, 2017; Piña-Valdés i inni, 2022; Pospíšil i inni, 2017; Roštínský i inni, 2020) metody integracji danych służące do określania ruchów pionowych skorupy ziemskiej można podzielić na pięć podejść. We wszystkich podejściach dane dotyczą ruchów pionowych w punktach (stacje GNSS, punkty węzłowe podwójnej niwelacji) lub między punktami. Do metod tych zaliczyć można:

- uśrednianie danych;
- transformację;
- interpolację;
- wyrównanie
- łączenie powyższych w różnej konfiguracji.

Metodologia opierała się głównie na testowaniu różnych wariantów i konfiguracji sieci hybrydowej oraz ocenie statystycznej otrzymanych wyników cząstkowych zarówno z transformacji jak i wyrównania sieci. Użyto trzech rodzajów transformacji: afinicznej, izometrycznej i konforemnej. Transformację wykonano z i bez korekty Hausbrandta. Wyrównanie natomiast przeprowadzono metodą najmniejszych kwadratów. Zarówno do transformacji jak i wyrównania wykorzystano oprogramowanie Geonet.

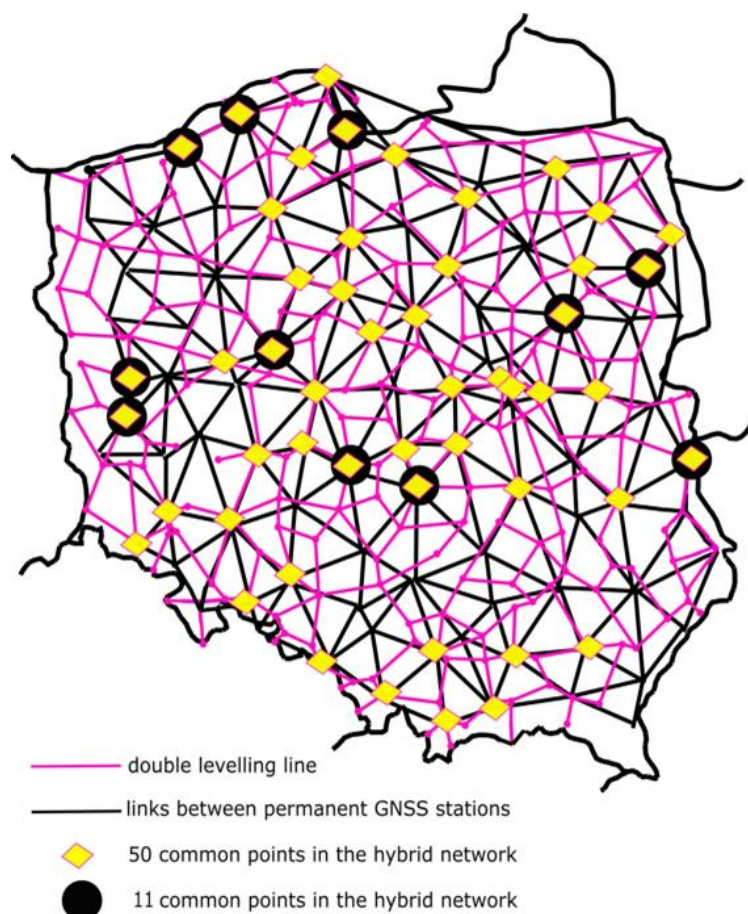
Przed przystąpieniem do prac badawczych przeprowadzono kontrolne wyrównanie sieci podwójnej niwelacji (DLN) oraz utworzonej sieci triangulacyjnej GNSS (GTN) w celu identyfikacji potencjalnych wartości odstających. Do oceny statystycznej wyrównania sieci hybrydowej wykorzystano statystyki opisowe, wskaźnik niezawodności, parametr Otrębskiego, średni współczynnik redukcji błędu obserwacyjnego. Do oceny statystycznej wyników transformacji zastosowano średni błąd jednostkowy oraz błąd transformacji. Wykonano także statystyki opisowe. Badania przeprowadzono zgodnie ze schematem (Rys. 10). Testowano także wyrównanie i transformację z różną liczbą punktów wspólnych. Do wyciągnięcia ostatecznych wniosków przeprowadzono analizę porównawczą wyników i dokładności oraz przeprowadzono ocenę parametrów po transformacji.



Rys. 10. Schemat metodologii i procesu badawczego (źródło: Naumowicz & Kowalczyk, 2025)

3.3.1 Wyznaczenie względnych ruchów pionowych skorupy ziemskiej na podstawie danych niwelacyjnych i GNSS

Do realizacji etapu 3 wykorzystano obliczone ruchy pionowe między wspólnymi punktami węzłowymi z kampanii niwelacyjnej nr 3 i nr 4 (K. Kowalczyk, 2005) oraz wyniki z **P2**. Pierwszy zestaw danych obejmował ruchy pionowe pomiędzy węzłami sieci podwójnej niwelacji określone podczas tworzenia modelu VCM2006 (K. Kowalczyk, 2005). Łączna liczba oczek w sieci podwójnej niwelacji wynosiła 128, a średni błąd „niezamknięcia” wynosił $\pm 0,15\text{mm/rok}$. W dwóch przypadkach został przekroczony błąd dopuszczalny. Sieć podwójnej niwelacji jest dowiązana do mareografu we Władysławowie, gdzie została określona średnia prędkość zmian poziomu Morza Bałtyckiego, przez co ruchy pionowe wyznaczone na podstawie tej sieci można traktować jako względne. Sieć podwójnej niwelacji (sieć ruchów pionowych) składa się łącznie z 366 wspólnych linii niwelacyjnych i 222 wspólnych punktów węzłowych (Rys. 11).



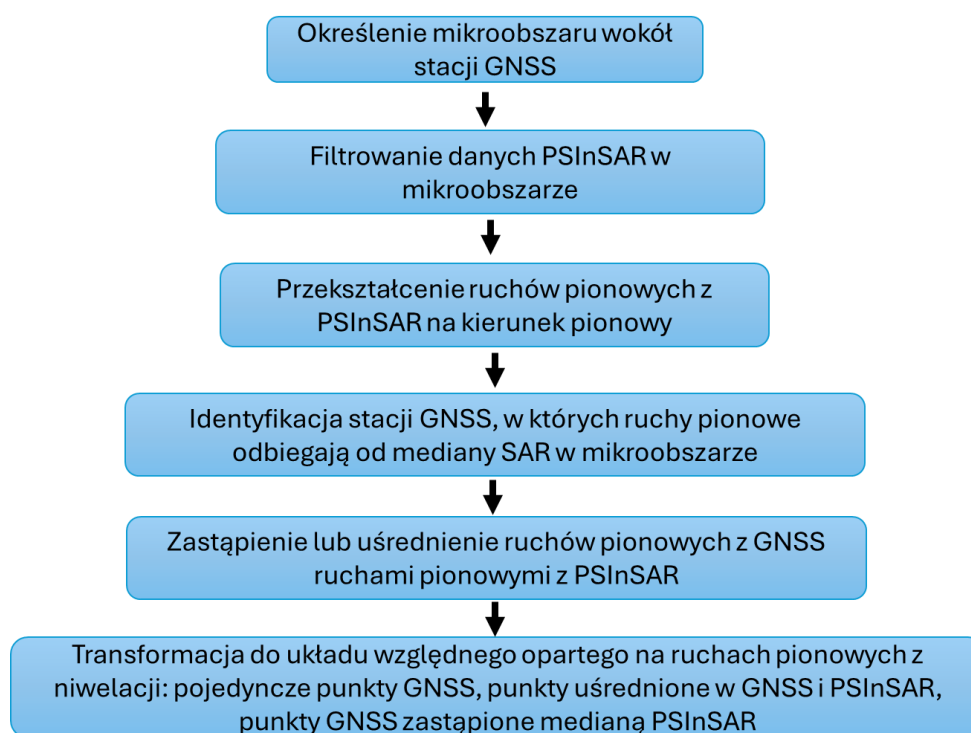
Rys. 11. Sieć utworzona na podstawie połączenia sieci GNSS i sieci podwójnej niwelacji z oznaczeniem punktów łącznych (źródło: Naumowicz i inni, 2024)

Jako drugi zestaw danych wykorzystano ruchy pionowe na 100 stacjach permanentnych polskiej sieci ASG EUPOS z lat 2011-2021 obliczone w etapie 2 niniejszej rozprawy

doktorskiej. Dane te zostały wykorzystane jako bezpośrednie ruchy pionowe na stacjach permanentnych w celach transformacji matematycznej. Bazując na rozwiązaniach K. Kowalczyk i inni, 2014; Pospíšil i inni, 2017 utworzono połączenia pomiędzy stacjami z wykorzystaniem triangulacji Delaunaya (Rys. 11) w celu przeprowadzenia łącznego wyrównania sieci hybrydowej. Bazując na publikacji Kowalczyk, Kowalczyk Rapiński 2021, zdefiniowano także punkty łączne w tak utworzonej sieci hybrydowej (Rys. 11).

3.4 Określenie buforu reprezentatywnego wokół stacji GNSS na podstawie danych PSInSAR wraz z oceną zależności pomiędzy ruchem pionowym na stacji GNSS, a ruchem pionowym w mikroobszarze (P4)

Na obszarze Polski zbiór punktów PS z produktu EGMS L3 obejmuje ponad 4 miliony punktów, a produkt L2a zawiera ich jeszcze więcej. Statystycznie, wokół każdej stacji GNSS znajduje się od kilkudziesięciu do kilkuset punktów PS. Badania przeprowadzono zgodnie ze schematem pokazanym na Rysunku 12.



Rys. 12. Schemat metodologii i procesu badawczego (źródło: Naumowicz i inni, 2025)

Do analizy wybrano stacje GNSS, które w poprzednich badaniach tego cyklu wykazywały ruchy pionowe odmienne od ogólnych trendów (Naumowicz i inni, 2024; Naumowicz & Kowalczyk, 2025; Piña-Valdés i inni, 2022). Do potwierdzenia odmienności

ruchów pionowych na tych stacjach GNSS, zastosowano autorską metodę porównania ruchów pionowych z danych GNSS i InSAR w mikroobszarach wokół stacji.

Procedura ta wymagała określenia wielkości mikroobszaru (bufora reprezentatywnego). W tym celu wykorzystano punkty MP (measurement point) z produktu EGMS L3, reprezentujące średnie wartości w polach siatki GRID o wymiarach 100×100m. Dobór bufora wokół stacji nie jest jednoznaczny, gdyż w jego granicach mogą znajdować się punkty o znacznie zróżnicowanych wartościach prędkości, zarówno dodatnich, jak i ujemnych. Analizowano bufor o promieniach 0.1km, 0.3km, 0.5km, 1km, 5km i 10km, wykorzystując punkty PS z produktu EGMS L3 (siatka 100×100m). Do wyznaczenia wartości reprezentatywnej prędkości pionowej z EGMS w buforze wokół polskich stacji ASG-EUPOS zastosowano medianę, co pozwoliło ograniczyć wpływ wartości odstających. Uzyskane wyniki porównano z medianą obliczoną dla bufora o promieniu 0.1km. Przeprowadzono ocenę korelacji dla poszczególnych buforów względem bufora reprezentacyjnego. Jako jedno z kryterium wybrano parametr RMSE.

W kolejnym kroku przeprowadzono analizę porównawczą ruchów pionowych wyznaczonych z danych GNSS i InSAR w buforze 0.3km. Wytypowano stacje, które wymagały szczegółowej analizy. W tym celu przeprowadzono dekompozycję danych EGMS L2a na komponent pionowy, według procedury stosowanej w produkcie EGMS L3 (ortho), jednak z zastosowaniem gęstszej siatki 25×25m, oraz bufora o promieniu 300 m (Alessandro Ferretti i inni, 2025). Konwersję prędkości w kierunku LOS na komponent pionowy wykonano zgodnie z procedurą EGMS L3, wykorzystując wzory dekompozycji opisane w Wieczorek, 2020.

Ostatecznie do wyznaczenia ruchów pionowych użyto trzech zestawów danych:

- **Zestaw nr 1:** Względne ruchy pionowe z danych niwelacyjnych odniesionych do poziomu Morza Bałtyckiego;
- **Zestaw nr 2:** Absolutne ruchy pionowe na stacjach GNSS (ASG-EUPOS);
- **Zestaw nr 3:** Absolutne ruchy pionowe w mikroobszarach wokół 23 stacji GNSS na podstawie danych EGMS L2a.

Zastosowano autorską procedurę integracji danych. Uśredniono wartości ruchów pionowych dla 9 stacji GNSS z zestawów 2 i 3, a dla 14 stacji o odmiennych ruchach zastąpiono dane GNSS danymi z zestawu 3. Jako kryterium zgodności użyto jednokrotność błędu mediany. Względne ruchy pionowe z danych niwelacyjnych przyjęto jako referencyjne.

Na podstawie literatury **P3** do łączenia danych zastosowano transformację afiniczną przy zachowaniu stałości punktów dostosowania, wykorzystując 11 punktów łącznych. Punkty te zostały zdefiniowane jako tzw. pseudo-nodal points (Bednarczyk i inni, 2018) oraz wyznaczone na podstawie teorii sieci bezskalowej (A. M. Kowalczyk & Bajerowski, 2020). Wyniki poddano ocenie statystycznej na podstawie błędu średniego jednostkowego, błędu transformacji dla pojedynczego punktu oraz błędu maksymalnego.

3.4.1 Wyznaczenie względnych ruchów pionowych skorupy ziemskiej na podstawie danych niwelacyjnych, GNSS i PSInSAR

Do realizacji etapu 4 wykorzystano obliczone względne ruchy pionowe na punktach węzłowych podwójnej niwelacji obliczonej w etapie 3 (Naumowicz & Kowalczyk, 2025) oraz ruchy pionowe na stacjach sieci ASG-EUPOS wyznaczone w etapie 2 (Naumowicz i inni, 2024).

Trzeci zestaw danych obejmuje prędkości pionowe powierzchni Ziemi pozyskane z EGMS, będącego częścią programu Copernicus. Dane pochodzą z satelitów Sentinel-1, wyposażonych w radar z syntetyczną aperturą działający w paśmie C (C-band SAR). Obserwacje prowadzone są w trybie szerokiego pasa (Interferometric Wide Swath - IW), z przestrzenną rozdzielczością około 20 metrów wzdłuż toru lotu i 5 metrów poprzecznie do toru lotu. Wiarygodność danych zapewniona jest przez nadmiarowość obrazową, wynikającą z wzajemnego pokrycia się ścieżek satelitarnych. Porównanie danych realizowane jest na podstawie tzw. pseudo-PS, czyli zestawów punktów pomiarowych identyfikowanych na regularnych płatach terenu o wymiarach 100×100m. Produkt EGMS L2a (Basic InSAR) zawiera pomiary ruchu względnego w linii widzenia (LOS) między parami punktów w różnych datach akwizycji. Wszystkie pomiary są odniesione do elipsoidy. Każdy obszar przetwarzania ma lokalny punkt odniesienia, co utrudnia bezpośrednie porównanie z innymi danymi geodezyjnymi. (Del Soldato i inni, 2021).

Produkt EGMS Ortho (L3) oparty na dekompozycji skalibrowanego produktu L2b dostarcza warstwy geoprzestrzenne z przesunięciami pionowymi i wschód-zachód w siatce 100×100m. Wszystkie punkty pomiarowe należące do tej samej komórki siatki i tej samej geometrii akwizycji są uśredniane, tworząc pojedynczą serię czasową deformacji (Alessandro Ferretti i inni, 2025). Dla Polski produkt EGMS L3 zawiera ponad 4 milionów punktów. Krótką charakterystykę wykorzystanych danych pokazano w Tabeli 2.

Tab. 2. Charakterystyka wykorzystanych danych (*źródło: opracowanie własne*)

Dane	Układ odniesienia	Gęstość punktów	Ilość punktów	Typ danych	Epoki pomiarowe [lata]
Niwelacyjne	względny	1pkt/6km	366	wyrównanie	1974-1982, 1997-2003
GNSS	absolutny	1pkt/30km	101	Szereg czasowy	2011–2021
EGMS L3	absolutny	13pkt/1km	~ 4 mln	Szereg czasowy	2018-2022

4. Wyniki

4.1 Możliwość wykorzystania metody DInSAR w badaniach pionowych ruchów skorupy ziemskiej z wykorzystaniem danych Sentinel-1 (P1)

Celem zawartym w **P1** było zbadanie możliwości wykorzystania danych z różnicowego interferometrycznego radaru z syntetyczną aperturą (DInSAR) do wyznaczania ruchów pionowych skorupy ziemskiej (VCM).

Otrzymano prędkości pionowe na czterech stacjach permanentnych GNSS włączonych do systemu ASG-EUPOS obliczone przez dwa ośrodki naukowe (UWM i NGL) w większości nie są spójne. Jedynie dla stacji JOZ2 i BOGI wyniki są do siebie zbliżone i przedstawione w Tabeli 3.

Tab. 3. Wyniki obliczonych prędkości pionowych na czterech stacjach permanentnych GNSS z podziałem na ośrodki przeprowadzające analizę (*źródło: opracowanie własne*)

Stacja	UWM [mm/r]	NGL [mm/r]
BOR1	0.25 ± 0.01	-0.48 ± 0.42
BOGI	0.31 ± 0.02	0.64 ± 0.61
LAMA	0.53 ± 0.02	-0.28 ± 0.48
JOZ2	-0.47 ± 0.02	-0.54 ± 0.52

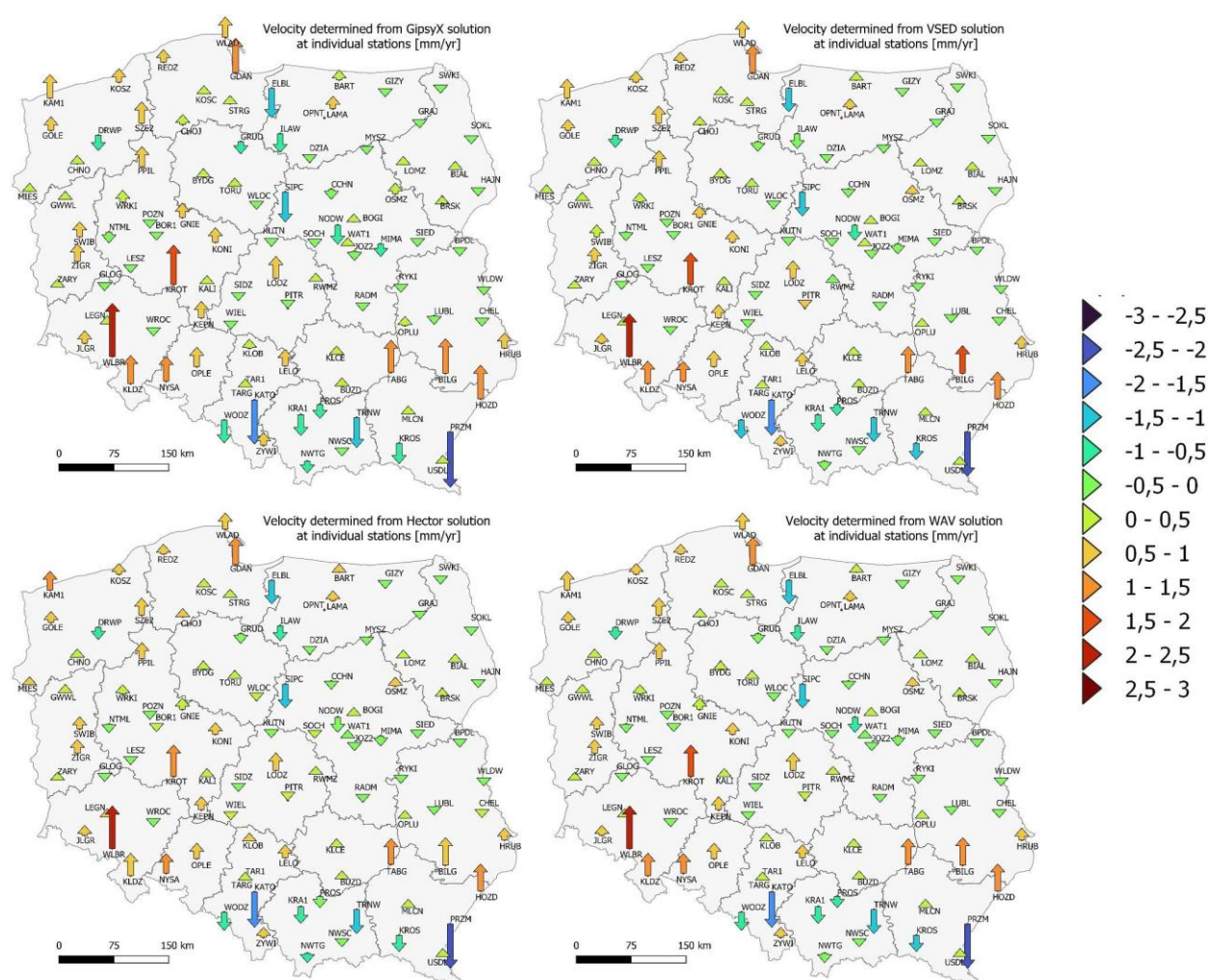
Różnice w przemieszczeniu pionowym określonymi trzema metodami są bardzo zróżnicowane. Przy bazie czasowej wynoszącej 336 dni różnice między SAR, a PPP (zarówno UWM, jak i NGL) wynoszą od około 20 mm (BOGI) do około 170 mm (BOR1). Przy 24-dniowej podstawie czasowej różnice te są mniejsze i wynoszą od około -25 mm (LAMA) do około 60 mm (BOGI). Przy 12-dniowej podstawie czasowej wartości są jeszcze mniejsze: od około 7 mm (BOR1) do około 55 mm (BOGI), z jednym wyjątkiem – JOZ2 o wartości 161 mm. Statystycznie mniejsze różnice występują przy krótszych podstawach czasowych obrazów, co wynika z lepszego dopasowania zdjęć i mniejszych różnic, które mogły wystąpić w danym obszarze.

Dzięki temu, cel cząstkowy C1 został osiągnięty.

4.2 Ruchy pionowe skorupy ziemskiej w Polsce oparte na rozwiązaniu PPP z uwzględnieniem informacji geologicznych, tektonicznych, hydrologicznych i mineralnych (P2)

Celem zawartym w P2 było opracowanie aktualnych, absolutnych ruchów pionowych skorupy ziemskiej (VCM) w nowym układzie współrzędnych ITRF2014 na podstawie różnych metod wyznaczania prędkości z szeregów czasowych GNSS.

W wyniku niniejszego badania uzyskano cztery zestawy prędkości stacji GNSS (Rys. 13), które nie różnią się znacząco dla przyjętych strategii. Istotne rozbieżności zanotowano dla 5 stacji (KUTN, MYSZ, PRZM, WLBR, WROC).



Rys. 13. Prędkość na stacjach AG-EUPOS określona na podstawie 4 strategii w poszczególnych stacjach (mm/rok) (źródło: Naumowicz i inni, 2024)

Wielowymiarowa analiza regresji i korelacji wykazała wysoki poziom spójności poszczególnych zestawów danych. Dopasowanie było bardzo wysokie, a współczynnik R2

zbliżony do 1. We wszystkich zestawach danych wystąpiła jedna znacząca wartość odstająca (stacja WLBR).

We wszystkich strategiach występuje niewielka lewostronność, tzn. wartości są nieco powyżej średniej. Wskazuje to, że na wartość średnią wpływają indywidualne wartości odstające powyżej mediany. Najmniejsza kurtoza dotyczy wyników strategii VSED, a największa – strategii Hector. Pozostałe dwie strategie mają podobny rozkład wyników. We wszystkich strategiach rozkład jest leptokurtyczny (smukły).

Odchylenie standardowe wyznaczonych ruchów pionowych dla większości przyjmuje wartość 0.1mm/rok, w pojedynczych przypadkach osiąga wartość 0.2mm/rok.

Analiza otrzymanych wyników pokazuje, że większość prędkości i kierunków jest zgodna z wynikami innych badaczy. Prędkości na kilku stacjach są wyższe niż w pozostałych. Największe podobieństwo uzyskano w porównaniu z wynikami (Piña-Valdés i inni, 2022) pomimo dużych błędów wyznaczenia oraz ze stacjami EPN w (Łyszkowicz i inni, 2021). Analiza przestrzenna wykazała, że dla 20 stacji, prędkości nie odzwierciedlają ruchu skorupy ziemskiej, a jedynie ruch powierzchni Ziemi lub ruch własny.

Analiza geologiczno-hydrologiczna wykazała, że stacje KROL i LAMA wykazują większe ruchy pionowe niż pozostała część regionu.

Dzięki temu, cel cząstkowy C2 został osiągnięty.

4.3 Integracja danych z niwelacji i GNSS w celu opracowania względnych ruchów pionowych skorupy ziemskiej przy użyciu sieci hybrydowych (P3)

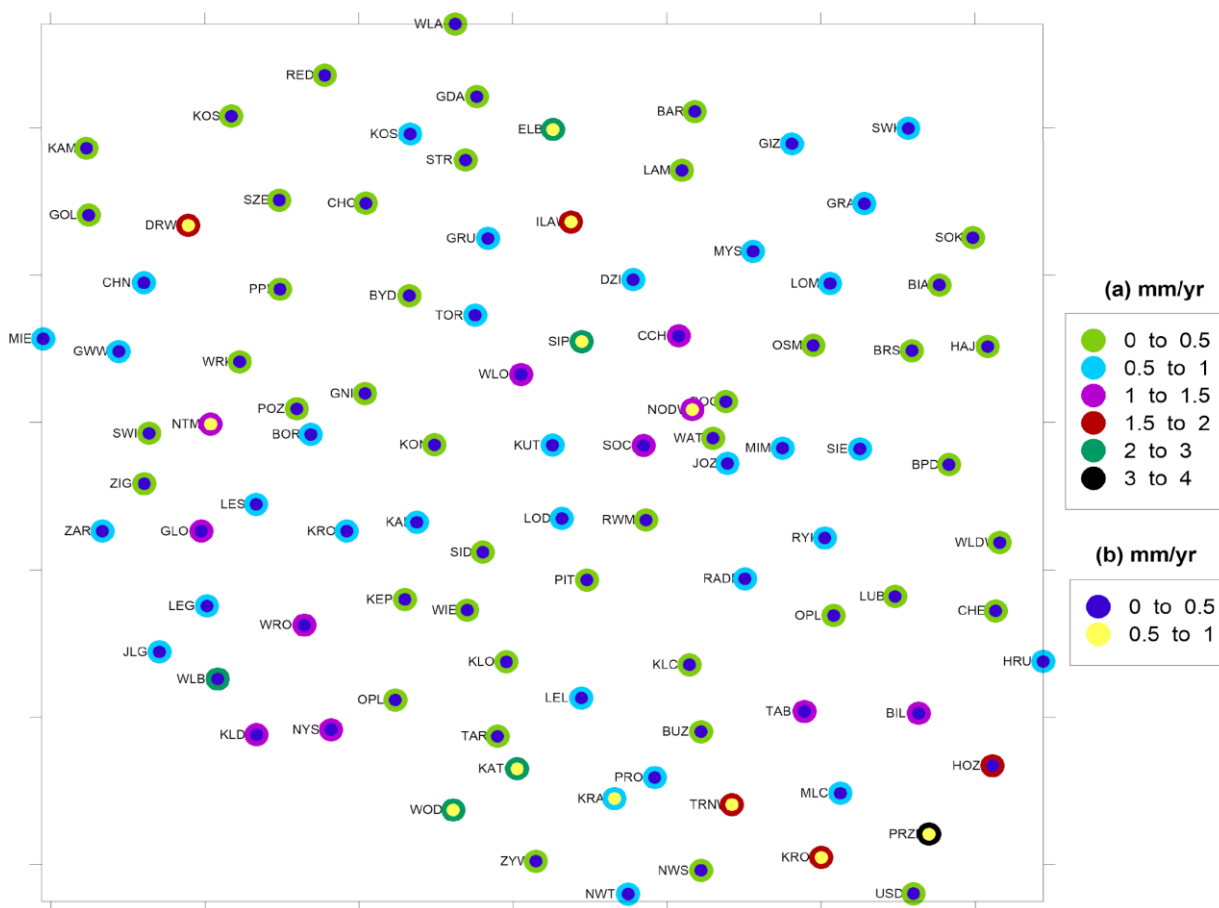
Celem zawartym w **P3** było zbadanie możliwości integracji pionowych ruchów skorupy ziemskiej opracowanych na podstawie dwóch niezależnych zestawów danych (niwelacja i dane GNSS PPP) z użyciem metody wyrównania sieci (metoda nieliniowa) i transformacji matematycznej.

Średnie błędy uzyskane z wyrównania sieci hybrydowej w wersji 2 (11 pkt wspólnych) są najbliższe rozkładowi normalnemu. Ogólne wartości błędów wyrównania w wersji 2 nie różniły się znacząco od błędów uzyskanych przy użyciu 50 wspólnych punktów – wersja 1. Nieznacznie poprawił się wskaźnik niezawodności oraz średni współczynnik redukcji błędu obserwacyjnego.

Zastosowanie teorii sieci bezskalowych pozwoliło na wybór punktów, które mają największy wpływ na strukturę sieci i nie są losowe.

Analiza wpływu rozmieszczenia punktów dopasowania na przykładzie transformacji afinicznej wykazała, że zmniejszenie liczby punktów dopasowania nie spowodowało wzrostu błędów transformacji. To, że punkty dopasowania nie były równomiernie rozmieszczone na badanym obszarze, nie wpłynęło na wyniki analizy.

Zmniejszenie do 11 punktów dostosowania w transformacji spowodowało zmniejszenie średniego błędu jednostkowego oraz błędu transformacji we wszystkich trzech użytych metodach (izometryczna, konforemna, afiniczna). Z punktu widzenia ruchów pionowych skorupy ziemskiej wszystkie metody transformacji można uznać za odpowiednie. W żadnej z metod mediana nie przekroczyła 0.5mm/rok. Jednak najlepsze dopasowanie otrzymano pomiędzy wyrównaniem sieci hybrydowej, a transformacją afiniczną (mediana 0.3mm/rok). Użycie korekty Hausbrandta nie wpłynęło znacząco na poprawienie wyników. Największe różnice występują w stacjach zidentyfikowanych w P2 jako wartości odstające (Rys. 14).



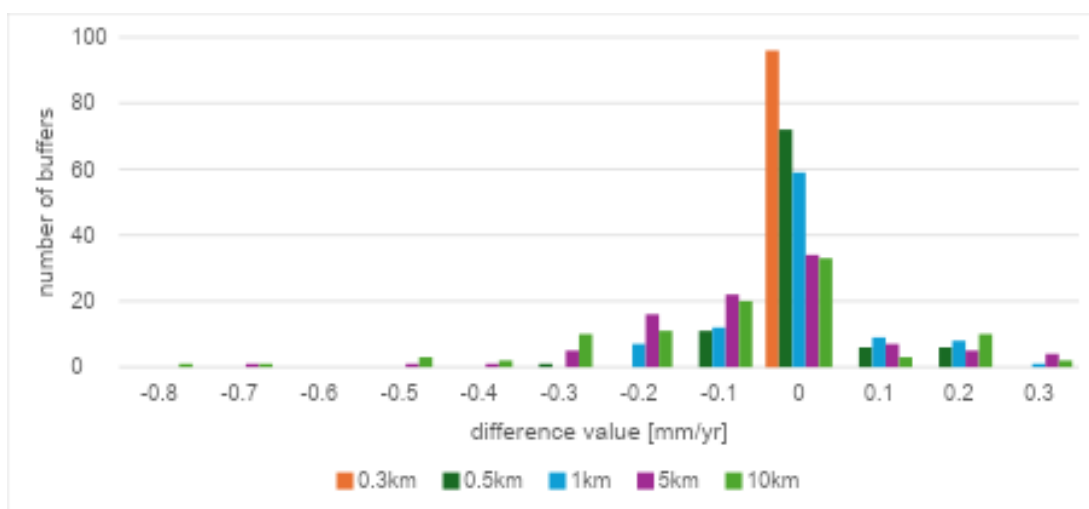
Rys. 14. Rozkład przestrzenny wyników obliczonych ruchów pionowych z transformacji afinicznej, a wyrównaniem sieci hybrydowej (wersja 1 – (a); wersja 2 – (b)) (źródło: Naumowicz & Kowalczyk, 2025)

Dzięki temu, cel cząstkowy C3 został osiągnięty.

4.4 Wykorzystanie danych hybrydowych: PSInSAR, GNSS i niwelacji w opracowaniu wyznaczeniu ruchów pionowych skorupy ziemskiej na obszarze Polski (P4)

Celem zawartym w **P4** było zbadanie możliwości wyznaczenia współczesnych względnych pionowych ruchów skorupy ziemskiej, opartego na danych z trzech źródeł: pomiarów GNSS (ASG-EUPOS), stałych rozpraszaczy techniki PsInSAR z produktów EGMS oraz pomiarów podwójnej niwelacji precyzyjnej.

Do wyznaczenia wartości reprezentatywnej prędkości pionowej z modelu EGMS w buforze wokół polskich stacji ASG-EUPOS zastosowano medianę, co pozwoliło ograniczyć wpływ wartości odstających. Na Rysunku 15 pokazano różnice wartości mediany w analizowanych buforach względem bufora o promieniu 0.1km. Bufory o promieniu powyżej 1km pokazały pojedyncze obszary, w których nie stwierdzono spójności zmian powierzchni skorupy ziemskiej wokół stacji GNSS. Mikroobszary te wymagają dodatkowej weryfikacji. Największa zgodność obserwowana była w przypadku punktów pomiarowych w mikroobszarach o promieniu bufora do 0.3km. Bufory 0.5km i 1km również wykazywały wysoką korelację w odniesieniu do buforów 0.1km i 0.3km, z pojedynczymi mikroobszarami, dla których różnice wynosiły ± 0.3 mm/rok. W przypadku buforów 5km i 10km ogólne dopasowanie do mediany z bufora 0.1km pozostawało dobre, jednak także tu występowały nieliczne obszary, z różnicą powyżej ± 0.3 mm/rok.



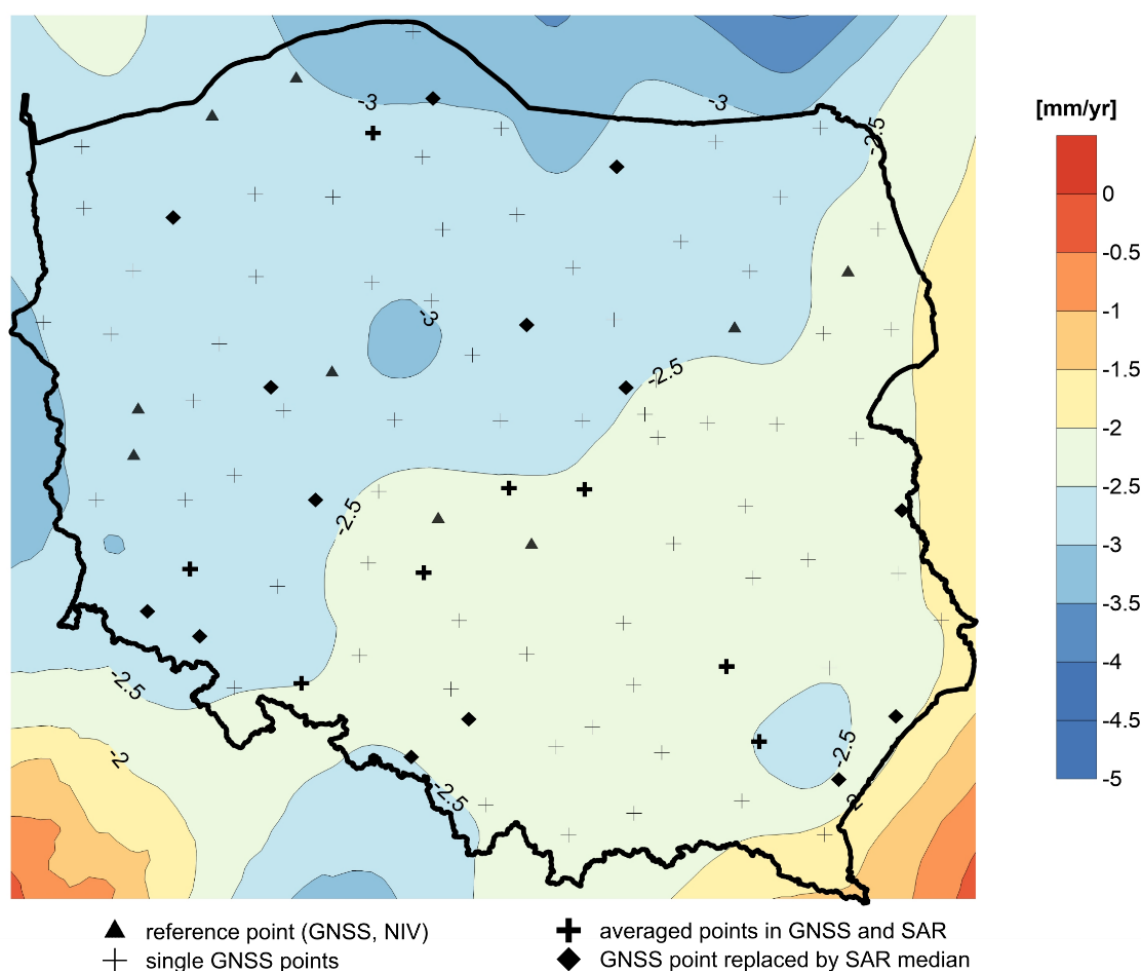
Rys. 15. Różnice wartości mediany w analizowanych buforach względem bufora o promieniu 0.1km (źródło: Naumowicz i inni, 2025)

RMSE dla analizowanych buforów wahał się od 0.5 dla buforu 0.1km-0.5km do 0.9 dla buforu 10km. Dla 23 stacji wytypowanych do sprawdzenia, najlepszą zgodność pomiędzy ruchem pionowym na stacji, a ruchem w jej otoczeniu (mikroobszarze) uzyskano dla stacji

RWMZ, MLCN i NYSA. Wyraźne ruchy ujemne potwierdzono dla stacji PRZM, oraz dodatnie dla stacji WLBR. Stacja LAMA jest trudna do weryfikacji z powodu braku stałych rozpraszaczy w mikroobszarze.

W wyniku przeprowadzonej transformacji ruchów absolutnych (PSInSAR, GNSS) uzyskano błąd średni jednostkowy $m_o = 0.17\text{mm/rok}$ oraz błąd transformacji dla pojedynczego punktu $m_t = 0.23\text{mm/rok}$. Maksymalny błąd dla pojedynczego punktu wyniósł 0.4mm/rok i dotyczył 4 punktów.

Ostateczny wynik pracy w postaci modelu współczesnych ruchów pionowych skorupy ziemskiej z użyciem danych hybrydowych przedstawia Rys. 16. Do budowy modelu wykorzystano local polynomial (Jianqing Fan, 2018). Metoda ta uwzględnia przestrzenną zmienność danych.



Rys. 16. Model współczesnych ruchów pionowych skorupy ziemskiej z użyciem danych hybrydowych (źródło: Naumowicz i inni, 2025)

W ten sposób, ostatni cel cząstkowy C4, został osiągnięty.

5. Dyskusja

Wyznaczone w ramach rozprawy pionowe ruchy skorupy ziemskiej w Polsce stanowią znaczący wkład w rozwój metod monitorowania procesów geodynamicznych w skali regionalnej. Uzyskane wyniki pozwalają na porównanie potencjału i ograniczeń różnych technik pomiarowych oraz ocenę ich przydatności w badaniach długookresowych i krótkookresowych deformacji.

Pierwsze wyznaczenie ruchów pionowych skorupy ziemskiej w Polsce zostało opracowane w 1961 roku (Niewiarowski & Wyrzykowski, 1961) na podstawie danych z powtarzanych kampanii niwelacji precyzyjnej. Najdokładniejszy model z powtarzanych danych niwelacyjnych został obliczony w 2006 roku (K. Kowalczyk, 2006). Pierwsze dokładne obliczenia ruchów pionowych z obserwacji GPS na obszarze Polski zostały opracowane w 2012 roku (Kontny & Bogusz, 2012). K. Kowalczyk, 2015, wykorzystał dane z Polskiej Aktywnej Sieci Geodezyjnej do wyznaczenia względnych pionowych ruchów skorupy ziemskiej w Polsce. Badanie to koncentrowało się na zmianach prędkości pionowej pomiędzy wybranymi stacjami ASG-EUPOS. W rezultacie oceniono i porównano kilka wersji względnych ruchów pionowych. W dotychczasowych badaniach do budowy jednego modelu wykorzystywano głównie jeden rodzaj danych (dane niwelacyjne lub GNSS). Podejmowano również próby kombinacji tych danych oraz wykorzystywano dane interferometrii radarowej na niewielkim obszarze. Stosowane rozwiązania PPP zaczerpnięte były z opracowanych szeregów czasowych współrzędnych z NGL. W roku 2021 (K. Kowalczyk, Pajak, i inni, 2021) przeprowadzono pierwsze udane testy nad badaniem zależności pomiędzy ruchami pionowymi wyznaczonymi z różnych zestawów danych na wybranych punktach wybrzeża Europy.

Analiza danych GNSS PPP potwierdziła wysoką stabilność tektoniczną Polski, wskazując, że tempo pionowych ruchów skorupy w większości obszarów kraju mieści się w zakresie -1mm/rok do $+1\text{ mm/rok}$ (Naumowicz i inni, 2024). Rezultaty te są zgodne z wcześniejszymi badaniami geodynamicznymi w Europie Środkowej i sugerują, że dominujące procesy deformacyjne w Polsce mają charakter lokalny i są związane głównie z działalnością górnictwem lub zmianami hydrologicznymi. Model absolutny uzyskany na podstawie PPP stanowi zatem stabilny punkt odniesienia dla dalszych analiz integracyjnych.

Włączenie zobrażeń radarowych Sentinel-1 (DInSAR) i produktów EGMS (PsInSAR) pozwoliło ocenić ich potencjał jako źródła danych uzupełniających. Wyniki wykazały zgodność kierunku przemieszczeń z obserwacjami GNSS, jednak różnice w wartościach

liczbowych wskazują na ograniczoną wiarygodność stosowania metody DInSAR (Naumowicz i inni, 2022). Warto podkreślić, że techniki InSAR znajdują szczególne zastosowanie w mikroobszarach, gdzie umożliwiają analizę deformacji na poziomie pojedynczych struktur geologicznych lub miejskich. Wyniki badań wpisują się w światowy trend rozwijania metod łączenia GNSS i InSAR w celu poprawy rozdzielczości przestrzennej modeli deformacyjnych.

Ze względu na brak najnowszych pomiarów niwelacyjnych wykorzystano dane już opracowane obejmujące obszar Polski w postaci sieci podwójnej niwelacji precyzyjnej. Zgodnie z ogólną wiedzą, ruch stacji permanentnych GNSS nie jest w pełni zależny od pionowego ruchu skorupy ziemskiej. Istnieje również kilka lokalnych antropogenicznych i naturalnych przyczyn przemieszczeń. Dlatego w rozprawie odniesiono się do geologicznego, hydrologicznego i antropogenicznego wpływu mikroobszarów wokół stacji sieci ASG-EUPOS na pionową prędkość stacji GNSS. Przeanalizowano także zależności pomiędzy ruchem pionowym z na punktach PS i ruchem stacji w ustalonym autorskim buforze.

Integracja danych GNSS i niwelacyjnych potwierdziła możliwość uzyskania bardzo wysokiej dokładności pionowych ruchów względnych. Testowane warianty transformacji matematycznych wykazały, że optymalnym rozwiązaniem jest transformacja afiniczna, która zapewniła średni błąd około 0.1mm/rok (Naumowicz & Kowalczyk, 2025). Istotnym elementem dyskusji jest wprowadzenie koncepcji punktów pseudowęzłowych, które umożliwiają bardziej elastyczne i precyzyjne łączenie danych z różnych źródeł. Wyniki te potwierdzają, że integracja GNSS i niwelacji stanowi kluczowy etap w opracowywaniu kompleksowych modeli hybrydowych.

Kulminacyjnym elementem badań było opracowanie hybrydowego modelu integrującego GNSS, PsInSAR i niwelację. Ostateczny model uzyskał średni błąd transformacji na poziomie 0.20mm/rok, co należy uznać za bardzo dobry wynik w skali krajowej (Naumowicz i inni, 2025). Warto podkreślić, że jest to pierwszy tego typu model w Polsce, który integruje trzy różne techniki pomiarowe w jeden spójny system. Wyniki te mogą mieć praktyczne zastosowanie zarówno w badaniach geodynamicznych, jak i w inżynierii lądowej, górnictwie oraz monitorowaniu ryzyka geologicznego.

Porównując uzyskane rezultaty z badaniami międzynarodowymi, można stwierdzić, że Polska wpisuje się w ogólną tendencję obserwowaną w Europie Środkowej i Północnej, gdzie dominują niewielkie wartości prędkości pionowych, a istotne deformacje mają charakter lokalny. Integracja GNSS, InSAR i niwelacji, zaproponowana w ramach niniejszej rozprawy, odpowiada światowym standardom w zakresie tworzenia kompleksowych modeli

deformacyjnych i może być rozwinięta w przyszłości o dodatkowe źródła danych, takie jak grawimetria satelitarna czy modelowanie numeryczne procesów geologicznych. Strategia i metoda badawcza opracowane w rozprawie doktorskiej, wraz z oceną dokładności, będą miały znaczący wpływ na międzynarodowe badania w obszarach charakteryzujących się niewielkimi ruchami tektonicznymi i izostatycznymi. W rozprawie doktorskiej zastosowano unikalne, niezrealizowane jeszcze na świecie podejście integracji tak dużej liczby różnych zbiorów danych.

6. Podsumowanie i wnioski

Jak pokazują wyniki, rozbieżność wartości przemieszczenia różni się między wynikami DInSAR i PPP. Wartości przemieszczenia uzyskane metodą DInSAR są czasami kilkakrotnie większe, niż w przypadku metod PPP. Jak pokazują wyniki (Kontny & Bogusz, 2012; K. Kowalczyk, 2005; Łyszkowicz i inni, 2021), ruchy w czterech wybranych stacjach powinny wynosić kilka milimetrów rocznie. Uzyskane wartości przemieszczeń tylko w stacjach JOZ2 i BOGI pozwalają założyć, że można uzyskać wartości milimetrowe. W pozostałych przypadkach jest to od kilku do kilkunastu centymetrów. Takie zróżnicowanie nie daje wiarygodności uzyskanym wynikom z punktu widzenia VCM. Działa to tylko w obszarach, gdzie występują duże zmiany pionowe powierzchni ziemi w krótkich odstępach czasu (trzęsienia ziemi, osunięcia ziemi, osiadanie terenu spowodowane wydobywaniem, erupcje wulkanów itp.) (Atzori i inni, 2009; Dong i inni, 2011; Lin i inni, 2014; Thomas, 2020). Zmiany, które następują po takich wydarzeniach na powierzchni Ziemi, są znaczące i bardzo łatwe do zauważenia.

Z drugiej strony, monitorowanie drobnych (np. na obszarze Polski) ruchów pionowych skorupy ziemskiej za pomocą tej metody jest trudniejsze i wymagałoby wykorzystania serii zdjęć w czasie, aby monitorować te zmiany z pożądaną dokładnością. Trudności z wyborem pary obrazów (spowodowane słabą spójnością) pokazują, że w przypadku obszarów Polski uzyskanie bardziej wiarygodnych danych SAR w stałych odstępach czasu dla wybranych obszarów (np. ponad 100 lokalizacji polskiej sieci ASG-EUPOS) jest bardzo pracochłonne. Można założyć, że w niektórych lokalizacjach jest to niemożliwe. Dlatego też do tego typu analiz bardziej odpowiednie są metody oparte na generowaniu szeregów czasowych, które są jednocześnie łatwe do kontrolowania poprzez wsparcie wyników GNSS. Metody takie obejmują na przykład InSAR z trwałymi rozpraszaczami (PSInSAR) (Graniczny i inni, 2015; Perski & Mróz, 2007) lub podzbiory o krótkiej linii bazowej (Pepe i inni, 2005; Vadivel i inni, 2021; Wang i inni, 2019).

Biorąc pod uwagę powyższe wyniki i całość przetworzonych danych, wyciągnięto następujące wnioski. Metoda DInSAR jest stosowana przede wszystkim do wykrywania i monitorowania zmian zachodzących w krótkich odstępach czasu. Dlatego też badania miały na celu zbadanie możliwości wykorzystania jej do opracowania pionowych ruchów skorupy ziemskiej. VCM są opracowywane przy użyciu metod geologicznych (dla długich okresów) lub metod geodezyjnych (dla krótkich okresów wynoszących kilkadziesiąt lat). Metody geodezyjne wymagają znacznie większej precyzji i dokładności. Przy użyciu metody DInSAR znaleziono

wielokrotnie większe przemieszczenia niż te określone na podstawie danych GNSS. Obszary wokół stacji charakteryzowały się różną strukturą geologiczną, warunkami wodnymi, procesem urbanizacji i pokryciem terenu. Czynniki te miały znaczący wpływ na spójność obrazów. Obecność zalesień, wysoki poziom wód gruntowych i zmiany antropogeniczne (np. wydobywanie kruszywa i piasku, drogi czy konstrukcje budowlane) mają negatywny wpływ na spójność zdjęć. Ze względu na znacznie większe wartości przemieszczeń z danych SAR niż z danych GNSS można założyć, że budowa szeregu czasowego zdjęć, przy krótszej rozdzielczości czasowej, miałyby znacznie większą amplitudę niż szereg czasowy GNSS. Przełożyłoby się to na wzrost udziału szumu w danych. Stwierdzono, że mikroobszary wokół stałych polskich stacji GNSS wykazują rozbieżne przemieszczenia pionowe. Biorąc pod uwagę powyższe założenia, uzyskane wyniki oraz cały proces przetwarzania danych, stwierdzono, że metoda DInSAR z tak dużą rozdzielczością czasową nie jest odpowiednia do określania VCM w Polsce. Może ona jednak stanowić istotne wsparcie w wyborze obszarów wymagających szczegółowego monitorowania przemieszczeń pionowych. W ten sposób hipoteza **H1** została zweryfikowana.

Stworzone absolutne modele VLM i VCM wskazują na wysoką stabilność zarówno skorupy ziemskiej, jak i jej powierzchni na obszarze Polski. Mapy ze skokiem izolinii 1mm/rok są bardziej płynne, ale występują w nich lokalne wartości ekstremalne. Modele VLM wykazują lokalne zmiany pionowe spowodowane innymi czynnikami – Żuławy (ELBL), wydobywanie surowców (NTML, POZN, BOR1, LESZ, GLOG, WORC, KATO, PRZM). Modele VCM nie wykazują znaczącego wpływu wydobywania surowców, wód gruntowych i aglomeracji miejskich. Stacje LODZ, LELO, TABG, BILG, HOZD, TRNW i PRZM wykazują wpływ czynników lokalnych. W większości przypadków wartości te wynoszą od 0.1 do 0.3mm/rok w stosunku do sąsiednich stacji, z wyjątkiem stacji PRZM, gdzie wartość ruchu pionowego wynosi -2.3mm/rok. Ruch w tej stacji może być spowodowany zarówno procesami geologicznymi w Karpatach, jak i wydobywaniem surowców. Stacja ta została wybrana do uwzględnienia w modelach VLM i VCM ze względu na jej znaczenie w regionie. Tym bardziej że ruchy pionowe sąsiedniego obszaru zachodniej Ukrainy obliczone w pracy Tretyak & Brusak, 2022 wskazują, że ruch pionowy na stacji PRZM nie jest odizolowany w regionie, na przykład SAMB (-1.6mm/rok), JARO (-2.9mm/rok), NARO (-2.3mm/rok), a dalej na południowym wschodzie SVLV (-5.6mm/rok), VYNO (-6.3mm/rok), KLCH (-6.3mm/rok) i YASN (-5.29mm/rok). W północno-wschodniej części Polski otrzymane wartości ruchu pionowego nie różnią się od tych opracowanych przez K. Kowalczyk & Bogusz, 2017. W części północnej zidentyfikowano głównie prędkości dodatnie, co jest również zgodne z Bogusz i inni, 2019. Dodatnie prędkości zidentyfikowane w pobliżu Sudetów są zgodne z prędkościami określonymi dla północno-wschodniego masywu czeskiego (Roštínský i inni, 2020), a także

potwierdzonymi dodatnimi ruchami tektonicznymi w pobliżu stacji KLDZ i KLODZ (Badura & Rauch, 2014). Zarówno absolutny VLM, jak i absolutny VCM pokazują niewielkie zmiany pionowe skorupy ziemskiej w całej Polsce. Ruchy pionowe skorupy ziemskiej od -0.5mm/rok do $+0.5\text{mm/rok}$ stanowią 70% obliczonych wartości, natomiast od -1.0mm/rok do $+1.0\text{mm/rok}$ stanowią aż 95% tych wartości. Jednak te występujące lokalnie są nieco większe i wynoszą od $+1.7$ do -2.2mm/rok .

Polska może być uznana za obszar stabilny tektonicznie, a wyznaczone ruchy pionowe opracowane w niniejszym badaniu są zgodne ze strukturą geologiczną i tektoniczną regionu. Uwzględnienie wpływu tektoniki, geologii, hydrologii i lokalizacji zasobów mineralnych pozwoliło na lepszą interpretację VCM i VLM. Metoda łączenia zestawów WAV na podstawie różnych strategii obliczeniowych dała dobre wyniki. Hipotezy **H2** i **H3** zostały zweryfikowane.

Ruchy pionowe skorupy ziemskiej odniesione do poziomu mórz i oceanów pozwalają lepiej zrozumieć zachodzące zmiany w skorupie ziemskiej i mają szersze zastosowanie poznawcze niż pionowe ruchy absolutne. W pracy porównano dwa podejścia do integracji danych niwelacyjnych i GNSS w celu wyznaczenia względnych ruchów pionowych skorupy ziemskiej. Podejścia teoretyczne przetestowano przy użyciu transformacji matematycznej i wyrównania sieci hybrydowej. Najmniejszy błąd jednostkowy m_0 po wyrównaniu sieci hybrydowej wyniósł 0.11mm/rok , a błąd transformacji m_t 0.15mm/rok . Otrzymane wyniki z wyrównania sieci hybrydowej i transformacji metodą afiniczną są do siebie bardzo zbliżone. Zatem można wnioskować, że oba te rozwiązania można stosować zamiennie. Integracja przy użyciu metody wyrównania sieci hybrydowej jest trudniejsza do automatyzacji, niż transformacja. Każdy nowy punkt w sieci powoduje zmianę jej struktury i właściwości. Spośród metod transformacji najmniejsze błędy uzyskano dla transformacji afinicznej. Dlatego zaleca się stosowanie jej do tego typu analiz. Użyty sposób łączenia danych (transformacja) można wykorzystać do opracowania modeli deformacji terenu na podstawie danych hybrydowych dla obszarów o dowolnej wielkości. Nie ma potrzeby tworzenia sztucznych powiązań między stacjami GNSS i przeprowadzania czasochłonnego procesu wyrównania.

Udowodniono, że zastosowanie transformacji pozwala na przejście z absolutnego poziomu odniesienia do poziomu względnego, co jest jednym z głównych problemów podczas łączenia danych niwelacyjnych i GNSS w celu określenia pionowych ruchów skorupy ziemskiej.

Największe różnice we wszystkich testowanych wariantach występowały w punktach dostosowania. Zarówno podczas wyrównania sieci hybrydowej, jak i transformacji lokalne ruchy pionowe są niwelowane.

Nie wszystkie wspólne punkty w sieci hybrydowej nadają się jako punkty wiążące. Wybór punktów wiążących w wyrównaniu, jak również punktów dostosowania w transformacji powinien być kontrolowany, a punkty odbiegające od normy powinny być weryfikowane pod kątem geologicznym i tektonicznym.

Wykazano, że teoria sieci bezskalowej nadaje się do wyznaczenia punktów łącznych w sieci hybrydowej. Klasyfikacja punktów przy użyciu teorii sieci bezskalowych umożliwia identyfikację punktów łącznych o największym znaczeniu w sieci. Te same punkty łączne mogą być wykorzystane w wyrównaniu sieci hybrydowej, jak i w transformacji.

Wykazano, że nie wszystkie możliwe punkty wspólne w sieci hybrydowej powinny być przyjmowane jako punkty dostosowania w transformacji lub jako punkty wiążące w wyrównaniu. Muszą one być istotne w sieci. Stacje GNSS podlegają ruchom pionowym spowodowanym czynnikami lokalnymi, dlatego konieczne jest przeanalizowanie położenia geologicznego stacji, zwłaszcza tych przyjętych jako punkty wiążące. Hipoteza **H4** została zweryfikowana.

Przeprowadzone badania wykazały, że istnieje możliwość wyznaczenia względnych ruchów pionowych skorupy ziemskiej na podstawie integracji danych z pomiarów niwelacyjnych, GNSS, PSInSAR. Zastosowanie transformacji afinicznej jako metody łączenia ruchów pionowych wyznaczonych w różnych systemach odniesienia dało bardzo dobre rezultaty, z błędem transformacji na poziomie 0.2mm/rok dla pojedynczego punktu. Produkt EGMS L2a po dekompozycji na komponent pionowy, okazał się właściwy w procesie weryfikacji i uzupełnienia ruchów pionowych na wybranych stacjach GNSS. Potwierdzono, że bufor 0.3km jest optymalny dla tego celu, zapewniając wysoką spójność wyników. Ze względu na zróżnicowanie wartości ruchów pionowych w mikroobszarach, użycie mediany jako miary reprezentatywnej dla zbioru punktów okazało się uzasadnione. Hipoteza **H5** została zweryfikowana.

6.1 Dalsze kierunki badań

Uzyskane wyniki otwierają szerokie perspektywy dla dalszych badań nad pionowymi ruchami skorupy ziemskiej w Polsce i w Europie Środkowej. Zastosowana metodyka

integracyjna, obejmująca GNSS, niwelację oraz pomiary radarowe, stanowi solidny fundament, który może być rozwijany w kilku kierunkach.

Obiecującym obszarem jest rozszerzenie modeli hybrydowych o dane grawimetryczne – zarówno naziemne, jak i satelitarne (np. misje GRACE-FO). Dane te mogą pozwolić na lepsze powiązanie ruchów pionowych z procesami masowymi, takimi jak zmiany zasobów wodnych czy osiadanie terenów górniczych.

Dalsze badania powinny objąć analizę dłuższych szeregów czasowych GNSS i InSAR. Przedłużenie obserwacji o kolejne lata umożliwi wykrycie powolnych trendów geodynamicznych, a także separację procesów tektonicznych od krótkookresowych zaburzeń antropogenicznych i hydrologicznych.

Warto rozwijać automatyczne metody analizy danych z wykorzystaniem sztucznej inteligencji i uczenia maszynowego. Algorytmy te mogą być stosowane do klasyfikacji obszarów o odmiennych charakterystykach deformacyjnych, detekcji anomalii w szeregach czasowych GNSS oraz segmentacji danych InSAR w celu wydzielenia spójnych obszarów deformacji.

Interesującym kierunkiem jest regionalna i międzynarodowa integracja danych. Rozszerzenie badań na kraje sąsiednie umożliwi porównanie procesów deformacyjnych w skali całej Europy Środkowej. Szczególnie wartościowe byłoby powiązanie wyników polskich z obserwacjami w Karpatach, Sudetach i rejonie Bałtyku, gdzie działają wspólne sieci GNSS i prowadzone są badania geodynamiczne. Należy również podkreślić potencjał praktyczny rozwiniętej metodyki w zakresie monitorowania ryzyka geologicznego i infrastrukturalnego. Włączenie modelu hybrydowego do systemów wczesnego ostrzegania mogłoby zwiększyć bezpieczeństwo obiektów inżynierskich, górniczych i hydrotechnicznych.

Podsumowując, dalsze badania powinny zmierzać w kierunku pogłębiania integracji metod geodezyjnych z innymi źródłami informacji o procesach geodynamicznych oraz rozwijania narzędzi analitycznych opartych na nowoczesnych technologiach obliczeniowych. Wyniki rozprawy mogą być traktowane jako punkt wyjścia do interdyscyplinarnych projektów badawczych, w których geodezja satelitarna, geologia i geoinformatyka tworzą wspólny system monitorowania współczesnych zmian skorupy ziemskiej. W rozprawie przedstawiono metodykę oraz wyniki badań nad współczesnymi pionowymi ruchami skorupy ziemskiej w Polsce, uzyskane dzięki integracji danych GNSS, niwelacyjnych i radarowych. Wykazano, że każda z zastosowanych technik ma określone zalety i ograniczenia, natomiast ich połączenie w

sieci hybrydowe pozwala uzyskać spójniejszy i bardziej wiarygodny obraz deformacji. Opracowany model osiągnął dokładność rzędu 0.20mm/rok, co potwierdza jego użyteczność w badaniach geodynamicznych prowadzonych w skali krajowej.

Uzyskane rezultaty wpisują się w aktualne kierunki badań w geodezji i naukach o Ziemi, potwierdzając stabilność tektoniczną Polski i wskazując na znaczenie procesów lokalnych, związanych głównie z działalnością górniczą i zmianami hydrologicznymi. Wyniki mogą stanowić podstawę do dalszych prac rozwijających modele deformacji oraz ich zastosowania praktycznego, zwłaszcza w monitorowaniu ryzyka geologicznego i w inżynierii lądowej. Rozprawa wnosi przede wszystkim wkład metodyczny, proponując rozwiązania integracyjne, które mogą być w przyszłości rozwijane i uzupełniane o dodatkowe źródła danych.

7. Bibliografia

- Abdel-salam, M. A. (2005). Precise Point Positioning Using Un-Differenced Code and Carrier Phase Observations [University of Calgary]. In *Department of Geomatics Engineering*. https://www.ucalgary.ca/engo_webdocs/YG/05.20229.MAbdel-salam.pdf
- Alessandro Ferretti, Emanuele Passera, & Renalt Capes. (2025). *End-to-end implementation and operation of the European Ground Motion Service (EGMS) Algorithm Theoretical Basis*.
- Altamimi, Z., Rebischung, P., Métivier, L., & Collilieux, X. (2016). ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(8), 6109–6131. <https://doi.org/10.1002/2016JB013098>
- Ameen, M., Fekry, R., Saad, A., & Elshehaby, A. R. (2018). Estimating Earth's Surface Deformation from GPS and DInSAR Data Integration. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. <https://doi.org/10.22587/ajbas.2018.12.6.1>
- Atzori, S., Hunstad, I., Chini, M., Salvi, S., Tolomei, C., Bignami, C., Stramondo, S., Trasatti, E., Antonioli, A., & Boschi, E. (2009). Finite fault inversion of DInSAR coseismic displacement of the 2009 L'Aquila earthquake (central Italy). *Geophysical Research Letters*, 36(15), 15305. <https://doi.org/10.1029/2009GL039293>
- Badura, J., & Rauch, M. (2014). Tectonics of the Upper Nysa Kłodzka Graben, the Sudetes. *Geologia Sudetica*, 42, 137–148.
- Barabási, A. L., Ravasz, E., & Vicsek, T. (2001). Deterministic scale-free networks. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 299(3–4), 559–564. [https://doi.org/10.1016/S0378-4371\(01\)00369-7](https://doi.org/10.1016/S0378-4371(01)00369-7)
- Bednarczyk, M., Kowalczyk, K., & Kowalczyk, A. (2018). Identification of pseudo-nodal points on the basis of precise leveling campaigns data and GNSS. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 15(1), 5–16. <https://doi.org/10.13168/AGG.2017.0028>
- Bertiger, W., Bar-Sever, Y., Dorsey, A., Haines, B., Harvey, N., Hemberger, D., Heflin, M., Lu, W., Miller, M., Moore, A. W., Murphy, D., Ries, P., Romans, L., Sibois, A., Sibthorpe, A., Szilagyi, B., Vallisneri, M., & Willis, P. (2020). GipsyX/RTGx, a new tool set for space geodetic operations and research. *Advances in Space Research*, 66(3), 469–489. <https://doi.org/10.1016/J.ASR.2020.04.015>
- Blewitt, G., Hammond, W., & Kreemer, C. (2018). Harnessing the GPS Data Explosion for Interdisciplinary Science. *Eos*, 99(2), e2020943118. <https://doi.org/10.1029/2018EO104623>

- Bogusz, J., Klos, A., & Pokonieczny, K. (2019). Optimal Strategy of a GPS Position Time Series Analysis for Post-Glacial Rebound Investigation in Europe. *Remote Sensing 2019*, Vol. 11, Page 1209, 11(10), 1209. <https://doi.org/10.3390/RS11101209>
- Bos, M. S., Fernandes, R. M. S., Williams, S. D. P., & Bastos, L. (2013). Fast error analysis of continuous GNSS observations with missing data. *Journal of Geodesy*, 87(4), 351–360. <https://doi.org/10.1007/S00190-012-0605-0/METRICS>
- de Vicente, G., & Vegas, R. (2009). Large-scale distributed deformation controlled topography along the western Africa–Eurasia limit: Tectonic constraints. *Tectonophysics*, 474(1–2), 124–143. <https://doi.org/10.1016/J.TECTO.2008.11.026>
- Del Soldato, M., Confuorto, P., Bianchini, S., Sbarra, P., & Casagli, N. (2021). Review of Works Combining GNSS and InSAR in Europe. *Remote Sensing 2021*, Vol. 13, Page 1684, 13(9), 1684. <https://doi.org/10.3390/RS13091684>
- Dong, Y., Li, Q., Dou, A., & Wang, X. (2011). Extracting damages caused by the 2008 Ms 8.0 Wenchuan earthquake from SAR remote sensing data. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40(4), 907–914. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2010.07.009>
- Farolfi, G., Bianchini, S., & Casagli, N. (2018). Integration of GNSS and Satellite InSAR Data: Derivation of Fine-Scale Vertical Surface Motion Maps of Po Plain, Northern Apennines, and Southern Alps, Italy . *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2018.2854371>
- Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (1999). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 39(1), 1528–1530. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.1999.772008>
- Fuhrmann, T., Caro Cuenca, M., Knöpfler, A., van Leijen, F. J., Mayer, M., Westerhaus, M., Hanssen, R. F., & Heck, B. (2015). Estimation of small surface displacements in the Upper Rhine Graben area from a combined analysis of PS-InSAR, levelling and GNSS data. *Geophysical Journal International*, 203(1), 614–631. <https://doi.org/10.1093/GJI/GGV328>
- Fuhrmann, T., & Garthwaite, M. C. (2019). Resolving Three-Dimensional Surface Motion with InSAR: Constraints from Multi-Geometry Data Fusion. *Remote Sensing 2019*, Vol. 11, Page 241, 11(3), 241. <https://doi.org/10.3390/RS11030241>
- Graniczny, M., Čyžienė, J., Leijen, F. Van, Minkevičius, V., Mikulėnas, V., Satkūnas, J., Przyłucka, M., Kowalski, Z., Uścińowicz, S., Jegliński, W., & Hanssen, R. (2015). Vertical ground movements in the polish and lithuanian baltic coastal area as measured by satellite interferometry. *Baltica*, 28(2), 65–80. <https://doi.org/10.5200/baltica.2015.28.07>

- Hanssen, R. F. (2002). *Radar Interferometry, Data Interpretation and Error Analysis*.
<https://books.google.pl/books?hl=pl&lr=&id=bqNkJUk4wtMC&oi=fnd&pg=PA4&dq=Hanssen,+R.F.+Radar+Interferometry:+Data+Interpretation+and+Error+Analysis%3B+Kluwer+Academic+Publishers:+Dordrecht,+The+Netherlands,+2001&ots=8PbslEHZdQ&sig=PbJfkhnlP6ZRrKvaEzpq0Yaj>
- Hausbrandt S. (1971). *Network adjustment and geodetic calculations : Vol. II*.
- Heiskanen, W. A., & Moritz, H. (1967). Physical geodesy. *Bulletin Géodésique*, 41(4), 491–492. <https://doi.org/10.1007/BF02525647/METRICS>
- Hollenstein, C., Müller, M. D., Geiger, A., & Kahle, H. G. (2008). Crustal motion and deformation in Greece from a decade of GPS measurements, 1993–2003. *Tectonophysics*, 449(1–4), 17–40. <https://doi.org/10.1016/J.TECTO.2007.12.006>
- Ihde, J., Baker, T., Bruyninx, C., Francis, O., Amalvict, M., Kenyeres, A., Makinen, J., Shipman, S., Simek, J., & Wilmes, H. (2005). Development of a European Combined Geodetic Network (ECGN). *Journal of Geodynamics*, 40(4–5), 450–460. <https://doi.org/10.1016/J.JOG.2005.06.008>
- Janicka, J. (2011). Transformation of coordinates with robust M-estimation and modified Hausbrandt correction. *ENVIRONMENTAL ENGINEERING*, 3, 1330–1333. <http://enviro.vgtu.lt>
- Jianqing Fan. (2018). Local Polynomial Modelling and Its Applications. In *Local Polynomial Modelling and Its Applications* (Vol. 21, Issue 2). Routledge. <https://doi.org/10.1201/9780203748725>
- Kenyeres, A. , Jambor, T. , Caporali, A. , Droščak, B. , Garayt, B. , Georgiev, I. , & Stangl, G. (2013). Integration of the EPN and the dense national Permanent Networks. In *EUREF Symposium*, 29–31.
- Kenyeres, A., Bellet, J. G., Bruyninx, C., Caporali, A., de Doncker, F., Droščak, B., Duret, A., Franke, P., Georgiev, I., Bingley, R., Huisman, L., Jivall, L., Khoda, O., Kollo, K., Kurt, A. I., Lahtinen, S., Legrand, J., Magyar, B., Mesmaker, D., ... Weber, M. (2019). Regional integration of long-term national dense GNSS network solutions. *GPS Solutions*, 23(4). <https://doi.org/10.1007/s10291-019-0902-7>
- Klos, A., Hunegnaw, A., Teferle, F. N., Abraha, K. E., Ahmed, F., & Bogusz, J. (2018). Statistical significance of trends in Zenith Wet Delay from re-processed GPS solutions. *GPS Solutions*, 22(2), 1–12. <https://doi.org/10.1007/S10291-018-0717-Y/FIGURES/11>
- Kontny, B., & Bogusz, J. (2012). Models of vertical movements of the earth crust surface in the area of Poland derived from leveling and GNSS data. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 9(3), 331–337. <http://www.epncb.oma.be/>.

- Kouba, J. (2003). *A guide to using International GPS Service (IGS) products*. On-Line on the Ftp Site. <ftp://igsb.jpl.nasa.gov/igsb/resource/pubs/GuidetoUsingIGSProducts.pdf>
- Kowalczyk, A. M., & Bajerowski, T. (2020). Development of the Theory of Six Value Aggregation Paths in Network Modeling for Spatial Analyses. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 2020, Vol. 9, Page 234, 9(4), 234. <https://doi.org/10.3390/IJGI9040234>
- Kowalczyk, K. (2005). Determination of land uplift in the area of Poland. *6th International Conference Environment, al Engineering*, 1(May 2005), 903–907. <https://www.researchgate.net/publication/312627681>
- Kowalczyk, K. (2006). Modelling the vertical movements of the eaerth`s crust with the help of the collocation method. *Reports on Geodesy*, z. 2/77, 171–178. <https://www.infona.pl//resource/bwmeta1.element.baztech-article-PWA6-0029-0003>
- Kowalczyk, K. (2015). The creation of a model of relative vertical crustal movements in the polish territory on the basis of the data from active geodetic network EUPOS (ASG EUPOS). *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 12(3), 215–225. <https://doi.org/10.13168/AGG.2015.0022>
- Kowalczyk, K., & Bogusz, J. (2017). Application of PPP Solution to Determine the Absolute Vertical Crustal Movements: Case Study for Northeastern Europe. *Environmental Engineering*, 27–28. <https://doi.org/10.3846/enviro.2017.207>
- Kowalczyk, K., Bogusz, J., & Figurski, M. (2014). The analysis of the selected data from Polish Active Geodetic Network stations with the view on creating a model of vertical crustal movements. *9th International Conference on Environmental Engineering, ICEE 2014*. <https://doi.org/10.3846/enviro.2014.221>
- Kowalczyk, K., Kowalczyk, A. M., & Chojka, A. (2020). Modeling of the Vertical Movements of the Earth`s Crust in Poland with the Co-Kriging Method Based on Various Sources of Data. *Applied Sciences* 2020, Vol. 10, Page 3004, 10(9), 3004. <https://doi.org/10.3390/APP10093004>
- Kowalczyk, K., Kowalczyk, A. M., & Rapiński, J. (2021). Identification of common points in hybrid geodetic networks to determine vertical movements of the Earth`s crust. *Journal of Applied Geodesy*, 15(2), 153–167. https://doi.org/10.1515/JAG-2021-0002/ASSET/GRAPHIC/J_JAG-2021-0002_FIG_022.JPG
- Kowalczyk, K., Pajak, K., Wieczorek, B., & Naumowicz, B. (2021). An Analysis of Vertical Crustal Movements along the European Coast from Satellite Altimetry, Tide Gauge, GNSS and Radar Interferometry. *Remote Sensing* 2021, Vol. 13, Page 2173, 13(11), 2173. <https://doi.org/10.3390/RS13112173>

- Kowalczyk, K., & Rapiński, J. (2013). *Evaluation of levelling data for use in vertical crustal movements model in Poland*. 10(3), 1–10.
- Kowalczyk, K., & Rapinski, J. (2018). Verification of a GNSS time series discontinuity detection approach in support of the estimation of vertical crustal movements. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(4), 149. <https://doi.org/10.3390/ijgi7040149>
- Kreemer, C., & Blewitt, G. (2021). Robust estimation of spatially varying common-mode components in GPS time-series. *Journal of Geodesy*, 95(1), 1–19. <https://doi.org/10.1007/S00190-020-01466-5/FIGURES/10>
- Le Gal, M., Fernández-Montblanc, T., Montes Perez, J., Duo, E., Souto Ceccon, P., Ciavola, P., & Armaroli, C. (2024). Influence of model configuration for coastal flooding across Europe. *Coastal Engineering*, 192, 104541. <https://doi.org/10.1016/J.COASTALENG.2024.104541>
- Lin, G., Shearer, P. M., Matoza, R. S., Okubo, P. G., & Amelung, F. (2014). Three-dimensional seismic velocity structure of Mauna Loa and Kilauea volcanoes in Hawaii from local seismic tomography. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(5), 4377–4392. <https://doi.org/10.1002/2013JB010820>
- Luis Veci. (2015). *Sentinel-1 Toolbox Interferometry Tutorial*. May 2014, 1–20. <http://step.esa.int>
- Lukk, A. A., & Shevchenko, V. I. (2018). Peculiarity of the Relationship between the Seismicity and Tectonic Structure of the Pyrenees. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 54(3), 415–429. <https://doi.org/10.1134/S1069351318030060/METRICS>
- Łyszkowicz, A., Pelc-Mieczkowska, R., Bernatowicz, A., & Savchuk, S. (2021). First Results of Time Series Analysis of the Permanent GNSS Observations at Polish EPN Stations Using GipsyX Software. *Artificial Satellites*, 56(3), 101–118. <https://doi.org/10.2478/ARSA-2021-0008>
- Massonnet, D., & Feigl, K. L. (1998). Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. *Reviews of Geophysics*, 36(4), 441–500. <https://doi.org/10.1029/97RG03139>
- Meng, G. J., Ge, L. L., Wu, J. C., & Dai, Y. Q. (2012). Application of DInSAR in earthquake deformation studies. *Earthquake*, 32(2), 105–113. https://www.researchgate.net/publication/287074182_Application_of_DInSAR_in_earthquake_deformation_studies
- Meyer, F. J. (2007). Topography and displacement of polar glaciers from multi-temporal SAR interferograms. In *Polar Record* (Vol. 43, Issue 4, pp. 331–343). <https://doi.org/10.1017/S0032247407006742>

- Ministerstwo Administracji i Cyfryzacji. (2012). *Rozporządzenie w sprawie osnów geodezyjnych, grawimetrycznych i magnetycznych*. 248.
- 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* 2025, Vol. 15, Page 8224, 15(15), 8224. <https://doi.org/10.3390/APP15158224>
- 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.
- 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)2025(2(39)), 5–15. <https://doi.org/10.23939/jgd2025.02.005>
- 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/ASSET/GRAPHIC/J_GEO-2022-0401_FIG_009.JPG
- Niewiarowski, J., & Wyrzykowski, T. (1961). *Determination of contemporary vertical movements of the Earth's crust in Poland by comparing the results of repeated precision levelling*. (Vol. 1). Instytut Geodezji i Kartografii.
- Nocquet, J. M., Calais, E., & Parsons, B. (2005). Geodetic constraints on glacial isostatic adjustment in Europe. *Geophysical Research Letters*, 32(6), 1–5. <https://doi.org/10.1029/2004GL022174>
- Osmanoğlu, B., Sunar, F., Wdowinski, S., & Cabral-Cano, E. (2016). Time series analysis of InSAR data: Methods and trends. In *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* (Vol. 115, pp. 90–102). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.003>
- Parker, A. L., Pigois, J. P., Filmer, M. S., Featherstone, W. E., Timms, N. E., & Penna, N. T. (2021). Land uplift linked to managed aquifer recharge in the Perth Basin, Australia. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 105, 102637. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102637>
- Peifer H. (2011). *About the EEA reference grid.pdf* — Eionet Portal. <https://epanet.eea.europa.eu/Eionet/workspace/docs/about-the-eea-reference-grid.pdf/view>

- Pepe, A., Sansosti, E., Berardino, P., & Lanari, R. (2005). *IEEE GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING LETTERS, REVISED VERSION JANUARY, 2005 On the Generation of ERS/ENVISAT DInSAR Time-series via the SBAS Technique*. 1–5.
- Perski, Z., Hanssen, R., Wojcik, A., & Wojciechowski, T. (2009). InSAR analyses of terrain deformation near the Wieliczka Salt Mine, Poland. *Engineering Geology*, 106(1–2), 58–67. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.02.014>
- Perski, Z., & Mróz, M. (2007). Zastosowanie metod interferometrii radarowej InSAR do badania naturalnych ruchów powierzchni terenu w Polsce. Projekt GEO-In-SAR. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 17, 613–624.
- Peter J.G. Teunissen, & Oliver Montenbruck. (2017). Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*, 10. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-42928-1>
- Piña-Valdés, J., Socquet, A., Beauval, C., Doin, M. P., D’Agostino, N., & Shen, Z. K. (2022). 3D GNSS Velocity Field Sheds Light on the Deformation Mechanisms in Europe: Effects of the Vertical Crustal Motion on the Distribution of Seismicity. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127(6), e2021JB023451. <https://doi.org/10.1029/2021JB023451>
- Pospíšil, L., Švábenský, O., Roštínský, P., Nováková, E., & Weigel, J. (2017). Geodynamic risk zone at northern part of the Boskovice Furrow. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 14(1), 113–129. <https://doi.org/10.13168/AGG.2016.0033>
- Qin, S., Wang, W., & Song, S. (2018). Comparative study on vertical deformation based on GPS and leveling data. *Geodesy and Geodynamics*, 9(2), 115–120. <https://doi.org/10.1016/J.GEOG.2017.07.005>
- Rocco, F. Vincent. (2015). *Sea level trends in the Mediterranean from tide gauges and satellite altimetry*.
- Roštínský, P., Pospíšil, L., Švábenský, O., Kašing, M., & Nováková, E. (2020). Risk faults in stable crust of the eastern Bohemian Massif identified by integrating GNSS, levelling, geological, geomorphological and geophysical data. *Tectonophysics*, 785, 228427. <https://doi.org/10.1016/J.TECTO.2020.228427>
- Rožić, N. (2015). Kinematic models of recent motion of the Earth’s crust on the territory of Croatia, Slovenia and Bosnia and Herzegovina. *Geofizika*, 32(2), 209–236–209–236. <https://doi.org/10.15233/GFZ.2015.32.10>
- Stupnicka, E. (2013). *Geologia regionalna Polski (III)*. Wydawnictwa Uniwersytetu Warszawskiego. www.wuw.pl/ksiegarnia

- Thomas, A. (2020). Mapping of surface deformation and displacement associated with the 6.5 magnitude Botswana earthquake of 3 April 2017 using DInSAR analysis. *Geomatics and Environmental Engineering*, 14(4), 81–100. <https://doi.org/10.7494/geom.2020.14.4.81>
- Touzi, R., Lopes, A., Bruniquel, J., & Vachon, P. W. (1999). Coherence estimation for SAR imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(1 PART 1), 135–149. <https://doi.org/10.1109/36.739146>
- Tregoning P, & Rizos C. (2005). Dynamic Planet: Monitoring and Understanding a Dynamic Planet with Geodetic and Oceanographic Tools. In *IAG Symposium* (Vol. 130). [https://books.google.pl/books?hl=pl&lr=&id=reK6dpGuQhMC&oi=fnd&pg=PA3&dq=Tregoning+P,+Rizos+C+\(Eds.\).+Dynamic+Planet++Monitoring+and+Understanding+a+Dynamic+Planet+with+Geodetic+and+Oceanographic+Tools,+Vol.%E2%80%89130.+Springer+Science+%26+Business+Media,+2008.10.1007/978+3+540+49350+1&ots=M6lR8qeAeC&sig=5Xv8juO9mANy3XiPOk8ZlhPFVAM&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.pl/books?hl=pl&lr=&id=reK6dpGuQhMC&oi=fnd&pg=PA3&dq=Tregoning+P,+Rizos+C+(Eds.).+Dynamic+Planet++Monitoring+and+Understanding+a+Dynamic+Planet+with+Geodetic+and+Oceanographic+Tools,+Vol.%E2%80%89130.+Springer+Science+%26+Business+Media,+2008.10.1007/978+3+540+49350+1&ots=M6lR8qeAeC&sig=5Xv8juO9mANy3XiPOk8ZlhPFVAM&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)
- Tretyak, K., & Brusak, I. (2022). Modern deformations of Earth crust of territory of Western Ukraine based on «GEOTERRACE» GNSS network data. *GEODYNAMICS*, 1(32)2022(1(32)), 16–25. <https://doi.org/10.23939/JGD2022.02.016>
- Trevoho, I., Chetverikov, B., Babiy, L., & Malanchuk, M. (2020). Monitoring of displacements and deformations of the earth's surface near the Stebnyk city using radar images of Sentinel-1. *Geodesy and Cartography*, Vol. 69(1), 85–96. <https://doi.org/10.24425/GAC.2020.131079>
- Ustawa Prawo Geodezyjne i Kartograficzne, 1 (2021). [moz-extension://b3530a15-6aa8-46e6-af88-07e875943484/enhanced-reader.html?openApp&pdf=http%3A%2F%2Fisap.sejm.gov.pl%2Fisap.nsf%2Fdownload.xsp%2FWDU20051691411%2FU%2FD20051411Lj.pdf](http://b3530a15-6aa8-46e6-af88-07e875943484/enhanced-reader.html?openApp&pdf=http%3A%2F%2Fisap.sejm.gov.pl%2Fisap.nsf%2Fdownload.xsp%2FWDU20051691411%2FU%2FD20051411Lj.pdf)
- Vadivel, S. K. P., Kim, D. J., Jung, J., Cho, Y. K., & Han, K. J. (2021). Monitoring the vertical land motion of tide gauges and its impact on relative sea level changes in Korean peninsula using sequential SBAS-InSAR time-series analysis. *Remote Sensing*, 13(1), 1–22. <https://doi.org/10.3390/rs13010018>
- Vadivel, S. K. P., Kim, D. J., Jung, J., Cho, Y. K., Han, K. J., & Jeong, K. Y. (2019). Sinking tide gauge revealed by space-borne InSAR: Implications for sea level acceleration at Pohang, South Korea. *Remote Sensing*, 11(3), 277. <https://doi.org/10.3390/rs11030277>
- Walters, R. J., Parsons, B., & Wright, T. J. (2014). Constraining crustal velocity fields with InSAR for Eastern Turkey: Limits to the block-like behavior of Eastern Anatolia.

- Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(6), 5215–5234.
<https://doi.org/10.1002/2013JB010909>
- Wang, G., Wang, Y., Zang, X., Zhu, J., & Wu, W. (2019). Locating and monitoring of landslides based on small baseline subset interferometric synthetic aperture radar. *Journal of Applied Remote Sensing*, 13(04), 1. <https://doi.org/10.1117/1.jrs.13.044528>
- Watson, G. A. (2006). Computing Helmert transformations. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 197(2), 387–394. <https://doi.org/10.1016/J.CAM.2005.06.047>
- Wieczorek, B. (2020). Evaluation of deformations in the urban area of olsztyn using sentinel-1 sar interferometry. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 17(1), 5–18.
<https://doi.org/10.13168/AGG.2019.0041>
- Wöppelmann, G., & Marcos, M. (2014). Vertical land motion as a key to understanding sea level change and variability. *Reviews of Geophysics*, 54(1), 64–92.
<https://doi.org/10.1002/2015RG000502>
- Wyrzykowski, T. (1987). A new determination of recent vertical movements of the Earth's crust in Poland. *Journal of Geodynamics*, 8(2–4), 171–178. [https://doi.org/10.1016/0264-3707\(87\)90035-4](https://doi.org/10.1016/0264-3707(87)90035-4)
- Ye, S. R. (2002). *Theory and its realization of GPS precise point positioning using undifferenced phase observation*.
- Zulkifli, N. A., Md Din, A. H., & Md Som, Z. A. (2018). Vertical land motion quantification using space-based geodetic methods: A review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 169(1), 012024. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/169/1/012024>

8. Spis tabel, rysunków i wykresów

Tab. 1. Wady i zalety wyznaczania ruchów pionowych skorupy ziemskiej na podstawie różnych geodezyjnych zbiorów danych pomiarowych (<i>źródło: Naumowicz & Kowalczyk, 2025</i>).....	32
Tab. 2. Charakterystyka wykorzystanych danych (<i>źródło: opracowanie własne</i>)	38
Tab. 3. Wyniki obliczonych prędkości pionowych na czterech stacjach permanentnych GNSS z podziałem na ośrodki przeprowadzające analizę (<i>źródło: opracowanie własne</i>).....	39
Rys. 1. a) punkty UELN; b) punkty stacji permanentnych EPN https://evrs.bkg.bund.de ; https://www.epncb.oma.be . (<i>źródło: K. Kowalczyk, Kowalczyk, i inni, 2021</i>)	11
Rys. 2. Prędkości pionowe gruntu w Polsce na podstawie modelu EGMS L3, skala od -10mm/rok do +10mm/rok (2018-2022) (<i>źródło: Naumowicz i inni, 2025</i>)	12
Rys. 3. Lokalizacja stacji ASG-EUPOS w odniesieniu do głównych podziemnych zbiorników wodnych (<i>źródło: Naumowicz i inni, 2024</i>)	14
Rys. 4. Przykłady punktów pseudowęzłowych: a) punkty sieci podwójnej niwelacji wokół stacji GNSS; b) punkty odniesienia wokół punktu węzłowego podwójnej niwelacji, dla których nie są dostępne dane dotyczące wysokości; c) pojedyncze punkty odniesienia wokół sieci podwójnej niwelacji w pobliżu stacji GNSS; d) bliskie stacje GNSS (<i>źródło: K. Kowalczyk, Kowalczyk, i inni, 2021</i>)	19
Rys. 5. Etapy badań prowadzonych w ramach rozprawy doktorskiej z uwzględnieniem publikacji wchodzących w jej skład (<i>źródło: opracowanie własne</i>)	25
Rys. 6. Schemat metodologii i procesu badawczego (<i>źródło: Naumowicz i inni, 2022</i>)	26
Rys. 7. Charakterystyka otoczenia wokół stacji GNSS Borowiec - BOR1 (<i>źródło: Naumowicz i inni, 2022</i>)	28
Rys. 8. Schemat metodologii i procesu badawczego (<i>źródło: Naumowicz i inni, 2024</i>)	30
Rys. 9. Przykłady szeregów czasowych dla współrzędnych wysokościowych określonych metodą PPP z dopasowanym trendem. Dane opracowane za pomocą oprogramowania GipsyX (<i>źródło: Naumowicz i inni, 2024</i>)	31
Rys. 10. Schemat metodologii i procesu badawczego (<i>źródło: Naumowicz & Kowalczyk, 2025</i>).....	33
Rys. 11. Sieć utworzona na podstawie połączenia sieci GNSS i sieci podwójnej niwelacji z oznaczeniem punktów łącznych (<i>źródło: Naumowicz i inni, 2024</i>)	34
Rys. 12. Schemat metodologii i procesu badawczego (<i>źródło: Naumowicz i inni, 2025</i>)	35
Rys. 13. Prędkość na stacjach AG-EUPOS określona na podstawie 4 strategii w poszczególnych stacjach (mm/rok) (<i>źródło: Naumowicz i inni, 2024</i>)	40

Rys. 14. Rozkład przestrzenny wyników obliczonych ruchów pionowych z transformacji afinicznej, a wyrównaniem sieci hybrydowej (wersja 1 – (a); wersja 2 – (b)) (<i>źródło: Naumowicz & Kowalczyk, 2025</i>)	42
Rys. 15. Różnice wartości mediany w analizowanych buforach względem bufora o promieniu 0.1km (<i>źródło: Naumowicz i inni, 2025</i>)	43
Rys. 16. Model współczesnych ruchów pionowych skorupy ziemskiej z użyciem danych hybrydowych (<i>źródło: Naumowicz i inni, 2025</i>)	44