ARTYKUŁY I KOMUNIKATY NAUKOWE

Interferometryczny Monitoring Powierzchni Terenu Polski
Badania zmian terenu prowadzone przez PSG na podstawie danych InSAR

Maria Przyłucka[1], Zbigniew Perski[2], Michalina Cisło[1]

M. Przyłucka

Z. Perski

M. Cisło

Interferometric Monitoring of the Terrain Surface of Poland. Research on terrain changes conducted by PGS based on InSAR data. Prz. Geol., 73: 631–639; doi: 10.7306/2025.68

A b s t r a c t. Poland is not particularly vulnerable to natural disasters. However, land deformations can result from geological processes and human activity, especially mining. Currently, there is no uniform system for monitoring these phenomena in Poland, although systematic observation allows for early detection of changes and minimizes damage. The solution may be the use of remote sensing techniques, such as radar interferometry (InSAR). The Sentinel-1 mission, launched in 2014, and the European Ground Motion Service (EGMS), which has been operated since 2022, provide precise data on land movements. These data allow for the analysis of long-term deformation trends and their impact on the environment. As part of the project "Interferometric Monitoring of the Terrain Surface of Poland" (InMoTeP), these technologies were used to monitor deformations on a nationwide scale. The results include maps of subsidence and uplift of the terrain surface and detailed analyses of selected areas. InSAR data enable more effective risk management of geohazards and better protection of infrastructure and the environment.

Keywords: *continuous deformations, InSAR, geohazards*

Polska pod względem występowania geozagrożeń nie jest szczególnie narażona na czynniki powodujące katastrofy naturalne, w przeciwieństwie do krajów położonych na obszarach aktywnych sejsmicznie lub w strefach o bardziej dynamicznym klimacie. Nie znaczy to jednak, że na obszarze kraju nie mogą one wystąpić. Deformacje terenu mogą być spowodowane naturalnymi procesami, np. wskutek rozładowania skumulowanych w czasie geologicznym naprężeń, ale mogą być również wywołane działalnością człowieka, np. eksploatacją surowców zarówno metodą odkrywkową, jak i podziemną. W ostatnich latach zaobserwowano uaktywnienie oraz przyrost deformacji terenu powiązanych bezpośrednio z działalnością zakładów górniczych – historycznych i współczesnych.

Jednym z zadań państwowej służby geologicznej (PSG) wg ustawy z dnia 9 czerwca 2011 r. *Prawo geologiczne i górnicze* (Ustawa, 2011; dalej p.g.g.) jest rozpoznanie i monitorowanie zagrożeń geologicznych (art. 162 ust. 1 pkt 10). Obecnie w Polsce nie ma systemu jednolitego monitorowania deformacji powierzchni terenu wywołanych naturalnymi zjawiskami geologicznymi ani też będących skutkiem działalności antropogenicznej. Zazwyczaj deformacje te zachodzą bardzo wolno, przez co nie są zauważane na co dzień przez człowieka. Niemniej jednak nawet powolne zmiany prowadzą w dłuższej perspektywie do uszkodzeń i zniszczeń obiektów budowlanych. Wykonywanie cyklicznych pomiarów stanu deformacji obszaru całego kraju jest więc koniecznością. Monitorowanie zagrożeń wynikających ze zmian powierzchni terenu, szczególnie na obszarach górniczych i pogórniczych oraz osuwiskowych jest kluczowe dla zapewnienia bezpieczeństwa i stabilności infrastruktury oraz ochrony życia mieszkańców. Systematyczna obserwacja pozwala na wczesne wykrywanie deformacji, co umożliwia szybką reakcję i minimalizację potencjalnych szkód. Ponadto regularne monitorowanie pomaga zrozumieć długoterminowe skutki działalności górniczej i jej wpływ na środowisko, co jest niezbędne dla planowania zrównoważonego rozwoju tych terenów. Bez ciągłej kontroli ryzyko wystąpienia groźnych zjawisk takich jak osuwiska czy zapadliska znacząco wzrasta. Ocena wpływu działalności człowieka na deformacje terenu jest niezwykle istotna również w kontekście ochrony środowiska naturalnego. Regularna obserwacja pozwala na identyfikację negatywnych skutków takich działań jak urbanizacja czy przemysł. Dzięki systematycznemu monitorowaniu można wdrażać odpowiednie środki zapobiegawcze i naprawcze, chroniąc tym samym infrastrukturę przed dalszymi zniszczeniami. Takie działania umożliwiają także lepsze zarządzanie zasobami naturalnymi, co jest kluczowe dla zrównoważonego rozwoju i zachowania równowagi ekologicznej.

Wiarygodna, jednolita analiza obszaru całego kraju pod kątem występowania deformacji terenu jest obecnie możliwa dzięki wykorzystaniu danych zdalnej obserwacji

[1] Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, Centrum Geozagrożeń, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa; maria.przylucka@pgi.gov.pl; michalina.cislo@pgi.gov.pl; ORCID ID: M. Przyłucka 0000-0002-2998-6008, M. Cisło 0009-0009-2733-9243

[2] Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, Centrum Geozagrożeń, ul. Skrzatów 1, 31-560 Kraków; zbigniew.perski@pgi.gov.pl; ORCID ID: 0000-0002-6727-7448

Ziemi. Zapoczątkowane w latach 90. XX w. metody przetwarzania satelitarnych scen radarowych (SAR) w technice interferometrii radarowej (InSAR) potwierdziły swoją użyteczność do identyfikacji zmian powierzchni terenu, również na skalę całego państwa (Cuenca i in., 2011; Novellino i in., 2017; Dehls i in., 2019; Festa i in., 2022). Niemniej jednak wielkopowierzchniowe przetwarzanie jest nadal wyzwaniem, wymaga dużych mocy obliczeniowych, przestrzeni dyskowej i zaawansowanego sprzętu. Przełomem w możliwościach monitoringu deformacji w ostatnich latach był dwie daty. Rok 2014 przyniósł wyniesienie na orbitę pierwszego satelity misji Europejskiej Agencji Kosmicznej *Sentinel-1*, której dane *Single Look Complex* (SLC, czyli surowe dane zawierające pełną informację amplitudową i fazową) ze stałym czasem rewizyty są pozyskiwane dla obszaru Europy i są dostępne nieodpłatnie. Drugą datą jest 2022 r., w którym Europejska Agencja Środowiska uruchomiła w ramach serwisów obserwacji lądów *Copernicus* (*Land Monitoring Service*) usługę do monitoringu zmian na powierzchni terenu – *European Ground Motion Service* (EGMS). Dostarcza ona spójnych, regularnych, znormalizowanych i zharmonizowanych informacji dotyczących naturalnych oraz antropogenicznych ruchów powierzchni terenu w Europie, niezależnie od granic administracyjnych państw, z milimetrową dokładnością (Crosetto i in., 2021; Costantini i in., 2021). Przemieszczenia są wyznaczane na podstawie analiz szeregów czasowych satelitarnych danych radarowych Sentinel-1 z wykorzystaniem metod interferometrii radarowej stabilnych rozpraszaczy *Persistent Scatterer Interferometry* (PSI, Crosetto i in., 2016). Zestawy danych są aktualizowane w interwale rocznym i są dostępne nieodpłatnie w formacie rastrowym i wektorowym dla obszaru wszystkich państw europejskich będących częścią inicjatywy *Copernicus*.

Wymienione dwa bardzo duże repozytoria danych (surowe sceny Senintel-1 oraz przetworzone, skalibrowane dane InSAR) stworzyły niespotykane dotychczas możliwości analizy deformacji ciągłych występujących na terenie Europy. Państwowa służba geologiczna wykorzystuje ten potencjał w ramach zadania I*nterferometryczny Monitoring Powierzchni Terenu Polski* (InMoTeP, Przyłucka i in., 2024b; https://www.pgi.gov.pl/monitoring-osiadan/o-projekcie.html). Celem projektu jest monitorowanie zachodzących deformacji powierzchni terenu z pułapu satelitarnego i informowanie o wynikach organów administracji samorządowej.

W artykule przedstawiono pierwsze wyniki projektu, do których należy kompleksowy współczesny obraz stanu osiadania i wypiętrzania powierzchni terenu dla obszaru całego kraju. Ponadto zaprezentowano przykład bardziej dokładnych wyników dla wybranych obszarów o szczególnym znaczeniu, gdzie analizy deformacji dokonano z wykorzystaniem niezależnego przywtórzenia danych SAR w technice narożnych reflektorów *Corner Reflectors InSAR* (CRInSAR).

OPIS METODY InSAR

Interferometria SAR (*Synthetic Aperture Radar Interferometry*), czyli InSAR, to technologia pomiarowa wykorzystująca różnice fazy sygnałów radarowych. Dane te pochodzą z sekwencyjnych obserwacji mikrofalowych wykonywanych przez satelity wyposażone w radar z syntetyczną aperturą (SAR, *Synthetic Aperture Radar*) podczas kolejnych przelotów nad tym samym obszarem. InSAR umożliwia precyzyjne mierzenie i monitorowanie w czasie niewielkich przemieszczeń powierzchni terenu. Dane InSAR otrzymuje się poprzez cyfrowe przetwarzanie zobrazowań SAR, które polega na obliczeniu różnic fazy na podstawie co najmniej dwóch takich zobrazowań, czego rezultatem jest interferogram – obraz różnic fazy wiązki mikrofal odbitych od powierzchni terenu. Szczegółowy opis podstaw metodyki, potencjału i obszarów zastosowań InSAR można znaleźć w pracach o charakterze przeglądowym np.: Bamler, Hartl (1998), Massonnet Feigl (1998), Rosen i in. (2000).

Powstała pod koniec lat 90. XX w. metoda interferometrii SAR doczekała się szeregu modyfikacji i rozwinięć pozwalających przezwyciężyć początkowe jej ograniczenia. Na początku lat 20. obecnego wieku stworzono algorytmy analizy wieloczasowych serii danych SAR (MTI, *Multi Temporal InSAR*), które umożliwiają badanie deformacji dla długich interwałów czasu. Dobry przegląd osiągnięć metodycznych przedstawiono w pracach Hoopera i in. (2012) oraz Crosetto i in. (2016).

Metoda przetwarzania MTI – *Persistent Scatterer Interferometry* (PSI), była pierwszą opracowaną i wdrożoną w praktyce metodą analiz wieloczasowych SAR (Ferretti i in., 1999; Crosetto i in., 2016). Służy do wyznaczania wielkości deformacji i odtworzenia historii deformacji danego obszaru na podstawie analizy wieloczasowej serii danych SAR. Wykorzystuje ona właściwości rozpraszaczy stabilnych (PS, *Persistent Scatterers*) na obrazie SAR – pikseli charakteryzujących się bardzo stabilną w czasie fazą sygnału radarowego, praktycznie niewrażliwą na zmiany geometrii obrazowania oraz warunki atmosferyczne. Mogą nimi być dachy i narożniki budynków, fragmenty różnego rodzaju konstrukcji, wysokie słupy telegraficzne, latarnie, wychodnie skał oraz specjalnie w tym celu konstruowane reflektory (Perissin, 2006; Perski, Wojciechowski, 2022).

Wynikiem przetwarzania PSI jest wektorowy zbiór punktów PS, którym przypisane są wartości średniej prędkości deformacji w kierunku LOS (*Line of Sight*), czyli w kierunku obrazowania satelity (kierunki wiązki fali mikrofalowej wysyłanej z satelity). Wartości te są obliczane względem punktu referencyjnego. Generowane są także serie czasowe ze względnymi wartościami przemieszczeń, wyliczonymi dla każdej daty pozyskanego obrazu w okresie rejestracji. Serie czasowe dla każdego punktu PS można przedstawić jako wykres szeregów czasowych (*time series*) punktów PS, prezentujący przebieg deformacji stabilnych rozpraszaczy w czasie, zgodnie z każdym pozyskaniem danych SAR dla pojedynczego punktu pomiarowego. Wykresy szeregów czasowych są użyteczne w ujawnianiu odchyleń od średniej prędkości na wybranym obszarze i pomagają w zrozumieniu trendów i ewolucji deformacji. Wizualizacja pomiarów w postaci wykresów szeregów czasowych pozwala na skorelowanie danych PSI z danymi pochodzącymi z innych urządzeń, np. temperaturą, opadami atmosferycznymi, pomiarami GNSS, odczytami z inklinometrów oraz piezometrów.

Wartości deformacji w kierunku LOS można interpretować w następujący sposób: dodatnie – ruch w kierunku satelity, ujemne – ruch w kierunku od satelity. Dla danych Seninel-1 kąt pomiędzy wiązką radaru a normalaną do powierzchni ziemi waha się od 29 do 46°. Satelita obrazuje ten sam obszar w dwóch geometriach: lecąc z północy na

południe i z południa na północ, dzięki temu możliwe jest otrzymanie wektora deformacji w dwóch kierunkach LOS. Natomiast mając dwa wektory w kierunku LOS, można wykonać dekompozycję ich wartości na wartości deformacji w kierunku poziomym wschód–zachód oraz pionowym. Ze względu na geometrię orbity i pracę radaru nie można uzyskać informacji o przemieszczeniach w kierunku ruchu satelity, a więc poziomych przemieszczeniach w kierunku północ–południe.

WYKORZYSTANE DANE

Dla obszaru Polski z serwisu EGMS zostały pobrane następujące dane będące wynikiem przetworzenia PSI, skalibrowane do globalnego układu współrzędnych oraz poddane dekompozycji do kierunku poziomego wschód–zachód i pionowego w regularnej siatce 100 m, dane pokrywały obszar kraju oraz obszary przygraniczne:

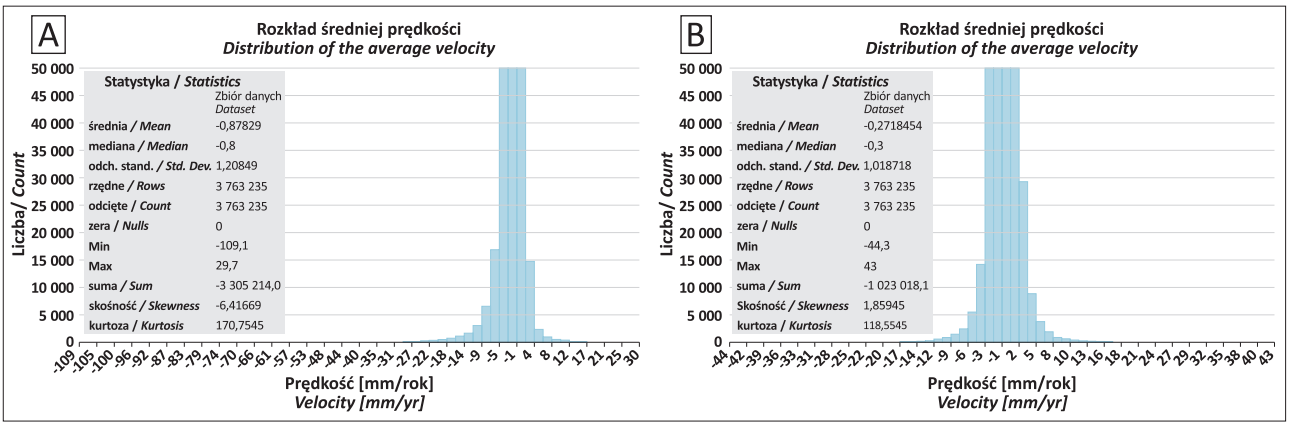
- ❏ 48 plików csv *Orto* (Level 3) w arkuszach o boku 100 km od E45N33 do E53N31, zawierających dane o deformacjach w kierunku poziomym wschód–zachód w okresie 2016–2020,
- ❏ 48 plików tiff z georeferencją *Orto* (Level 3) w arkuszach o boku 100 km od E45N33 do E53N31, zawierających dane o deformacjach w kierunku poziomym wschód–zachód w okresie 2016–2020,
- ❏ 48 plików csv *Orto* (Level 3) w arkuszach o boku 100 km od E45N33 do E53N31, zawierających dane o deformacjach w kierunku pionowym w okresie 2016–2020,
- ❏ 48 plików tiff z georeferencją *Orto* (Level 3) w arkuszach o boku 100 km od E45N33 do E53N31, zawierających dane o deformacjach w kierunku pionowym w okresie 2016–2020.

Dane w formacie csv zostały wczytane do środowiska GIS, a następnie przekonwertowane do formatu shp, tworząc wektorowe warstwy punktowe. Punkty pomiarowe z serwisu EGMS z poziomu L3 są zlokalizowane w siatce co 100 m, z wyłączeniem miejsc o niskiej koherencji, gdzie uzyskanie wiarygodnych punktów było niemożliwe. Dla każdego kierunku deformacji z każdego punktu wyodrębniono atrybut *velocity*, będący średnią prędkością ruchu danego punktu w okresie 2016–2020. Następnie warstwy połączono ze sobą i przycięto do granic Polski. Tak otrzymano dwa wynikowe punktowe pliki wektorowe – ze średnimi prędkościami w kierunku pionowym oraz poziomym wschód–zachód.

Dane w formacie tiff zostały również wczytane do środowiska GIS, złączone, a następnie przycięte do granic administracyjnych państwa. W ten sposób otrzymano dwa wynikowe rastry o rozdzielczości 100 m, ilustrujące średnie deformacje w kierunku pionowym i poziomym wschód–zachód. Każdy piksel rastra, dla którego istnieje wartość deformacji, odpowiada jednemu punktowi z pliku wektorowego. W miejscach, gdzie nie uzyskano wiarygodnego punktu pomiarowego, raster otrzymał wartość brak danych.

Ostatecznie uzyskano 3 763 235 punktów pomiarowych dla obszaru Polski, co daje średnio 12 punktów na km^2. Rozproszenie punktów jest jednak bardzo nieregularne. Zgodnie z oczekiwaniami wynikającymi z ograniczeń metody, najwięcej punktów otrzymano na obszarach zurbanizowanych oraz wzdłuż tras komunikacyjnych, a najmniej na terenach pokrytych wysoką roślinnością (Poyiadji i in., 2018).

Wartości uznawane za stabilne, w zakresie od –2 do 2 mm/rok, występują dla 91,5% punktów (tj. 3 445 023). Osiadanie, a więc wartości mniejsze niż –2 mm/rok, występuje na 8,1% punktów (tj. 306 234), natomiast podnoszenie, czyli wartości większe niż 2 mm/rok – 0,3% punktów (tj. 11 978). Pełen histogram wartości średnich prędkości w kierunku pionowym przedstawiono na rycinie 1A. Można na nim zaobserwować lekką asymetrie wykresu, skrętność (–6), spowodowaną większą liczbą punktów osiadających niż wypiętrzających. Średnia wartość punktów wynosi –0,9 mm/rok, a odchylenie standardowe 1,2. Maksymalna zarejestrowana wartość dodatnia to 29,7 mm/rok, podczas gdy maksymalna wartość ujemna to –109,1 mm/rok. Dla kierunku poziomego wschód–zachód wartości uznawane za stabilne, w zakresie od –2 do 2 mm/rok występują na 96,3% punktów (tj. 3 625 245). Deformacje w kierunku zachodnim, a więc wartości mniejsze niż –2 mm/rok, występują na 2,4% punktów (tj. 90 594), natomiast deformacje w kierunku wschodnim, czyli wartości większe niż 2 mm/rok – na 1,3% punktów (tj. 47 396). Pełen histogram wartości średnich prędkości przedstawiono na rycinie 1B. Histogram przyjmuje rozkład normalny, ze średnią wartością



Ryc. 1. Histogram średnich prędkości w kierunku pionowym (**A**) oraz poziomym wschód–zachód (**B**) punktów PS z serwisu EGMS dla okresu 2016–2020 na terenie Polski. Oś „Y" została ograniczona do 50 000 (zamiast 2 mln), aby zapewnić czytelność całego wykresu
Fig. 1. Histogram of average velocities in the vertical (**A**) and horizontal east–west (**B**) directions of PS points from the EGMS service for 2016–2020 in Poland. The "Y" axis has been limited to 50,000 (instead of 2 M) to ensure readability of the entire graph

–0,3 mm/rok i odchyleniem standardowym 1,0. Maksymalna zarejestrowana wartość dodatnia (ruch w kierunku wschodnim) wynosi 43,0 mm/rok, podczas gdy maksymalna wartość ujemna (ruch w kierunku zachodnim) –44,3 mm/rok.

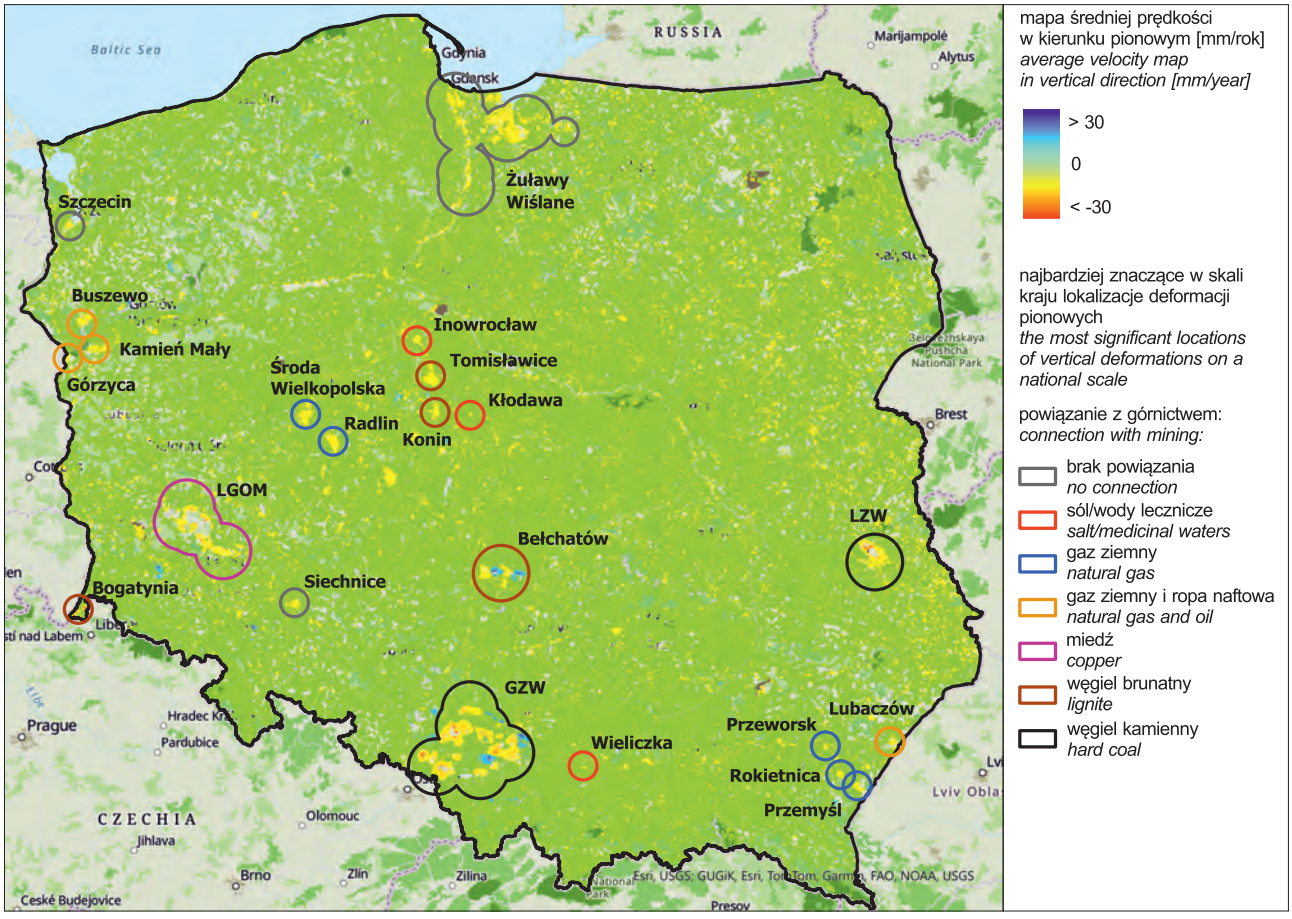
Wartości deformacji poziomych są bardzo niewielkie na całym obszarze kraju. Pojedyncze lokalizacje, na których można zauważyć większe zgrupowania punktów, gdzie takie deformacje występują, są związane z dużym osiadaniem (jest to głównie rejon Górnośląskiego i Lubelskiego Zagłębia Węglowego oraz Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego – GZW, LZW, LGOM). Deformacje ciągłe, istotne w skali kraju, zostały zidentyfikowane głównie na podstawie analizy przemieszczeń pionowych.

W ramach zadania prowadzony jest również monitoring InSAR z wykorzystaniem sztucznych reflektorów radarowych na wybranych obszarach o szczególnym znaczeniu: obszary osuwiskowe Karpat, gmina Wapno, kopalnia soli Kłodawa, wybrane odkrywki węgla brunatnego w okolicach Konina. W celu uzyskania ciągłych wykresów zmian położenia reflektorów w czasie, pokrywających jak najdłuższy okres, zostały pozyskane surowe sceny SLC satelity Sentinel-1, które następnie przetworzono w oprogramowaniu InTOP. Wykresy względnych zmian położenia zostały wykonane z konwersją na kierunek pionowy i poziomy wschód–zachód. Wybrane wyniki analiz przedstawiono poniżej. Z dokładnym opracowaniem można się zapoznać w raportach np. Perskiego (2024a, b) czy Perskiego i Mazurka (2024).

Największe deformacje ciągłe w Polsce występują na terenie GZW. Dla tego obszaru została wykonana analiza długookresowa osiadań spowodowanych wieloletnim wydobyciem węgla kamiennego obejmująca teren całego zagłębia. Przeprowadzono ją na podstawie archiwalnych danych SAR oraz najnowszych danych Sentinel-1 – łącznie z okresu 1992–2020 r. Dodatkowo wykorzystano archiwalny zarys topografii terenu pochodzący z wektoryzacji map topograficznych Messtischblatt w skali 1 : 25 000 (do ogólnej oceny zmian długookresowych), a także numeryczne modele terenu z danych Lidar z lat 2012 i 2021. Wyniki zostały przedstawione w odrębnych opracowaniach np. Przyłuckiej i in. (2024a) czy Przyłuckiej i Suszki (2024)

MAPA DEFORMACJI POWIERZCHNI TERENU POLSKI

Stworzono dwie mapy deformacji powierzchni terenu obejmujące obszar Polski: w kierunku pionowym oraz w kierunku poziomym wschód–zachód. Każda z map zawiera dwie warstwy: warstwę pochodzącą z interpolacji wartości punktów pomiarowych z serwisu EGMS (interpolacja została wykonana metodą triangulacji za pomocą funkcji tworzenia siatki wysokościowej z warstwy punktowej w programie Global Mapper) i warstwę pikseli o boku 100 m, pochodzącą z punktów pomiarowych danych z serwisu EGMS. Na rycinie 2 przedstawiono mapę deformacji



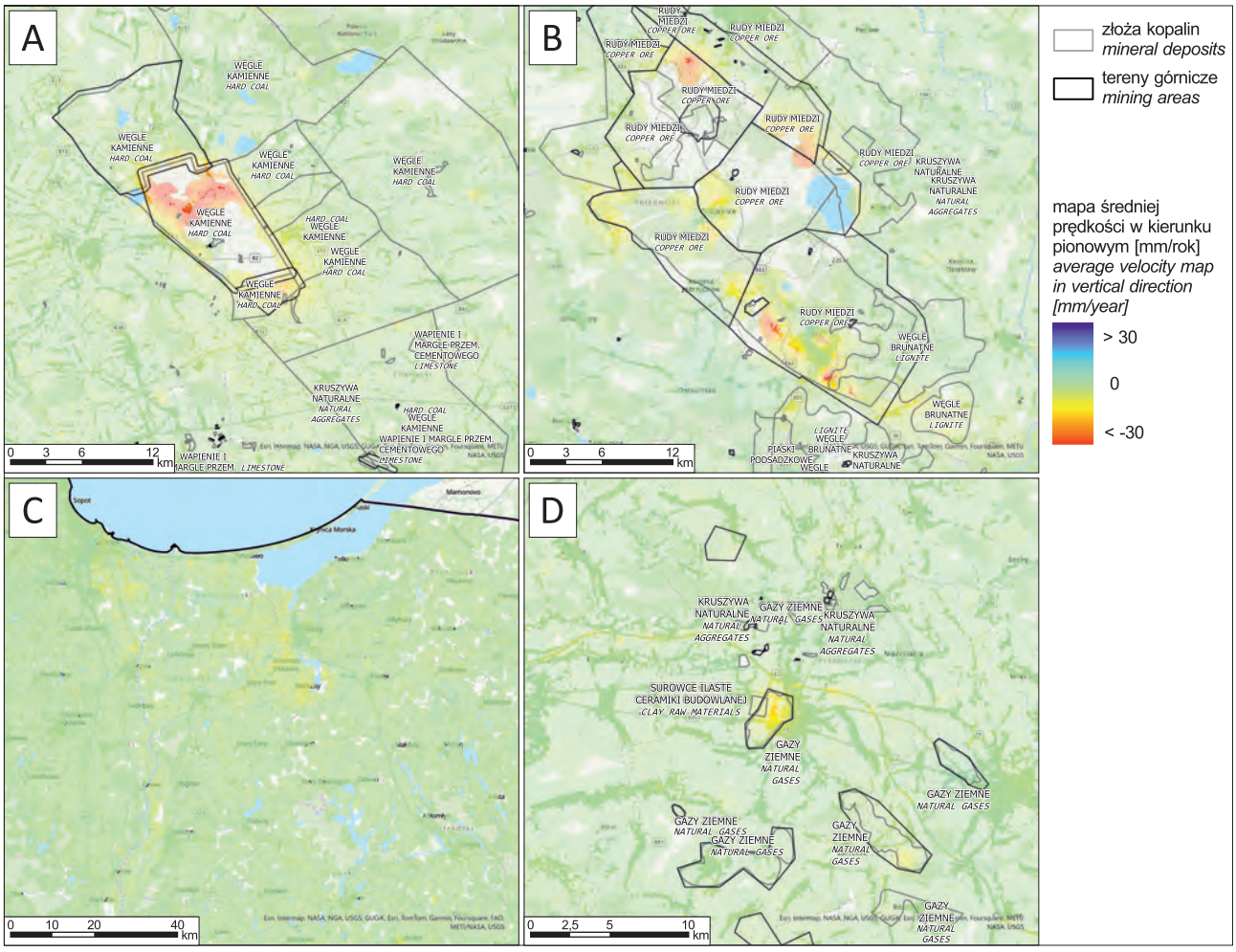
Ryc. 2. Mapa deformacji powierzchni terenu w kierunku pionowym na podstawie danych serwisu EGMS dla okresu 2016–2020; lokalizacje występujących deformacji ciągłych, istotnych w skali kraju

Fig. 2. Map of ground surface deformation in the vertical direction based on EGMS data for 2016–2020; locations of continuous deformations, significant on a national scale

powierzchni terenu w kierunku pionowym. Ze względu na bardzo niewielkie przemieszczenia w kierunku poziomym, widoczne jedynie po powiększeniu wybranych obszarów, w artykule nie zamieszczono ryciny przedstawiającej poziome deformacje, mapa jest dostępna na geoportalu PIG-PIB (https://geologia.pgi.gov.pl/mapy/?page=Deformacje-terenu).

W celu identyfikacji miejsc, na których zachodziły deformacje istotne w skali kraju, wykonano analizę geostatystyczną na podstawie 4 mln punktów pomiarowych serwisu EGMS dla obszaru Polski. Punkty zostały połączone z siatką regularnych kwadratów o boku 2 km. Następnie wykonano grupowanie kwadratów, na których wystąpiła duża liczba punktów o wartościach poza zakresem od –2 do +2 mm/rok. W następnych krokach usunięto lokalizacje, w których nie zidentyfikowano pionowych przemieszczeń, oraz te miejsca regularnej siatki kwadratów, gdzie de- formacje nie były znaczące (tj. nie przekraczały zakresu +/– 2 mm/rok). W ten sposób zostało wyznaczonych 308 lokalizacji, na których w okresie 2016–2020 wystąpiły deformacje w Polsce. Poligonom przypisano klasy ważności od 1 (najniższa klasa ważności) do 3 (najwyższa klasa ważności) w zależności od średniej prędkości ruchu zarejestrowanego na punktach PS oraz od powierzchni poligonu Sumarycznie poligony zajmują niecałe 7 tys. km^2, stanowiąc 2% powierzchni kraju. W ich granicach znajduje się 93 tys. punktów PS, na których zarejestrowano większe prędkości deformacji. W celu interpretacji, wyznaczone lokalizacje występowania deformacji zestawiono z granicami terenów górniczych bazy MIDAS (https://midasinfo.pgi.gov.pl/). Brak związku z prowadzoną eksploatacją górniczą wykazano dla 244 lokalizacji, ale tylko 28 z nich przypisano klasę ważności „2" (pozostałe mają klasę „1" i można je uznać za mało istotne). Pozostała część deformacji jest związana z prowadzoną działalnością górniczą kruszyw naturalnych, węgli kamiennych i brunatnych, gazu i ropy, rud miedzi, soli oraz wód leczniczych. Na podstawie przeprowadzonej analizy można stwierdzić, że deformacje ciągłe występujące na powierzchni terenu Polski są związane głównie z działalnością górniczą. Niewielkie, powierzchniowo zarejestrowane inne lokalizacje to prawdopodobnie osiadania związane z posadowieniem nowych budynków lub budową tras komunikacyjnych. Weryfikacja tych zjawisk będzie przedmiotem dalszych analiz.

Warstwa poligonów występowania deformacji pozwoliła na wyznaczenie 22 lokalizacji, gdzie zdaniem zespołu występują deformacje istotne w skali kraju. Zaliczono do nich wszystkie miejsca, gdzie zidentyfikowano poligony o klasie ważności „3" oraz większe poligony o klasie ważności „2". Każde z tych miejsc przejrzano manualnie w kontekście występujących tam deformacji, rozkładu punktów PS oraz prowadzonej działalności górniczej.



Ryc. 3. Mapa średnich prędkości w kierunku pionowym, pozyskanych z serwisu EGMS dla okresu 2016–2020: **A** – Lubelskie Zagłębie Węglowe, **B** – Legnicko-Głogowski Okręg Miedziowy, **C** – Żuławy Wiślane, **D** – Przeworsk

Fig. 3. Map of average vertical velocities obtained from the EGMS service for the period 2016–2020: **A** – Lublin Coal Basin, **B** – Legnica-Głogów Copper District, **C** – Żuławy Wiślane, **D** – Przeworsk

Lokalizacje zostały przedstawione na rycinie 2 na tle mapy średnich prędkości w kierunku pionowym.

Dla dwóch lokalizacji (Szczecin i Żuławy Wiślane) nie znaleziono prostego powiązania z górnictwem. Analiza tych obszarów wymaga przeprowadzenia dodatkowych badań i będzie kontynuowana w dalszych etapach realizacji zadania. W pozostałych lokalizacjach występuje bezpośrednie powiązanie z prowadzoną eksploatacją górniczą.

Przybliżenie wybranych lokalizacji przedstawiono na rycinie 3. Mapa średnich prędkości w kierunku pionowym na terenie LZW (ryc. 3A) uwidoczniła nieckę obniżeniową powstałą nad złożem Bogdanka. Zarejestrowane osiadanie występuje w granicach terenów górniczych Ludwin, Puchaczów V i Stręczyn, którego największa wartość wynosi –41 mm/rok. Duże wartości osiadania zarejestrowano na obszarze LGOM (ryc. 3B), jednak dla sporej części obszaru występuje brak danych z uwagi na niską koherencję wywołaną roślinnością. Widoczne osiadanie jest związane z wydobyciem rud miedzi na kilku złożach, m.in. Polkowice, Lubin-Małomice, Rudna, Sieroszowice. Największa zarejestrowana wartość wynosi –45 mm/rok. Ciekawą lokalizacją, na której wykryto obszar niewielkiego (do –31 mm/rok, średnio –3 mm/rok) osiadania, są Żuławy Wiślane (ryc. 3C). Zaobserwowane tam zmiany powierzchni terenu mają małe wartości, ale i pokrywają spójny, rozległy teren, który znajduje się na obszarze depresji. W pojedynczych przypadkach takie niewielkie osiadanie może być związane z posadowieniem nowych budynków lub budową tras komunikacyjnych, jednak w tym wypadku zastanawia występowanie ruchów terenu na dużym obszarze jednocześnie. Przyczyny tych zmian geodynamicznych są przedmiotem bardziej szczegółowych analiz. Osiadanie do –15 mm/rok zostało zauważone w okolicach Przeworska (ryc. 3D), gdzie jest widoczna niecka związana z wydobyciem gazu ziemnego.

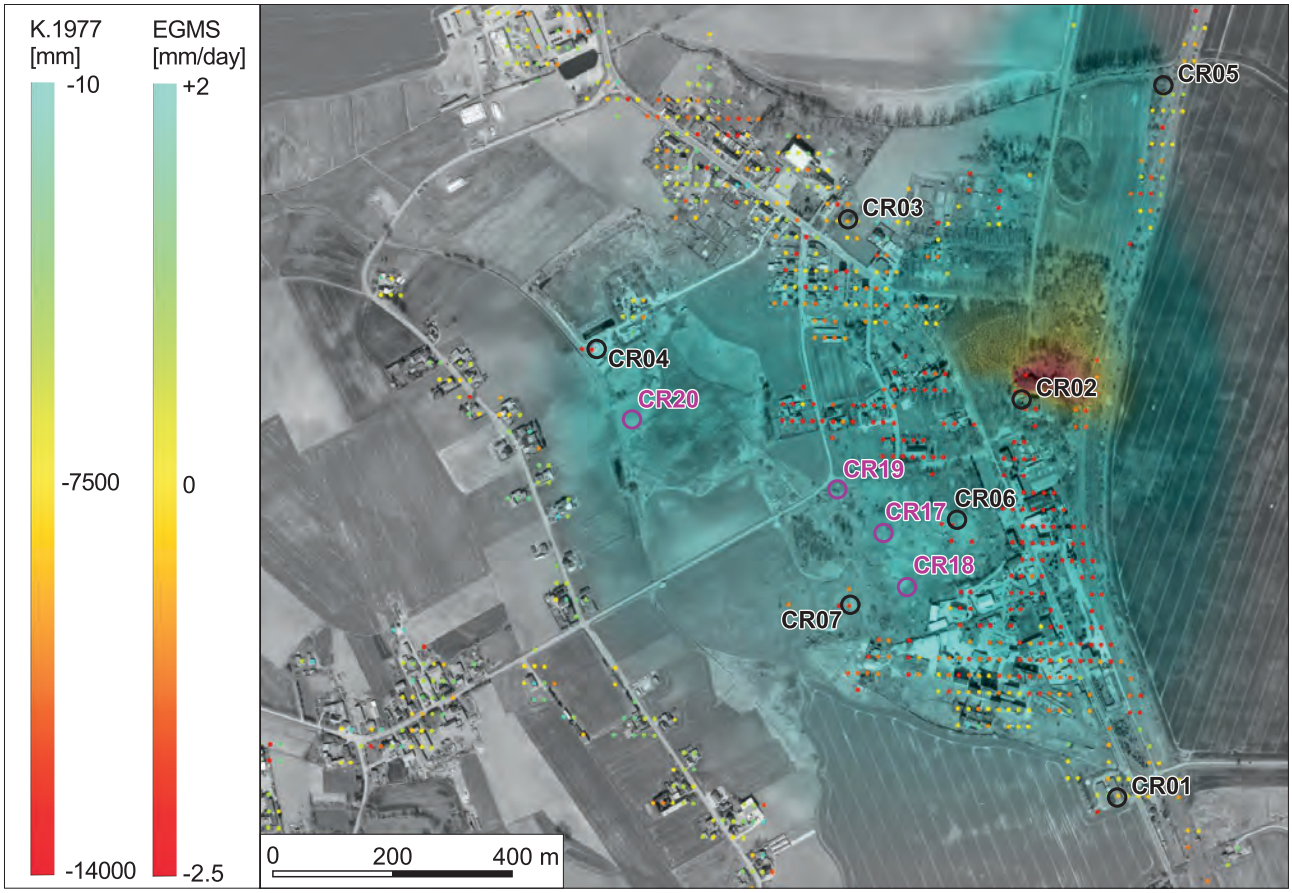
WYNIKI BADAŃ SZCZEGÓŁOWYCH

Pomiary deformacji z użyciem reflektorów radarowych

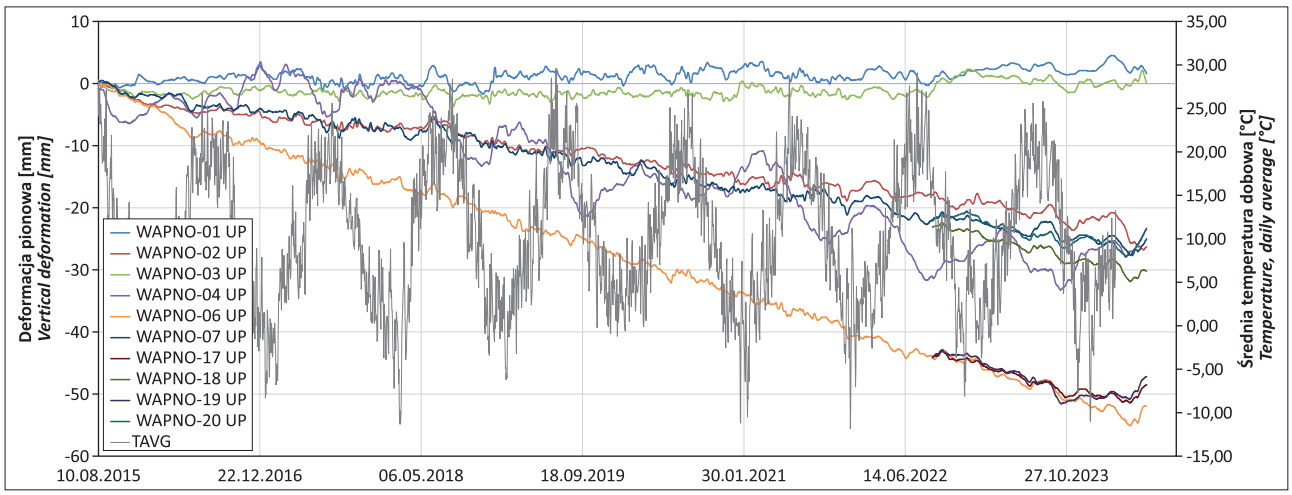
Infrastruktura badawcza w postaci reflektorów radarowych, zwanych też reflektorami narożnikowymi (CR, *corner reflector*), pozwala na wyznaczenie zmian powierzchni terenu z dokładnością nawet 1 mm. Serie czasowe deformacji mierzonych za pomocą reflektorów otrzymuje się na bazie interferometrycznego przetwarzania danych SAR metodyką CRInSAR. Na podstawie doświadczeń z lat 2013–2015 (Perski, Wojciechowski, 2022) w 2017 r. rozpoczęto instalację pierwszych reflektorów radarowych na osuwiskach. Zainstalowano je wówczas na dwóch osuwiskach w Szymbarku. W latach następnych w reflektory wyposażono osuwiska w Grybowie i Kłodnem, a w 2020 r. w Słotowej. Poza terenami osuwiskowymi reflektory zainstalowano również na terenach górniczych i pogórniczych kopalnictwa podziemnego soli kamiennej (w Wapnie w latach 2015 i 2022 – ryc. 4. – patrz str. 689, oraz w Kłodawie w 2022 r. – ryc. 5 – patrz str. 690) oraz wydobycia odkrywkowego węgla brunatnego KWB *Konin* (w 2022 r.) – ryc. 6 – patrz str. 689. Każdą z wymienionych lokalizacji wyposażono docelowo w 2–11 reflektorów, przy czym za każdym razem jedn lub dwa z nich zlokalizowano poza obszarem występowania deformacji. Reflektory te pełnią funkcję punktów referencyjnych. Sa one montowane na żelbetonowych podstawach zagłębionych na 1,5 m w gruncie, dzięki czemu wyeliminowano wpływ przemarzania górnej warstwy gleby oraz pełznięcia warstw powierzchniowych. Szczegółowo wyniki pomiarów CRInSAR na monitorowanych osuwiskach omówiono w pracy Perskiego i Wojciechowskiego (2022).

Przykład wyników badań szczegółowych obejmuje miejscowość Wapno, która w przeszłości została dotknięta znacznymi deformacjami terenu, w ich wyniku duża część miejscowości została zniszczona. Katastrofa miała miejsce 5 sierpnia 1977 r., kiedy na skutek wtargnięcia wód podziemnych do wyrobisk kopalni soli Wapno, na powierzchni terenu zaczął się tworzyć lej sufozyjny, a towarzyszące mu zapadlisko osiągnęło ponad 20 m głębokości. Miejscowość do dzisiaj boryka się z deformacjami terenu i towarzyszącym im uszkodzeniom budynków i infrastruktury. Badania geologiczne i pomiary deformacji były prowadzone na tym obszarze w ramach wielu projektów, jednak nie są kontynuowane w sposób systematyczny (Rasała i in., 2013). Po analizie wyników wcześniejszych pomiarów deformacji i w porozumieniu z władzami Wapna wytypowano 7 lokalizacji pod reflektory radarowe . Całą infrastrukturę udało się umieścić na terenach należących do gminy. Lokalizacje dobierano w ten sposób, by jeśli to możliwe pokrywały się z wystąpieniami wcześniejszych anomalii zmian powierzchni terenu. Reflektory CR06 i CR07 rozmieszczono na terenie dawnego wyrobiska kopalni gipsu, natomiast CR02 na południe od obszaru zapadliska z 1977 r. Obszar zapadliska został zrekultywowany i jest porośnięty lasem (parkiem), co uniemożliwia prowadzenie na tym obszarze obserwacji satelitarnych. W celu zagęszczenia sieci pomiarowej i uzyskania danych pomiarowych w zachodniej części obszaru Wapna na terenie zabagnionego obniżenia doliny rynnowej Jeziora Czeszewskiego w 2022 r. zainstalowano 4 kolejne reflektory (CR17–CR20). Z uwagi na brak zabudowy i bujną roślinność, obszar ten, leżący pomiędzy dawnym wyrobiskiem powierzchniowym zwanym „Gipsiakiem" a rejonem oczyszczalni ścieków, był pozbawiony naturalnych rozpraszaczy PS. Lokalizacja reflektorów została przedstawiona na rycinie 7.

Dla serii czasowych danych CRInSAR obliczonych na podstawie danych SAR z satelitów Sentinel-1 z lat 2015–2024 metodą analityki wizualnej (ryc. 8) przeprowadzono analizę zebranych danych. Metoda ta służy do badania zbiorów danych przy użyciu ich wizualnej reprezentacji. Wizualizacja danych na wykresach, pomaga identyfikować zależności i wzorce, a tym samym opracowywać praktyczne spostrzeżenia i wnioski. W celu określenia wpływu warunków środowiskowych na reflektory wielkości przemieszczeń porównano z ogólnymi danymi meteorologicznymi. Były to średnie dobowe temperatury oraz dobowe sumy opadów. Do analiz wykorzystano ogólnodostępne dane z najbliższej stacji Ławica k. Poznania na podstawie zbioru danych *Global Historical Climatology Network* (GHCN). Wyznaczone przemieszczenia pozwoliły stwierdzić, iż CR05 pozostaje stabilny, podczas gdy CR07 i CR06 ulegają silnemu obniżaniu. Z ogólnego rozkładu deformacji wynika, że reflektor CR06 jest położony w pobliżu centrum rozwijającej się niecki obniżeniowej. Natomiast reflektor CR04, znajdujący się podmokłej pradolinie Jeziora Czeszewskiego, w pobliżu oczyszczalni ścieków, podlega również stałym obniżeniom, jednak na w miarę liniowe obniżanie nakłada się silny, cykliczny, sezonowy wpływ



Ryc. 7. Rozmieszczenie reflektorów na tle danych PSI EGMS oraz rozkładu deformacji powstałych w wyniku katastrofy w 1977 r. Kolorem różowym zaznaczono nowe reflektory zainstalowane w 2022 r.
Fig. 7. The positioning of reflectors against the background of PSI EGMS data and the distribution of deformations resulting from the 1977 disaster. New reflectors installed in 2022 are marked in pink



Ryc. 8. Przebieg deformacji reflektorów poligonu Wapno w latach 2015–2024 na tle zmienności średniej dobowej temperatury powietrza
Fig. 8. The course of deformation of the Wapno area corner reflectors in the years 2015–2024 against the background of the variability of the daily average air temperature

najprawdopodobniej związany z wahaniami zwierciadła wód podziemnych. Silne obniżenie towarzyszy okresowi letnio-jesiennemu, po którym w okresie zimowo-wiosennym następuje relatywne podnoszenie. Magnituda zmian sezonowych mieści się w zakresie ok. 10 mm.

Jeśli chodzi o reflektory zainstalowane w 2022 r. (o numerach CR17–CR20) to analizowany okres jest jeszcze zbyt krótki dla pełnej interpretacji danych. Wstępne wyniki pokazują początkowy okres dynamicznych zmian związanych ze stabilizacją reflektorów w gruncie (ok. pierwsze 4 miesiące). Zmiany sezonowe zaczynają być widoczne po pierwszym sezonie letnim (październik 2023 r.). Reflektory CR17–CR19 wykazują wyraźne obniżenia. Reflektor CR20 jest zlokalizowany, podobnie jak reflektor CR04, w obrębie podmokłej pradoliny Jeziora Czeszewskiego. Wykazuje on stosunkowo niewielkie obniżenia, jednak ich pełna interpretacja wymaga prowadzenia obserwacji w dłuższym czasie.

PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono wyniki etapu II projektu *Interferometryczny Monitoring Powierzchni Terenu Polski*. Na podstawie danych EGMS opracowano dwie mapy deformacji powierzchni terenu Polski – w kierunku pionowym oraz poziomym (wschód–zachód). Analiza 4 mln punktów pomiarowych pozwoliła na identyfikację 308 lokalizacji, gdzie w latach 2016–2020 wystąpiły znaczące przemieszczenia, głównie związane z działalnością górniczą. Wyznaczono 22 kluczowe obszary deformacji w skali kraju. Największe osiadania zaobserwowano w rejonach górniczych, m.in. GZW, LZW oraz LGOM.

Pierwsza mapa deformacji ciągłych na terenie Polski oraz analiza geostatystyczna danych wektorowych z serwisu EGMS potwierdziły duży potencjał tych danych. W przyszłości są planowane dalsze analizy, które pozwolą na precyzyjne określenie trendów zmian w rzeźbie terenu oraz identyfikację obszarów wymagających szczegółowego monitoringu. Cykliczna aktualizacja danych EGMS o każdy kolejny rok danych pozwoli również na przeprowadzenie analiz zmian występujących trendów przemieszczeń.

W umowie Europejskiej Agencji Środowiska na produkcję danych EGMS zawarto wykonanie przetworzeń do 2028 r., z czterema kolejnymi aktualizacjami. Planowane jest udostępnienie zaktualizowanych danych za lata 2020–2024 do listopada br. Obecnie trwają testy ulepszeń systemu produkcji oraz platformy wizualizacyjnej.

Zadanie PSG *Interferometryczny Monitoring Powierzchni Terenu Polski* jest finansowane ze środków Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej (NFOŚiGW). Realizowany od lipca 2024 r. III etap projektu pozwoli na prowadzenie dalszych badań zmian powierzchni terenu dla kraju i wykonanie kolejnych map deformacji dla każdej nowej ramki czasowej danych udostępnionych w serwisie EGMS.

Projekt otworzył nowe możliwości wykorzystania danych satelitarnych do analizy deformacji. Sentinel-1, kluczowa misja programu *Copernicus*, dostarcza obrazy radarowe niezależnie od warunków atmosferycznych i pory dnia. Po zakończeniu działalności Sentinel-1B w 2022 r., kontynuacja misji obejmuje uruchomienie Sentinel-1C umieszczonego na orbicie w grudniu 2024 r. oraz zastąpienie pracującego od 2014 r. Sentinel-1A przez Sentinel-1D w drugiej połowie 2025 r. Darmowe dane zarówno misji Sentinel-1, jak i gotowe przetworzenia EGMS pozwalają PSG na prowadzenie stałych analiz i identyfikację miejsc występowania deformacji na terenie kraju. Gotowe mapy deformacji dla kolejnych przedziałów czasowych, udostępniane wraz z opisem w formie raportu na geoportalu PIG-PIB, mogą natomiast być pomoce dla jednostek administracji samorządowej i innych podmiotów publicznych w zakresie przeciwdziałania zagrożeniom geologicznym. Mapy deformacji wskazują miejsca, gdzie deformacje zachodzą i gdzie można spodziewać się ewentualnego zagrożenia dla obiektów budowlanych. Wiedza o tych obszarach jest szczególnie pożądana, zwłaszcza na obszarach, na których podziemna eksploatacja surowców skalnych została zakończona.

Autorzy składają serdeczne podziękowania dla Recenzentów za wartościowe uwagi, które pozwoliły znacznie polepszyć treść artykułu. Praca badawcza została wykonana w ramach projektu Państwowego Instytutu Geologicznego – Państwowego Instytutu Badawczego *Interferometryczny Monitoring Powierzchni Terenu Polski (InMoTeP) – etap II*, finansowanego przez Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej (nr umowy 343/2021/Wn-07/FG-go-dn/D).

LITERATURA

BAMLER R., HARTL P. 1998 – Synthetic aperture radar interferometry. Inverse Problems, 14: R1–R54.

COSTANTINI M., MINATI F., TRILLO F., FERRETTI A., NOVALI F., PASSERA E., DEHLS J., LARSEN Y., MARINKOVIC P., EINEDER M., BRCIC R., SIEGMUND R., KOTZERKE P., PROBECK M., KENYERES A., PROIETTI S., SOLARI L., ANDERSEN H.S. 2021 – European ground motion service (EGMS). [W:] 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS, 293–3296.

CROSETTO M., MONSERRAT O., CUEVAS-GONZÁLEZ M., DEVANTHÉRY N., CRIPPA B. 2016 – Persistent Scatterer Interferometry: A review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 115: 78–89; doi: 10.1016/j.isprsjprs.2015.10.011.

CROSETTO M., SOLARI L., BALASIS-LEVINSEN J., BATESON L., CASAGLI N., FREI M., OYEN A., MOLDESTAD D.A., MRÓZ M. 2021 – Deformation Monitoring at European Scale: The Copernicus Ground Motion Service. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLIII-B3-2021: 141–146; doi: 10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2021-141-2021.

CUENCA M.C., HANSSEN R., HOOPER A., ARIKAN M. 2011 – Surface deformation of the whole Netherlands after PSI analysis. [W:] Proceedings of the Fringe 2011 Workshop, Frascati, Italy, 19–23 September 2011 (ESA SP-697, January 2012), 19–23.

DEHLS J.F., LARSEN Y., MARINKOVIC P., LAUKNES T.R., STØDLE D., MOLDESTAD D.A. 2019 – INSAR.No: A National Insar Deformation Mapping/Monitoring Service In Norway -- From Concept To Operations. [W:] Proceedings of 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Yokohama, Japan, 2019, 5461–5464; doi: 10.1109/IGARSS.2019.8898614.

FERRETTI A., PRATI C., ROCCA F. 1999 – Permanent Scatterers in SAR Interferometry. [W:] International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Hamburg, Germany, 28 June–2 July 1999, 1–3

FESTA D., BONANO M., CASAGLI N., CONFUORTO P., DE LUCA C., DEL SOLDATO M., LANARI R., LU P., MANUNTA M., MANZO M., ONORATO G., RASPINI F., ZINNO I., CASU F. 2022 – Nation-Wide Mapping and Classification of Ground Deformation Phenomena through the Spatial Clustering of P-SBAS InSAR Measurements: Italy Case Study. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 189: 1–22; doi: 10.1016/j.isprsjprs.2022.04.022.

HOOPER A., BEKAERT D., SPAANS K., ARIKAN M. 2012 – Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation. Tectonophysics, 514–517: 1–13; doi: 10.1016/j.tecto.2011.10.013.

https://cbdgmapa.pgi.gov.pl/arcgis/services/geozagrozenia/inmotep/MapServer/WMSServer

https://geologia.pgi.gov.pl/mapy/?page=Deformacje-terenu

https://midasinfo.pgi.gov.pl/

https://www.pgi.gov.pl/monitoring-osiadan/o-projekcie.html

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.

NOVELLINO A., CIGNA F., BRAHMI M., SOWTER A., BATESON L., MARSH S. 2017 – Assessing the Feasibility of a National InSAR Ground Deformation Map of Great Britain with Sentinel-1. Geosciences, 7 (2): 19; doi: 10.3390/geosciences7020019.

PERISSIN D. 2006 – SAR super-resolution and characterization of urban targets. PhD thesis 139.

PERSKI Z. 2024a – Interferometryczny Monitoring Powierzchni Terenu Polski – Analizy deformacji dla terenów o szczególnym znaczeniu, Obszary osuwiskowe w Karpatach, efekt rzeczowy z realizacji przedsięwzięcia z zakresu państwowej służby geologicznej za okres: od 1 kwietnia 2024 r. do 30 czerwca 2024 r., umowa 343/2021/Wn-07/FG-go-dn/D z dnia 06.05.2021 r. Raport PIG-PIB, Warszawa.

PERSKI Z. 2024b – Interferometryczny Monitoring Powierzchni Terenu Polski – Analizy deformacji dla terenów o szczególnym znaczeniu, Wapno, efekt rzeczowy z realizacji przedsięwzięcia z zakresu państwowej służby geologicznej za okres: od 1 kwietnia 2024 r. do 30 czerwca 2024 r., umowa 343/2021/Wn-07/FG-go-dn/D z dnia 06.05.2021 r. Raport PIG-PIB, Warszawa.

PERSKI Z., MAZUREK S. 2024 – Interferometryczny Monitoring Powierzchni Terenu Polski – Analizy deformacji dla terenów o szczególnym znaczeniu, Opracowanie geologiczne, Konin i Kłodawa, efekt rzeczowy z realizacji przedsięwzięcia z zakresu państwowej służby geologicznej za okres: od 1 kwietnia 2024 r. do 30 czerwca 2024 r., umowa

343/2021/Wn-07/FG-go-dn/D z dnia 06.05.2021 r. Raport PIG-PIB, Warszawa.
PERSKI Z., WOJCIECHOWSKI T. 2022 – Monitoring dynamiki ruchów powierzchni osuwisk w warunkach zmiennego poziomu wód gruntowych z wykorzystaniem reflektorów radarowych. Przegląd Geologiczny, 70 (9): 661–670; doi: 10.7306/2022.20.
POYIADJI E., STEFOULI M., PRZYŁUCKA M., WOŁKOWICZ S., KOWALSKI Z., HADJIGEORGIOU C., WOROSZKIEWICZ M. 2018 – Introduction of remote sensing methods for monitoring the under restoration Amiantos Mine, Cyprus. [W:] Themistocleous K., Papadavid G., Michaelides S., AmbrosiaV., Hadjimitsis D.G. (red.), Sixth International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2018). Proceedings of SPIE, 10773: 403–412; doi: 10.1117/12.2326114.
PRZYŁUCKA M., PERSKI Z., KOWALSKI Z. 2024a – Long-Term Subsidence over the Upper Silesia Coal Basin Identified on Differential LIDAR (2012–2021) and InSAR (2015–2020) Data. Geological Quarterly, 68, 17; doi: 10.7306/gq.1745.
PRZYŁUCKA M., PERSKI Z., CISŁO M. 2024b – Interferometryczny Monitoring Powierzchni Terenu Polski – Sprawozdanie z wykonanych prac, efekt rzeczowy z realizacji przedsięwzięcia z zakresu państwowej służby geologicznej za okres: od 1 kwietnia 2024 r. do 30 czerwca 2024 r., umowa 343/2021/Wn-07/FG-go-dn/D z dnia 06.05.2021 r. Raport PIG-PIB, Warszawa.
PRZYŁUCKA M., SUSZKA G. 2024 (red.) – Interferometryczny Monitoring Powierzchni Terenu Polski – Analizy deformacji dla terenów o szczególnym znaczeniu, Górnośląskie Zagłębie Węglowe, efekt rzeczowy z realizacji przedsięwzięcia z zakresu państwowej służby geologicznej za okres: od 1 kwietnia 2024 r. do 30 czerwca 2024 r., umowa 343/2021/Wn-07/FG-go-dn/D z dnia 06.05.2021 r. Raport PIG-PIB, Warszawa.
RASAŁA M., GÓRSKI J., KARCZ P., KORTAS G., MAJ A., HERMANOWSKI P., RATAJCZAK R., GRZYBOWSKI Ł., TUNAK A., WILKOSZ P., BEGIER M., MIĘŻALIK Ł. 2013 – Dokumentacja geologiczna określająca stopień zagrożenia terenu pogórniczego kopalni soli w Wapnie w zakresie określenia jego przydatności do zagospodarowania i rewiatlizacji. Hydro-Nafta Sp. z o.o. i Uniwersytet im. Adama Mickiewicza, Piła.
ROSEN P., HENSLEY S., JOUGHIN I.R., LI F.K., MADSEN S., RODRÍGUEZ E., GOLDSTEIN R. 2000 – Synthetic Aperture Radar Interferometry. Proceedings of the IEEE, 88 (3): 333–382.
USTAWA, 2011 – Ustawa z dnia 9 czerwca 2011 r. – Prawo geologiczne i górnicze. Dz.U. z 2024 r. poz. 1290.

Praca wpłynęła do redakcji 20.03.2025 r.
Akceptowano do druku 20.05.2025 r.

Ryc. 4. Naziemny skaning laserowy zapadliska powstałego w lutym 2021 r. Gmina Wapno. Obie fot. Z. Perski
Fig. 4. Terrestrial laser scanning of the sinkhole that appeared in February 2021. Wapno Municipality. Both photos by Z. Perski

Ryc. 6. Reflektor radarowy trójścienny do monitorowania deformacji powierzchni terenu na terenie KWB *Konin*
Fig. 6. Radar Corner Reflector for land deformation monitoring in the open-pit lignite mine at Konin

Ryc. 5. Reflektor radarowy trójścienny do monitorowania deformacji powierzchni terenu na terenie Kopalni Soli *Kłodawa* (patrz art. na str. 631). Fot. Z. Perski

Fig. 5. Radar Corner Reflector for land deformation monitoring in the Kłodawa salt mine (see article p. 631). Photo by Z. Perski