



Państwowy Instytut Geologiczny
Państwowy Instytut Badawczy
państwowa służba geologiczna

**EFEKT RZECZOWY Z REALIZACJI PRZEDSIĘWZIĘCIA
Z ZAKRESU PAŃSTWOWEJ SŁUŻBY GEOLOGICZNEJ**

za okres: od 1 kwietnia 2024 r. do 30 czerwca 2024 r.

**„Interferometryczny Monitoring Powierzchni Terenu Polski
(InMoTeP) – etap II”**

343/2021/Wn-07/FG-go-dn/D z dnia 06.05.2021r

Raport 2b
Analizy deformacji dla terenów o szczególnym znaczeniu
Obszary osuwiskowe w Karpatach

Nadzorujący:

Minister Klimatu i Środowiska
ul. Wawelska 52/54, 00–922 Warszawa

Dotujący:

Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej
ul. Konstruktorska 3A, 02–673 Warszawa



Sfinansowano ze środków
NARODOWEGO FUNDUSZU
OCHRONY ŚRODOWISKA
i GOSPODARKI WODNEJ

Wykonawca:

Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Rakowiecka 4, 00–975 Warszawa



Osoba sporządzająca raport:

dr Zbigniew Perski

Kierownik zadania:

dr inż. Maria Przyłucka

Kierownik komórki organizacyjnej:

dr Tomasz Wojciechowski

Dyrektor/Dyrektor pionu:

dr Olimpia Kozłowska
Zastępca dyrektora
ds. służby geologicznej
/podpisana cyfrowo/

prof. dr hab. Stanisław Mikulski
Zastępca dyrektora
ds. badań i rozwoju
/podpisany cyfrowo/

Warszawa, czerwiec 2024 r.

pgi.gov.pl

ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa
tel. (+48) 22 45 92 000, biuro@pgi.gov.pl

Sąd Rejonowy dla m. st. Warszawy w Warszawie
XIII Wydział Gospodarczy KRS, Nr 0000122099
NIP 525-000-80-40

Zespół wykonawców
Państwowego Instytutu Geologicznego – Państwowego Instytutu Badawczego

(kolejność alfabetyczna)

Adamski Marek, Balicki Leszek, Bartyzel Katarzyna, Borysiuk Rafał, Chodak Emilia, Cisło Michalina, Cudnik Beata, Dacka Jacek, Derda Bartosz, Drożdżewski Mateusz, Frydel Jerzy, Górka Konrad, Jureczka Janusz, Kamieniarz Sylwester, Karczewska Katarzyna, Karkowska Kamila, Konarska Iwona, Kos Jarosław, Kowalska Iwona, Kowalski Zbigniew, Krieger Włodzimierz, Kutyla-Olesiuk Anna, Ługiewicz-Mołas Izabela, Łukowska Renata, Łyjak Marta, Markiewicz Krzysztof, Mazurek Sławomir, Maślanka Remigiusz, Nadłonek Weronika, Nescieruk Piotr, Parafiniuk Mateusz, Perski Zbigniew, Pojawa Joanna, Posłajko Jolanta, Przyłucka Maria, Psujek Maksymilian, Rolka Michał, Romanowicz Anna, Rycio Edyta, Rzeźnik Mateusz, Siwek Mariola, Strzemińska Katarzyna, Suszka Grzegorz, Ulatowska Adrianna, Warmuz Bartłomiej, Wojciechowski Tomasz, Zając Mariusz, Zych Piotr

Szczegóły dokumentu:

EFEKT RZECZOWY Z REALIZACJI ZADANIA

Z ZAKRESU PAŃSTWOWEJ SŁUŻBY GEOLOGICZNEJ

w ramach umowy dotacji 343/2021/Wn-07/FG-go-dn/D z dnia 06.05.2021r. pn.

„Interferometryczny Monitoring Powierzchni Terenu Polski (InMoTeP) – etap II”.

Numer podzadania	1.2b
Autorzy	Zbigniew Perski
Uwagi	

Spis treści

Wstęp.....	6
1. InSAR z wykorzystaniem reflektorów radarowych.....	7
Reflektory radarowe	8
Rozmieszczenie reflektorów, dekompozycja itd.	9
2. Dane Sentinel-1.....	12
3. Reflektory radarowe w programie SOPO	12
4. Charakterystyka badanych osuwisk.....	15
5. Dane oraz wyniki	17
Metodyka interpretacji wyników	17
6. Szczegółowe omówienie wyników i ich interpretacja.....	19
Szymbark Huciska.....	19
Szymbark Zapadle	21
Grybów	23
Kłodne	25
Słotowa	28
7. Podsumowanie i wnioski	31
8. Literatura.....	32

Spis rysunków

Rys. 1. Przesunięcia reflektora radarowego względem powierzchni odniesienia: geoidy i elipsoidy.	10
Rys. 2. Znaczenie kierunku obserwacji satelitarnej w stosunku do kierunku ruchu osuwiskowego. LoS – kierunek obserwacji satelitarnej, Ro – ruch osuwiska; Obserwacja InSAR wykaze ruch osuwiska jedynie w przypadku gdy $LoS \parallel Ro$	11
Rys. 3. Przykład konfiguracji reflektora CR08 w Szymbarku Zapadlu. ASC, DSC – kierunki obserwacji satelitarnych, INCL.- otwór badawczy inklinometryczny, PIEZO – otwór badawczy, piezometryczny. Betonowa podstawa zagłębiona w gruncie na 1.5 m.....	13
Rys. 4. Zasada obliczania podwójnych różnic z przypadku sieci reflektorów. Reflektory umieszczone na obszarach stabilnych służą jako obiekty referencyjne do obliczeń	14
Rys. 5. Lokalizacja osuwisk objętych monitoringiem CRInSAR w Karpatach	15
Rys. 6. Objasnienia do wykresów szczegółowych.....	19
Rys. 7. Rozmieszczenie reflektorów na osuwiskach Huciska i Zapadle w Szymbarku	20
Rys. 8. Przesunięcia pionowe i poziome (w osi W-E) reflektorów [mm] na osuwisku Szymbark Huciska.....	20
Rys. 9. Zestawienie serii danych dla reflektora CR09. Osuwisko Szymbark Huciska	21
Rys. 10. Przesunięcia pionowe i poziome (w osi W-E) reflektorów [mm] na osuwisku Szymbark Zapadle	22
Rys. 11. Zestawienie serii danych dla reflektora CR08. Osuwisko Szymbark Zapadle.....	23
Rys. 12. Rozmieszczenie reflektorów radarowych na osuwisku w Grybowie	24
Rys. 13. Przesunięcia pionowe i poziome (w osi W-E) reflektorów [mm] na osuwisku w Grybowie	24
Rys. 14. Zestawienie serii danych dla reflektora CR04. Osuwisko w Grybowie.....	25
Rys. 15. Rozmieszczenie reflektorów na osuwisku w Kłodnem.....	26
Rys. 16. Przesunięcia pionowe i poziome (w osi W-E) reflektorów [mm] na osuwisku w Kłodnem	27
Rys. 17. Zestawienie serii danych dla reflektora CR05. Osuwisko w Kłodnem	28
Rys. 18. Rozmieszczenie reflektorów na osuwisku w Słotowej	29
Rys. 19. Przesunięcia pionowe i poziome (w osi W-E) reflektorów [mm] na osuwisku w Słotowej.....	29
Rys. 20. Zestawienie serii danych dla reflektora CR04. Osuwisko w Słotowej.....	30

Wstęp

Niniejszy raport bazuje na publikacji (Perski i Wojciechowski, 2022), która w kompleksowy sposób omawia aspekty teoretyczne jak również zagadnienie praktycznego wykorzystania reflektorów radarowych do badań osuwisk. Publikowany wcześniej tekst zaktualizowano oraz uzupełniono o najnowsze wyniki.

Reflektory radarowe zainstalowano na pięciu osuwiskach w 4 lokalizacjach: Szymbark-Huciska, Szymbark-Zapadle, Grybów, Kłodne i Słotowa (Rys. 5). Instalację przeprowadzono w grudniu 2017 (Szymbark), grudniu 2018 oraz grudniu 2020 (Słotowa). Od roku 2022 wyniki pomiarów przemieszczeń reflektorów są rutynowo ujmowane w rocznych raportach aktywności osuwisk przekazywanych władzom samorządowym.

Współczesne monitorowanie osuwisk polega na mierzeniu i zapisywaniu parametrów wgłębnych takich jak ruch osuwiska mierzony w otworach inklinometrycznych oraz wahania zwierciadła wód podziemnych w otworach piezometrycznych a także parametrów powierzchniowych, do których zalicza się przemieszczenia punktów pomiarowych jak również dane opadowe (wielkości opadów atmosferycznych). Dane te są rejestrowane punktowo, jednak umiejętne dobranie lokalizacji poprzedzone wnikliwymi badaniami pozwala charakteryzować zmiany zachodzące w osuwisku w sposób w miarę reprezentatywny. Niezmiernie ważnym elementem zbieranych danych jest interwał czasowy w jakich dane są rejestrowane. Jeśli chodzi o dane opadowe i hydrogeologiczne rejestracja przebiega automatycznie wg. ustalonego interwału, zazwyczaj 1 godziny. Dla długich, wieloletnich serii obserwacji możemy więc mówić o pomiarach quasi ciągłych. W przypadku pomiarów deformacji, wgłębnych czy powierzchniowych sytuacja ma się zgoła inaczej: koszt urządzeń do quasi-ciągłego pomiaru (permanentne stacje GNSS, automatyczne stacje inklinometryczne) jest bardzo wysoki w zakupie i sprzęt ten jest skomplikowany w utrzymaniu m.in. ze względu na konieczność zapewnienia stałego źródła zasilania. W związku z tym pomiary tego typu wykonywane są w sesjach, 1 lub 2 razy w roku. Taki charakter danych sprawia, że wiarygodne wnioskowanie o dynamice ruchów i ich związku z opadami jest obarczone dużą dozą niepewności. Rozwiązaniem, które w niektórych przypadkach może pozwolić na bardziej wiarygodną dedukcję we wspomnianym zakresie jest wykorzystanie radarowych pomiarów satelitarnych na specjalnie posadowionych reflektorach. Interwał pomiarowy powierzchniowych pomiarów deformacji można wówczas skrócić nawet

do kilku dni w zależności od częstości przelotów satelitarnych. W dalszej części pracy przedstawione zostaną założenia techniczne oraz dotychczasowe wyniki i doświadczenia płynące ze stosowania reflektorów radarowych zebrane na bazie kilku lat doświadczeń Centrum Geozagrożeń PIG-PIB w zakresie badania osuwisk. Badania osuwisk oraz monitoring wybranych lokalizacji realizowany jest w ramach SOPO – Systemu Ośłony Przeciwośuwiskowej (Zimnal i in., 2019; Wojciechowski i in., 2021).

1. InSAR z wykorzystaniem reflektorów radarowych

Interferometria SAR (InSAR) to technika teledetekcyjna pozwalająca mierzyć i monitorować przemieszczenia powierzchni terenu w czasie (Goldstein i in., 1988). Wykorzystuje ona różnice fazy sygnałów radarowych pochodzących z satelitarnych obserwacji mikrofalowych typu SAR (*Synthetic Aperture Radar*) dla danego obszaru. Dobry i szczegółowy przegląd podstaw metodyki, potencjału i obszarów zastosowań InSAR można znaleźć w szeregu prac o charakterze podstawowym np.: (Bamler i Hartl, 1998; Massonnet i Feigl, 1998; Perski, 1999; Bürgmann i in., 2000; Rosen i in., 2000).

Metoda InSAR powstała pod koniec lat '90 XX w. doczekała się szeregu modyfikacji i rozwinęć pozwalających przewyżżyć początkowe ograniczenia uniemożliwiające obserwowanie deformacji w długich interwałach. Na początku lat 2000 opracowano metody analizy szeregów czasowych (MTI – *Multi Temporal InSAR*). Bazują one na zastosowaniu algorytmów opartych na selekcji pikseli zachowujących koherentną fazę sygnału mimo upływu czasu. Metody MTI charakteryzują różne strategie przetwarzania i selekcji koherentnych pikseli np. (Ferretti i in., 1999; Berardino i in., 2002; Hooper i in., 2004) . Generalnie rzecz ujmując InSAR to skomplikowany, wymagający ogromnych mocy obliczeniowych i zasobów pamięci proces przetwarzania danych, w którym kluczową rolę odgrywają rozwiązania algorytmiczne. Dobry przegląd ostatnich osiągnięć metodycznych przedstawiono w (Hooper *et al.* 2012; Crosetto *et al.* 2016). Próby wykorzystywania InSAR w badaniach deformacji osuwiskowych były prowadzone niemal od początków metody (Fruneau *et al.* 1996; Wojciechowski *et al.* 2008; Bovenga *et al.* 2012). Dobry przegląd

osiągnięć w tej dziedzinie przedstawiono w pracach (Refice i in., 2001; Colesanti i Wasowski, 2006).

Reflektory radarowe

Metody InSAR bazują przede wszystkim na odbiciu sygnału radarowego od obiektów naturalnych. Dobrymi obiektami odbijającymi (tzw. rozpraszaczami), to jest takimi, których charakterystyka odbicia nie zmienia się wraz z upływem czasu są wychodnie skał i podobne, pozbawione roślinności miejsca. Do grupy takich obiektów należą także konstrukcje wykonane ręką człowieka: budynki, ogrodzenia, słupy linii przesyłowych, infrastruktura drogowa, kolejowa itp. Oprócz tego rodzaju „przypadkowych” obiektów istnieje oczywiście możliwość celowego instalowania specjalnych urządzeń zapewniających bierne odbicie sygnału radarowego w żądany sposób i o zadanej charakterystyce. Obiekty takie nazywamy **reflektorami radarowymi** lub w oparciu o swoją konstrukcję **reflektorami narożnikowymi** (*corner reflectors; CR*). W opracowaniach InSAR stosuje się je w dwóch podstawowych celach:

- W monitorowaniu deformacji dla uzupełnienia sieci naturalnych stabilnych rozpraszaczy. Reflektory instaluje się wówczas w miejscach pozbawionych rozpraszaczy naturalnych tj. braku infrastruktury bądź wychodni skalnych – na obszarach upraw rolnych bądź nieużytków. Dla uzyskania pożądaných wyników instalację reflektorów należy w takim przypadku poprzedzić interferometryczną analizą danych archiwalnych dla danego obszaru.

- Dla walidacji wyników. Reflektor radarowy ma ściśle zdefiniowane, fizyczne centrum fazowe. Jest to punkt, który przyjmuje się za ten, od którego następuje odbicie, i które można fizycznie zmierzyć np. metodami geodezyjnymi, za pomocą niwelacji precyzyjnej czy GNSS. Pomiar taki jest w zasadzie jedynym sposobem zapewnienia absolutnej integracji pomiarów interferometrycznych z pomiarami geodezyjnymi i przeniesienia ich na geodezyjne układy odniesienia. Reflektory walidacyjne są jednocześnie uzupełnieniem sieci naturalnych rozpraszaczy.

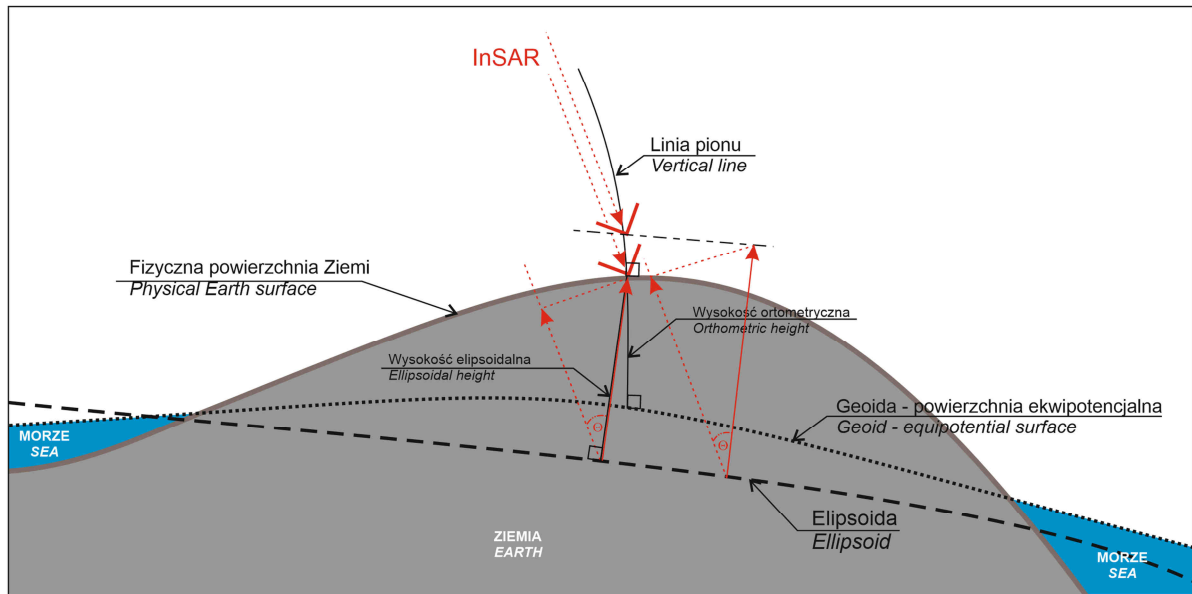
W sensie obliczeniowym, reflektory radarowe stanowią szczególną sieć rozpraszaczy PS (*Persistent Scatterers*), którą wykorzystuje się do analiz interferometrycznych. Obliczenia wykonuje się podobnie jak w metodach wieloczasowych jednak w znacznie uproszczonej

wersji. Dla reflektorów CR znane są bowiem współrzędne X, Y, Z centrum fazowego reflektora, i nie jest zatem konieczne ich wyszukiwanie za pomocą zaawansowanych algorytmów jak ma to miejsce w przypadku rozpraszaczy naturalnych. Reflektory zazwyczaj nie są zbyt odległe od siebie zatem nie jest wymagane uwzględnianie wpływu czynników atmosferycznych. Wymagana jest jedynie korekta fazy uwzględniająca położenie reflektora wewnątrz komórki rozdzielczości (Perissin 2006). Metody obliczeniowe stosowane dla reflektorów nazywa się czasami CRInSAR - *Corner Reflector Interferometry SAR* (Xia i in., 2002). Dobry przegląd metodyki obliczeniowej CRInSAR przedstawiono w pracy (Czikhardt i in., 2021).

Zastosowanie reflektorów radarowych w InSAR ma swoją długą historię. Zasada ich działania jest bowiem znana od początków rozwoju techniki radarowej. Były one wykorzystywane do sprawdzenia czy teoretyczne założenia metody InSAR mają swoje odzwierciedlenie w rzeczywistości (Guarnieri i in., 1993; Hartl i in., 1993). W późniejszych okresach były wykorzystywane do pomiarów w trudnych warunkach (Froese i in., 2008; Garthwaite i in., 2015; Jauvin i in., 2019) a także do walidacji metod wieloczasowych (Marinkovic i in., 2008; Qin i in., 2013). Z uwagi na wysoką wiarygodność uzyskiwanych w ten sposób pomiarów reflektory stosowane są rutynowo w wielu miejscach Świata w monitorowaniu przedsięwzięć przemysłowych związanych z eksploatacją surowców.

Rozmieszczenie reflektorów, dekompozycja itd.

Analizując pozyskane z reflektorów informacje o przemieszczeniach należy zdawać sobie sprawę w jaki sposób są one pozyskiwane od strony geometrycznej i jak prawidłowo odnosić je do wartości otrzymywanych innymi metodami. Należy pamiętać o różnicy zasady pomiaru wysokości jak i sposobu jego odniesienia. W przypadku danych niwelacji geometrycznej wysokość ortometryczna mierzona jest wzdłuż rzeczywistej linii pionu w stosunku do powierzchni geoidy odniesienia, natomiast dla danych GNSS mierzona jest wysokość elipsoidalna wzdłuż normalnej do elipsoidy odniesienia. Dane InSAR stanowią natomiast wysokość elipsoidalną mierzoną w kierunku ukośnym tj. padania wiązki radarowej (*Line of Sight* – LoS). Zależności te przedstawia Rys. 1.



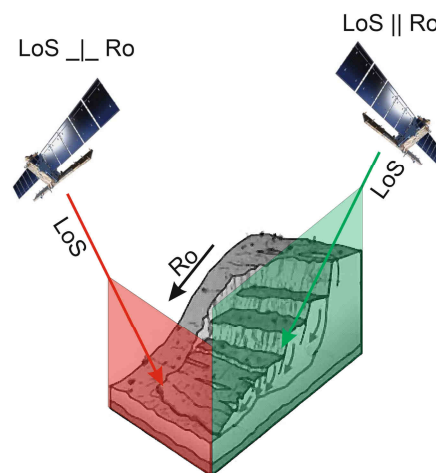
Rys. 1. Przesunięcia reflektora radarowego względem powierzchni odniesienia: geoidy i elipsoidy.

Zakładając, że wysokość geoidy i elipsoidy nie uległy zmianie w czasie jaki upłynął pomiędzy kolejnymi pomiarami oblicza się tzw. podwójne różnice (*Double Differences*). Podwójne różnice swoją nazwę zawdzięczają temu, że dotyczą jednocześnie różnic wysokości oraz czasu. Różnice wysokości obliczane są pomiędzy danym punktem a punktem przyjętym za referencyjny (Rys. 4), natomiast domena czasu określa czas pomiędzy danym pomiarem a pomiarem przyjętym za referencyjny. Obliczenie podwójnych różnic redukuje jednocześnie problem rozbieżności pomiędzy układami odniesienia (elipsoida / geoida). Metodę podwójnych różnic stosuje się w wielu dziedzinach geodezji. W InSAR podwójne różnice są ponadto wykorzystywane do obliczeń punktów PS, których nie jesteśmy w stanie dowiązać do bezwzględnego układu współrzędnych (Ketelaar, 2008).

Kolejną ważną sprawą jest uwzględnienie faktu, że dane InSAR nie reprezentują kierunku prostopadłego do elipsoidy a kierunek w stosunku do niej ukośny (LoS). Co więcej, pomiar deformacji (bazujący na różnicy fazy) InSAR dokonywany jest w kierunku poprzecznym do kierunku przelotu satelity i reprezentuje tylko jeden wektor będący tym samym jedynie pewną składową całkowitej deformacji. Dekompozycja na składowe trójwymiarowe (równoległe do kierunków Świata E N h: *East, North, height*) jest częściowo możliwa jeżeli dysponujemy danymi z przelotów orbit wschodzących (*ascending*) i schodzących (*descending*), (Wright i in., 2004). Z uwagi na nachylenie okołobiegunowych orbit satelitów teledetekcyjnych w stosunku do równika (powyżej 95°) kierunek obserwacji

LoS jest bardzo bliski kierunkowi E-W. Stąd, dekompozycja jest w zasadzie możliwa jedynie dla wektorów E i h (ryc.1). W niektórych przypadkach składową N na podstawie danych SAR można uzyskać wykorzystując techniki śledzenia przesunięć pikseli (*pixel tracking*, *coherence tracking*). Dokładność tych danych jest jednak niewielka i mają one zastosowanie jedynie w przypadkach deformacji o dużej magnitudzie przekraczającej decymetry (Fialko i in., 2001; Singleton i in., 2014). Z przedstawionych powyżej rozważań wynikają implikacje natury czysto praktycznej ograniczające stosowanie reflektorów na osuwiskach do dosyć szczególnych przypadków gdyż nie wszystkie lokalizacje kwalifikować się będą do pomiarów interferometrycznych. Wykorzystanie reflektorów będzie bowiem miało sens jedynie na osuwiskach, których główna składowa ruchu jest w przybliżeniu równoległa do kierunku E-W. W przypadku osuwisk o składowej ruchu zbliżonej do kierunku N-S dane interferometryczne wykażą jedynie deformacje wtórne nie mające wiele wspólnego z główną składową przemieszczeń (Rys. 2).

Instalując reflektory należy wybierać miejsca pozbawione drzew, gdyż te mogą rozpraszać sygnał radarowy zanim dotrze on do umieszczonego pod nimi reflektora. Warto wybierać również miejsca pozbawione wysokiej roślinności w promieniu ok 20 m od reflektora, co pozytywnie wpływa później na łatwiejsze odseparowanie sygnału odbitego od reflektora od szumu tła.



Rys. 2. Znaczenie kierunku obserwacji satelitarnej w stosunku do kierunku ruchu osuwiskowego. LoS – kierunek obserwacji satelitarnej, Ro – ruch osuwiska; Obserwacja InSAR wykaże ruch osuwiska jedynie w przypadku gdy $LoS \parallel Ro$.

2. Dane Sentinel-1

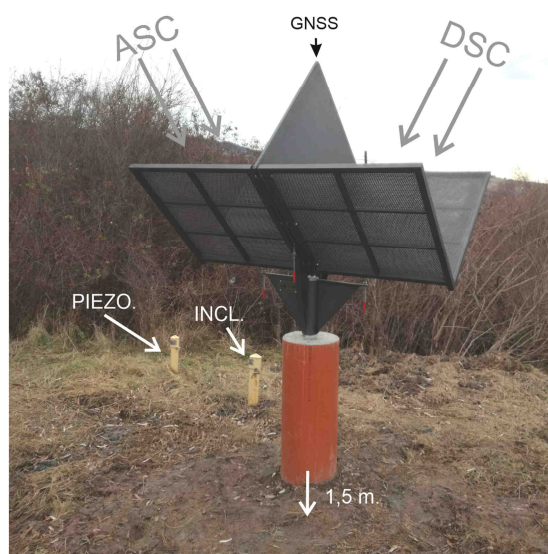
Instalując reflektory należy mieć na uwadze dla jakich systemów satelitarnych SAR będą one przeznaczone. Wpływa to na ich rozmiary (z uwagi na długość fali używaną przez dany system) oraz orientację (kierunki przelotów). Użycie reflektorów przynosi efekty dopiero w długiej perspektywie czasowej, co najmniej kilkuletniej więc kluczowy jest również planowany czas trwania danej misji satelitarnej. W chwili obecnej najbardziej perspektywiczną dla takich zastosowań jest europejska misja Sentinel-1. Jest ona częścią europejskiego programu Copernicus i co ważne, wszystkie dane są dla terenu Polski rejestrowane przy każdym przelocie, a następnie udostępniane powszechnie i nieodpłatnie przez ESA (Torres i in., 2012).

Zakończone sukcesem wystrzelenie satelity Sentinel-1A nastąpiło 03 kwietnia 2014 r. natomiast 1B, 22 kwietnia 2016 r. Dane Sentinel-1 dla obszarów lądowych są rejestrowane w trybie *Interferometric Wide* (IW), który jest realizowany za pomocą trybu TOPS (*Terrain Observation by Progressive Scans*). Tryb ten umożliwia rejestrację pasa obrazowania o szerokości 250 km przy zachowaniu rozdzielczości terenowej ok. 25 m (De Zan i in., 2008). Obecnie na orbicie znajdują się satelity Sentinel-1A (S1A). Sentinel-1B (S1B) uległ awarii pod koniec 2021 roku a w 2022 ogłoszono koniec misji. Czas rewizyty pojedynczego satelity (okres pomiędzy wykonaniem rejestracji o dokładnie tych samych parametrach geometrycznych) wynosi 12 dni, co przy wykorzystaniu obu satelitów dla okresu do grudnia 2021r. skraca się do 6 dni. Biorąc pod uwagę orbity sąsiednie (wspólne pokrycie sąsiednich ścieżek) oraz orbity schodzące i wschodzące, czas ten ulega skróceniu do 3 dni. Podsumowując, możliwe jest zatem uzyskanie serii pomiarów przemieszczeń dla reflektorów na osuwiskach w interwale 3 dni. Tak wysoka rozdzielczość czasowa możliwa do uzyskania dla danych CRInSAR pozwala na traktowanie tych serii jako quasi-ciągłych, a co za tym idzie wiarygodne porównywanie ich z danymi monitoringu hydrogeologicznego i opadowego osuwisk.

3. Reflektory radarowe w programie SOPO

W zadaniach Państwowej Służby Geologicznej realizowanych przez PIG-PIB reflektory radarowe zostały po raz pierwszy użyte w 2013 roku w projekcie „Monitoring osiadania powierzchni terenu w 3 wybranych lokalizacjach poszukiwań gazu w formacjach łupkowych

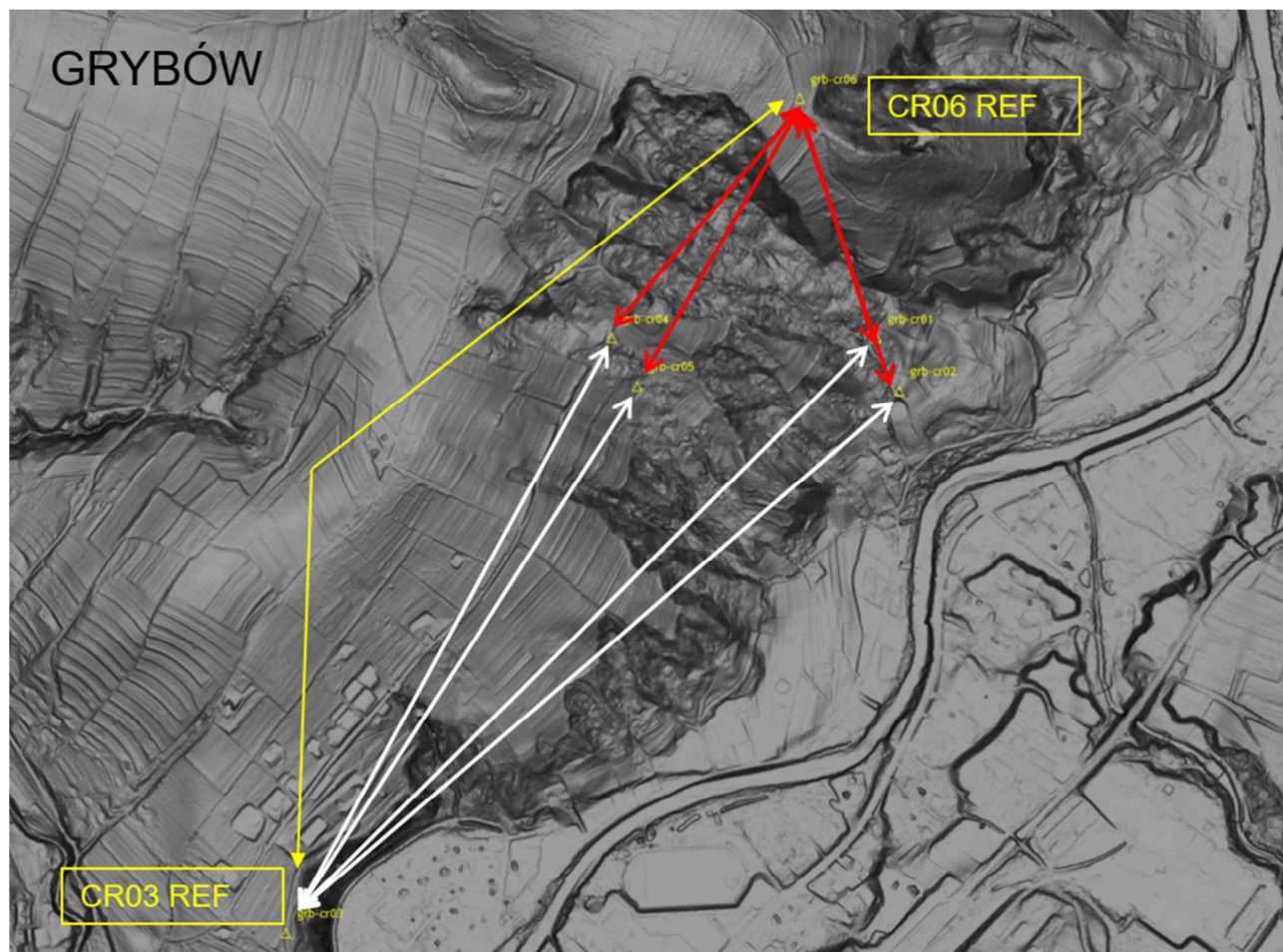
– projekt pilotażowy”. Wówczas to na każdym z 3 poligonów badawczych (w okolicach miejscowości Lewino, Babiak i Berejów) zainstalowano po 20 reflektorów radarowych dwóch typów z czego 15 dla satelity TerraSAR-X i 5 dla satelity Sentinel-1. Po sukcesie tych eksperymentów (Perski i in., 2018), w 2017 r. rozpoczęto instalację pierwszych reflektorów radarowych na osuwiskach. Bazując na wcześniejszych doświadczeniach zdecydowano się na pewne modyfikacje konstrukcji reflektora. Opracowany ostatecznie wzór stanowi zintegrowaną konstrukcję składającą się z zespolonych ze sobą dwóch reflektorów tak by można było prowadzić pomiary w oparciu o orbity wschodzące i schodzące. Taka konstrukcja zapewnia otrzymanie dwóch niezależnych serii obserwacji dla tego samego punktu i umożliwia dekompozycję wektora deformacji na h i E-W. Na potrzeby pomiarów walidacyjnych każdy z reflektorów zaopatrzono w specjalny trzpień do mocowania anteny GNSS (Rys. 3).



Rys. 3. Przykład konfiguracji reflektora CR08 w Szymbarku Zapadlu. ASC, DSC – kierunki obserwacji satelitarnych, INCL.- otwór badawczy inklinometryczny, PIEZO – otwór badawczy, piezometryczny. Betonowa podstawa zagłębiona w gruncie na 1.5 m.

W 2017 roku zainstalowano reflektory na dwóch osuwiskach w Szymbarku: w przysiółkach Zapadle i Huciska. W latach następnych w reflektory wyposażono osuwiska w Grybowie i Kłodnem, a w 2020 r. w Słotowej. Każdą z wymienionych lokalizacji wyposażono docelowo w 6 reflektorów, przy czym za każdym razem 2 spośród z nich zlokalizowano poza obszarem osuwiska. Reflektory te pełną funkcję punktów referencyjnych

(Rys. 4). Wszystkie reflektory są montowane na żelbetonowych podstawach zagłębionych na 1,5 m w gruncie dzięki czemu wyeliminowany został wpływ przemarzania górnej warstwy gleby oraz pęcznienia warstw powierzchniowych. Wszystkie wymienione osuwiska były już wcześniej objęte monitoringiem wgłębnym i powierzchniowym w ramach projektu SOPO (Rys. 5).



Rys. 4. Zasada obliczania podwójnych różnic z przypadku sieci reflektorów. Reflektory umieszczone na obszarach stabilnych służą jako obiekty referencyjne do obliczeń.



Rys. 5. Lokalizacja osuwisk objętych monitoringiem CRInSAR w Karpatach.

4. Charakterystyka badanych osuwisk

Skalno-zwietrzelinowe osuwiska w Szymbarku są formami złożonymi (Kos i Wójcik, 2022a, 2022b) w obrębie których ruch odbywa się zarówno rotacyjnie jak i translacyjnie (Warmuz & Nescieruk 2019). Rozwinęły się one w strefie kontaktu paleoceńsko-eoceńskich łupków pstrych z Łabowej i kompleksu piaskowców magurskich z Wątkowej. Położone niedaleko osuwisko w Grybowie jest również formą złożoną, gdzie przemieszczeniu ulegają zarówno skały podłoża jak i zwietrzelina (Kos i Wójcik, 2022c, 2022d). Wytworzyło się ono na kontakcie łupków pstrych i piaskowców ciężkowickich. Złożone osuwisko skalno-zwietrzelinowe w Kłodnem (Kos i Wójcik, 2022e), powstało w 2010 roku na południowych stokach góry Chełm (793 m n.p.m) na kontakcie piaskowców gruboławicowych warstw magurskich z ciemnymi łupkami warstw podmagurskich i łupków oraz drobnoziarnistych, cienkoławicowych piaskowców warstw hieroglifowych. Osuwisko w Słotowej także ma

charakter rotacyjny w górnej jego części i jest osuwiskiem skalno-zwietrzelinowym (Kos i Wójcik, 2022f). Leży ono na obszarze płaszczowiny śląskiej, gdzie w jego podłożu występują silnie zaburzone tektonicznie utwory kredowe. Są one reprezentowane przez łupki z wkładkami cienkoławicowych piaskowców wapnistych i syderytów, gdzie występują jako łupki cieszyńskie górne, warstwy wierzowskie oraz warstwy łgockie (nierozdzielone). Koluwia osuwiskowe składają się z przemieszczonych pakietów skalnych, a także utworów gliniastych z rumoszem pokrytych cienką warstwą lessów. Istotnym aspektem w interpretacji punktowych danych radarowych jest układ geologiczny. Istnieją przypadki, że rotacyjny charakter ruchu nie musi bowiem wiązać się z przemieszczeniem koluwium zgodnie z nachyleniem stoku jak to ma miejsce w ruchu translacyjnym. Fragmenty jęzora mogą bowiem być wypychane w górę, nieznacznie zmieniając współrzędne poziome. Informacja taka jest niezbędna w prawidłowej interpretacji deformacji stwierdzonej w obrębie reflektora radarowego, która w takich przypadkach pozostawać może w opozycji do wyników pomiarów wgłębnych, inklinometrycznych.

Osuwiska w Szymbarku, Grybowie i Słotowej cechowały się długotrwałym, wieloetapowym rozwojem, wielokrotnym odmładzaniem i praktycznie ciągłą aktywnością, podczas gdy osuwisko w Kłodnem powstało jako zjawisko jednorazowe w czerwcu 2010 roku, zainicjowane po długotrwałych i intensywnych opadach. Po okresie intensywnych przemieszczeń trwających do września 2010, aktywność tego osuwiska uległa uspokojeniu w następnych latach aż do niemal całkowitego wygaszenia (Wójcik *et al.* 2011).

Jeśli chodzi o przemieszczenia, wyniki pomiarów wgłębnych (inklinometrycznych) na osuwisku w Szymbarku-Huciskach wykazały aktywną powierzchnię poślizgu na głębokości 14 m p.p.t. Skumulowane przemieszczenie w okresie 9 lat wyniosło 110 mm, a więc średnia prędkość była równa ok. 12 mm (Nescieruk i in., 2017a; Warmuz i Nescieruk, 2019; Nescieruk i in., 2022a). Powierzchnie poślizgu osuwiska w Szymbarku-Zapadlu przebiegają na głębokościach 17 i 13,5 m ppt. Oba otwory pomiarowe uległy zniszczeniu na dolnej powierzchni poślizgu (odpowiednio w 2010 i 2018 roku) a prędkości przemieszczeń mierzone na górnej powierzchni wynoszą ok. 8,5 mm/rok (Nescieruk i in., 2017b, 2022b).

Na osuwisku w Grybowie, wszystkie 3 kolumny inklinometryczne uległy ścięciu przez przemieszczanie koluwiów po odpowiednio 4, 5 i 6 latach od zainstalowania. Aktywne

powierzchnie poślizgu występują tam na głębokościach 18,5 i 7,5 m ppt a prędkości przemieszczeń dochodzą do 30 mm/rok (Nescieruk i in., 2017c).

Na osuwisku w Kłodnem występuje kilka powierzchni poślizgu w profilach otworów inklinometrycznych, spośród których jedynie 2 obecnie wykazują niewielką aktywność. Położone są one na głębokościach 18 i 6,5 m gdzie notuje się przyrosty przemieszczeń o ok 1,5 mm/rok (Nescieruk i in., 2022c).

Osuwisko w Słotowej charakteryzuje się występowaniem 3 aktywnych powierzchni poślizgu na głębokościach odpowiednio 26, 22 i 5 m ppt. Jeden z 2 otworów inklinometrycznych uległ ścięciu w 2016 roku na najgłębszej powierzchni poślizgu. Wielkości przemieszczeń wgłębnych osiągają tam ok 20 mm/rok (Nescieruk i in., 2022d).

5. Dane oraz wyniki

Dla każdego z osuwisk co najmniej jeden z reflektorów zlokalizowano w bezpośrednim sąsiedztwie (do maksymalnie kilkunastu metrów w zależności od lokalnych warunków) pary otworów inklinometrycznego i piezometrycznego. Taka lokalizacja sprawia, że w tych szczególnych przypadkach dane uzyskiwane z reflektorów można w zasadzie wprost odnosić do wyników uzyskiwanych w otworach. W niniejszym raporcie szczegółowej analizie poddano zatem przede wszystkim takie, najciekawsze przypadki – po jednym na każde wybrane osuwisko (Rys. 5). Należy podkreślić, że do analiz szczegółowych wykorzystano dane interferometryczne niekorygowane, tj., wektory LoS dla orbit schodzących. Nie stanowi to jednak błędu metodologicznego gdyż pod uwagę brano wartości podwójnych różnic, a celem porównań była analiza zmienności, dynamiki poszczególnych serii danych i dyskusja zależności pomiędzy nimi nie zaś porównywanie wartości jako takich.

Metodyka interpretacji wyników

Na potrzeby raportu przeprowadzono analizę zebranych danych metodą analityki wizualnej. Analityka wizualna to metoda 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.

Dla każdego z badanych przypadków (reflektor w pobliżu pary otworów pomiarowych) wykonano wykres serii czasowych pomiarów (Rys. 6). Składają się na niego 4 niezależne od siebie serie czasowe:

- średnie dobowe wartości głębokości zwierciadła wód podziemnych mierzone w otworze piezometrycznym,
- sumy dobowe opadów mierzone w deszczomierzu zainstalowanym na lub w najbliższym sąsiedztwie danego osuwiska,
- interferometryczne przemieszczenia reflektora mierzone w kierunku LoS na bazie danych SAR konstelacji Sentinel-A/B,
- przemieszczenia w kierunku W-E reflektora mierzone za pomocą odbiornika GNSS umieszczanego na specjalnym trzpieniu.

Dane te przedstawiono na tle średnich dobowych temperatur powietrza mierzonych przez stacje na lotnisku w Balicach (baza danych *Global Historical Climatology Network* GHCN) (Menne i in., 2012). Oczywiście dane temperaturowe nie są w pełni miarodajne dla analizowanych tu, konkretnych lokalizacji osuwisk oddalonych maksymalnie nawet o 100 km. Dane te stanowią jedynie tło dla zrozumienia niektórych zależności, istotne jak wykazano w dalszej części raportu. Jeśli chodzi o dane GNSS były one pozyskiwane sporadycznie w interwałach około rocznych więc nie mogą stanowić pełnowartościowego materiału analitycznego. Zamieszczono je jednak w celach poglądowych oraz jako zgrubną walidację danych InSAR.

Dla każdego z osuwisk przedstawiono i omówiono również wyniki zbiorcze przemieszczeń (pionowych oraz poziomych w kierunku W-E) dla wszystkich reflektorów tak jak to ma miejsce w raportach z aktywności osuwisk.

Temperature, daily avg. oC	Temperatura, średnie dobowe [°C]
Precipitation, daily sum [mm]	Opady, sumy dobowe [mm]
Ground water level depth [m]	Poziom wód gruntowych (głębokość) [m]
CR09 GNSS EAST [mm]	Przemieszczenie poziome reflektora dane GNSS, kierunek W-E [mm]
CR InSAR EAST [mm]	Przemieszczenie poziome reflektora dane InSAR, kierunek W-E [mm]
CR InSAR UP [mm]	Przemieszczenie pionowe reflektora dane InSAR, [mm]

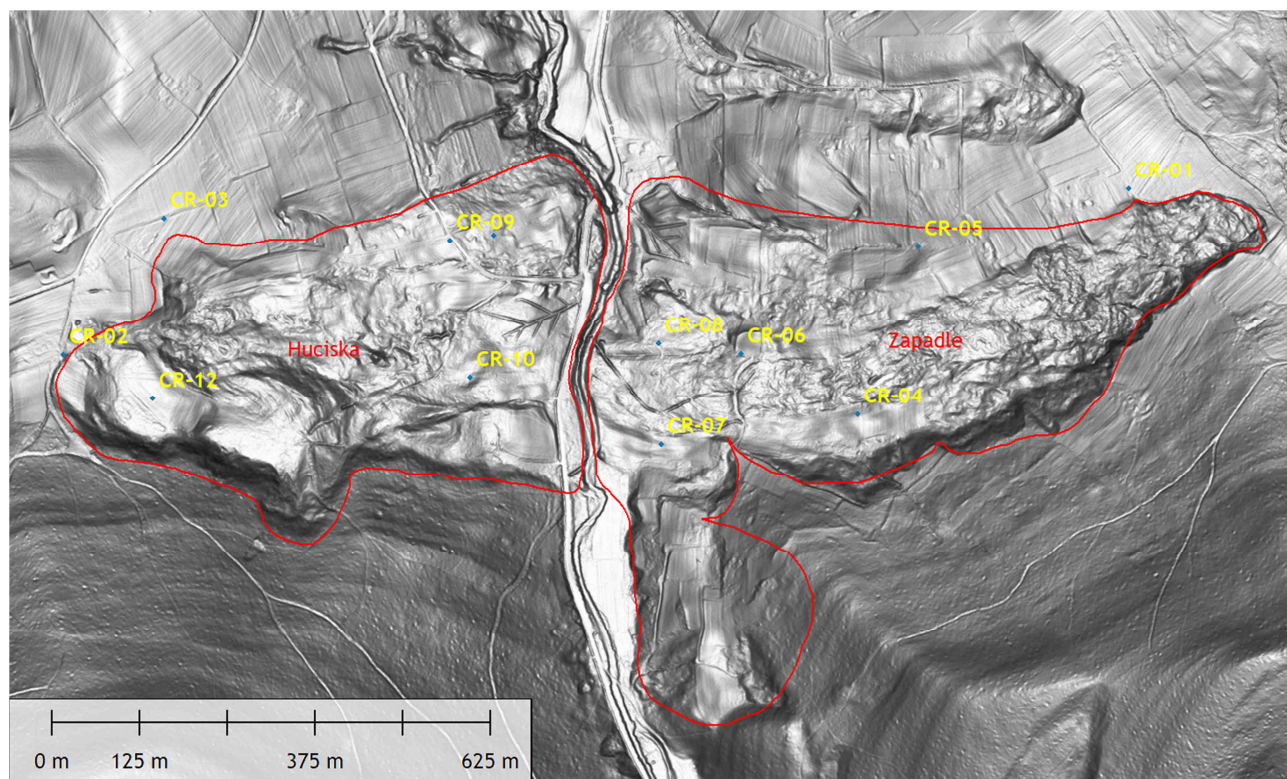
Rys. 6. Objasnienia do wykresów szczegółowych

6. Szczegółowe omówienie wyników i ich interpretacja

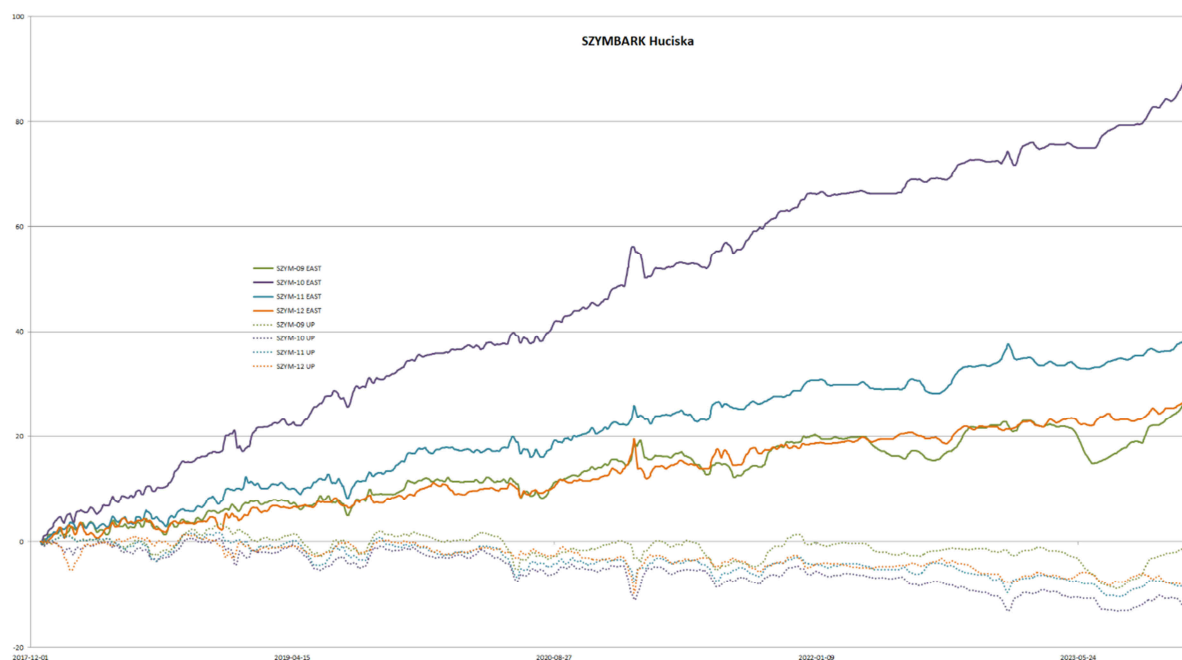
Przyjęto założenie, że wszystkie analizowane serie danych są prawidłowe i nie zawierają błędów grubych (poza przypadkami opisanymi poniżej) a błędy przypadkowe zostały zminimalizowane przez użycie np. wartości średnich dobowych. Poszczególne serie danych zawierają niekiedy luki: wynikają one z problemów technicznych aparatury, np. zatykania się deszczomierzy, braków zasilania lub jej awarii.

Szymbark Huciska

Wszystkie reflektory podlegały ruchom w dół stoku. Reflektory CR09 i CR12 o ok 30 mm, reflektor CR11 o ok 40 mm, Największe przemieszczenia w badanym okresie zanotowano dla reflektora CR10 położonego w południowej części osuwiska o ok 90 mm (Rys. 5, Rys. 7, Rys. 8).



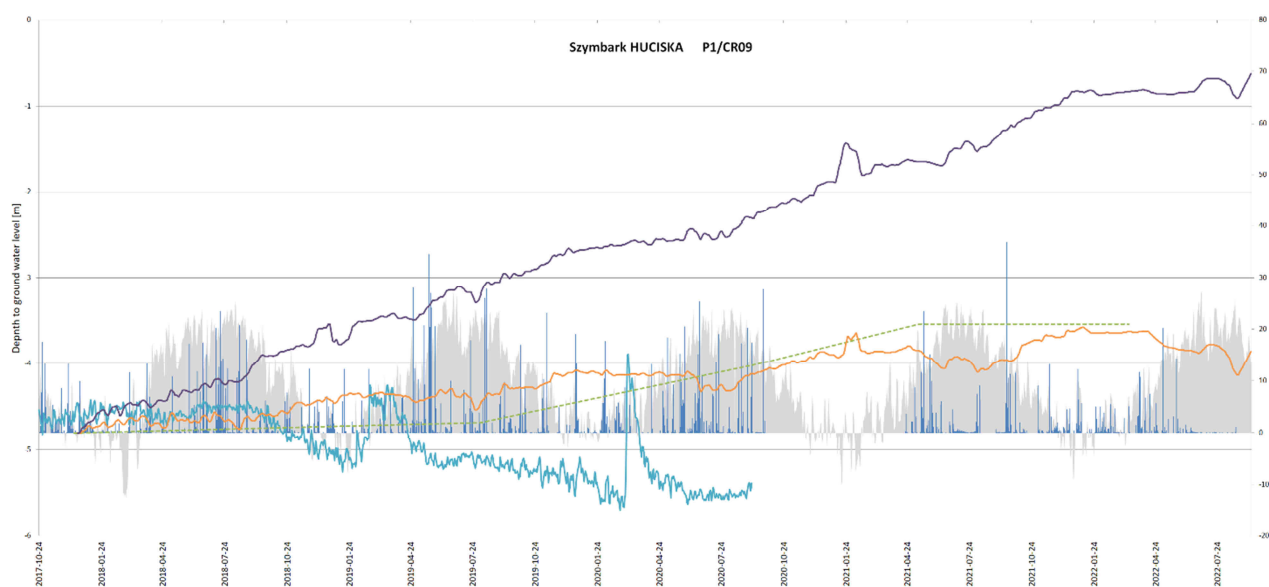
Rys. 7. Rozmieszczenie reflektorów na osuwiskach Huciska i Zapadle w Szymbarku.



Rys. 8. Przeszyczenia pionowe i poziome (w osi W-E) reflektorów [mm] na osuwisku Szymbark Huciska.

Reflektor CR09. W serii czasowej danych InSAR można dostrzec pewne niestabilności, charakteryzujące się dużymi gradientami +/- sąsiednich wartości. Analizując je na tle wartości temperatur widać, że pojawiają się one w okresach zimowych przy

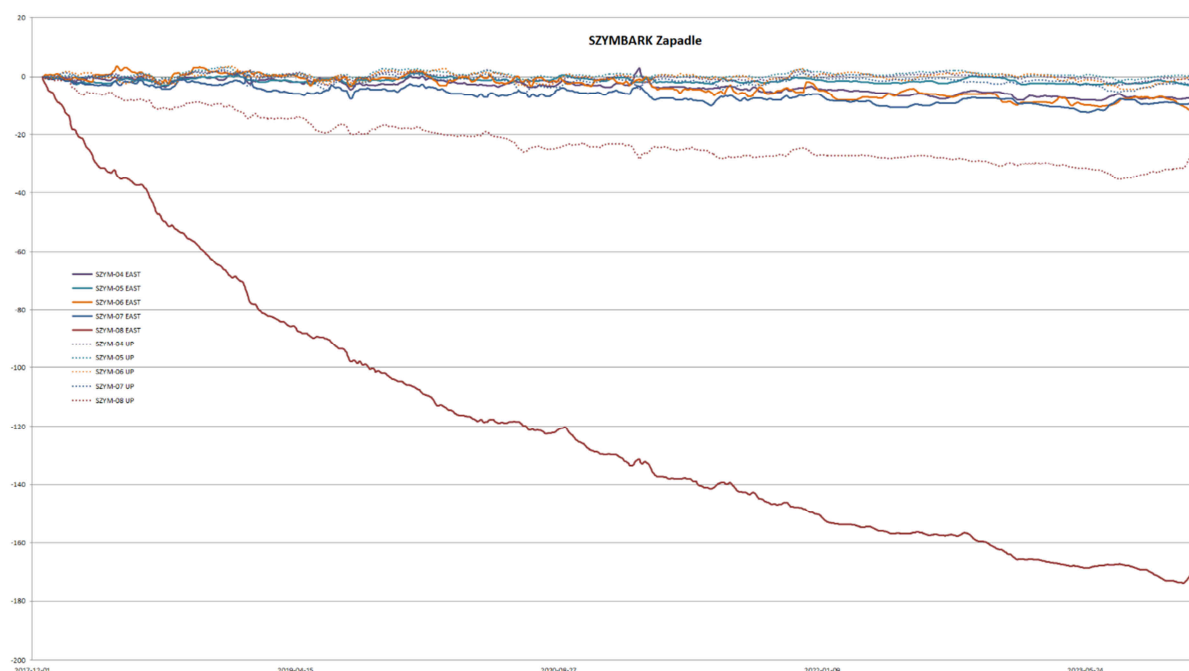
występowaniu temperatur ujemnych (Rys. 9). Niestabilność taka nie pojawia się natomiast zimą 2019 r., co tłumaczyć można relatywnie wyższymi temperaturami w stosunku do lat 2018 i 2020. W lecie 2019 r. nastąpiło niewielkie przyspieszenie przemieszczeń reflektora obserwowane w danych InSAR, co było widoczne również w danych GNSS. Przyspieszenie to można korelować ze spadkiem zwierciadła wód podziemnych następującym od lata roku poprzedniego. Jest to dosyć nieoczekiwany wynik, gdyż w dotychczas stosowanych modelach większe prędkości ruchu wiązano z podnoszeniem zwierciadła wód podziemnych. Niestety pod koniec lata 2020 r. urządzenie uległo nieodwracalnej awarii i nie jest możliwe śledzenie dalszego przebiegu zmian zwierciadła wód podziemnych w tym miejscu. Stałe przemieszczenia reflektora o prędkości 10-20 mm/rok znajdują potwierdzenie w danych GNSS mierzonych na samym reflektorze jak i sąsiednich reperach ziemnych.



Rys. 9. Zestawienie serii danych dla reflektora CR09. Osuwisko Szymbark Huciska.

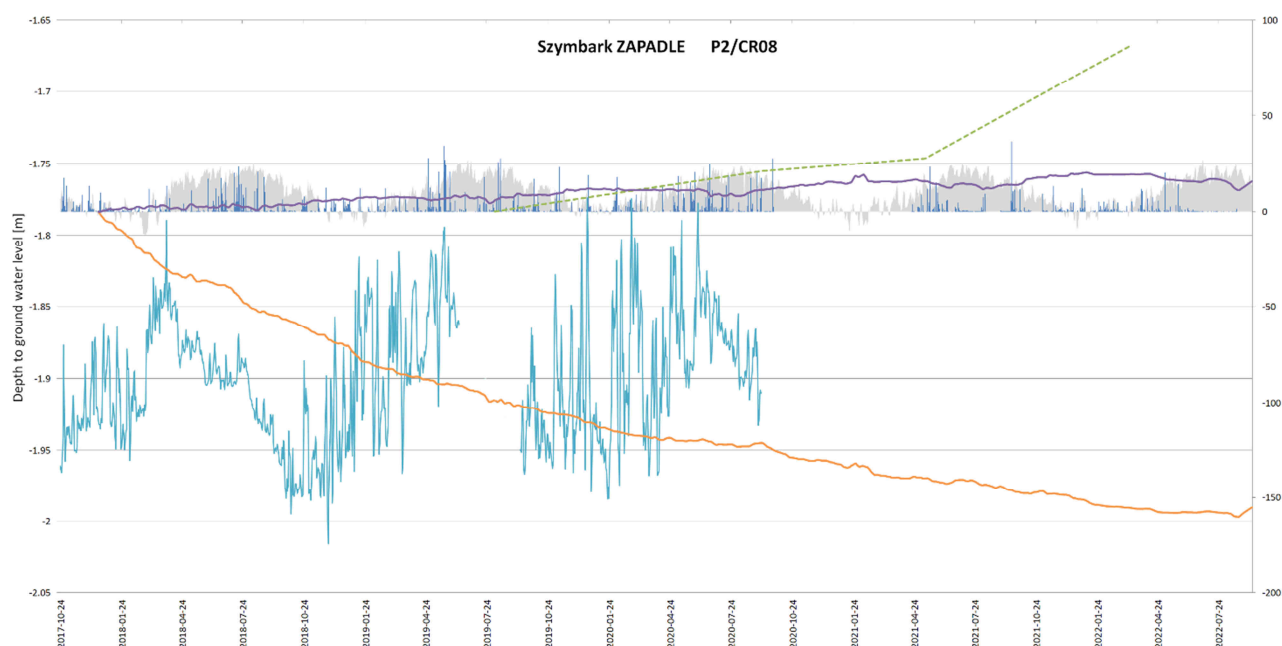
Szymbark Zapadle

Reflektory CR04, CR05, CR06 nie wykazywały znaczących ruchów (jedynie zmiany sezonowe). Zlokalizowane w dolnej części osuwiska reflektory CR07 i CR08 podlegały ruchom w dół stoku. Szczególnie reflektor CR08 zlokalizowany w pobliżu zerwanego inklinometru aż o 170 mm (Rys. 7, Rys. 10).



Rys. 10. Przeszczenia pionowe i poziome (w osi W-E) reflektorów [mm] na osuwisku Szymbark Zapadle.

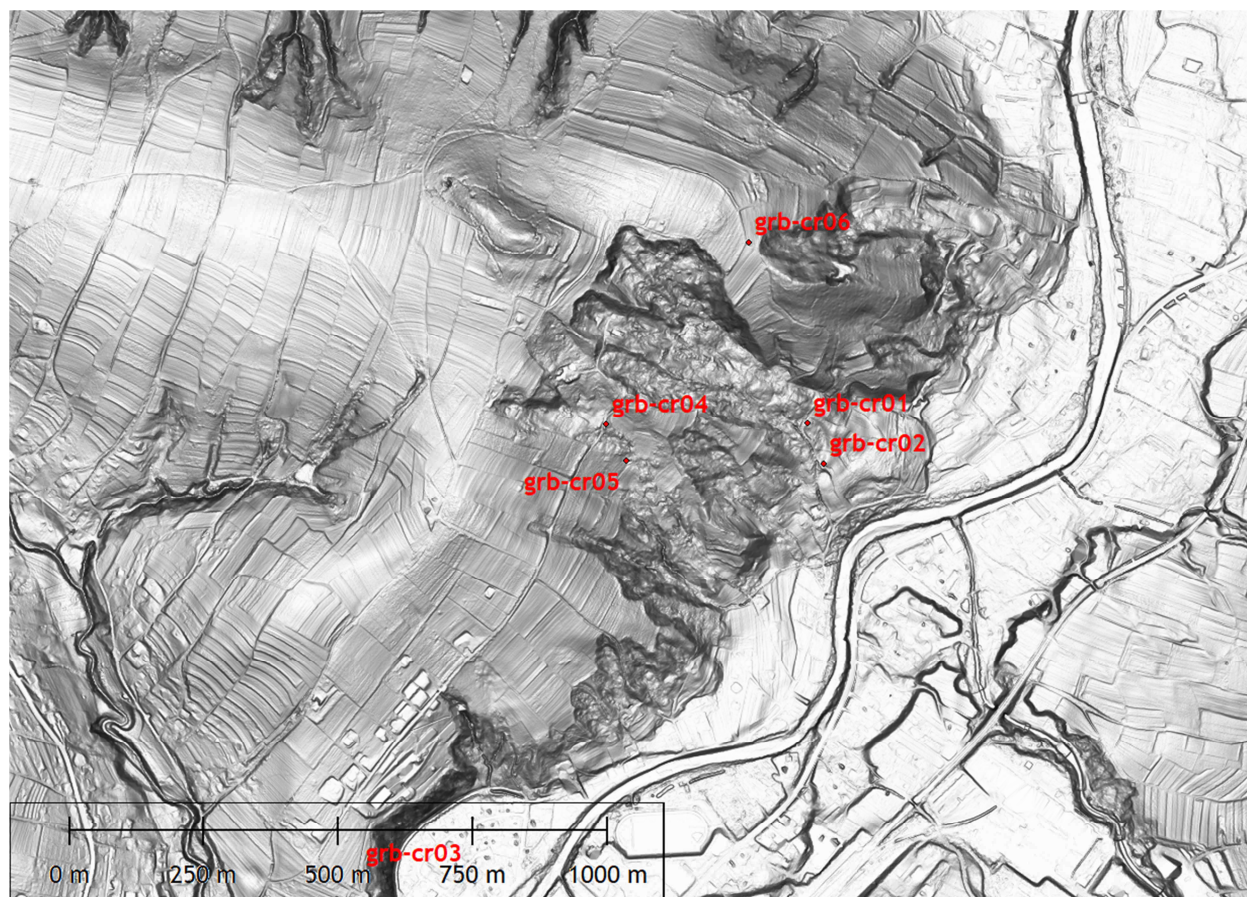
Reflektor CR08. Analizowany reflektor CR08 podlegał stałym przeszczeniom o prędkościach około 30 mm/rok. Dla badanego okresu otrzymano ostatecznie nieco niższe prędkości przeszczeń aniżeli pokazywały to rozwiązania dla krótszego okresu badań (Perski 2019). Rosnące wartości przeszczeń wynikają tu z przeciwnego zwrotu wektora przeszczeń osuwiska. Prędkość przeszczeń jest tu mniej więcej stała jednak, podobnie jak w przypadku Hucisk można wyróżnić podobnie niestabilności termiczne związane z okresami niskich temperatur. Wahania zwierciadła wód podziemnych są tutaj dużo większe niemniej bez wyraźnego trendu, z czego wynikać może w miarę stała średnia prędkość przeszczeń (Rys. 11).



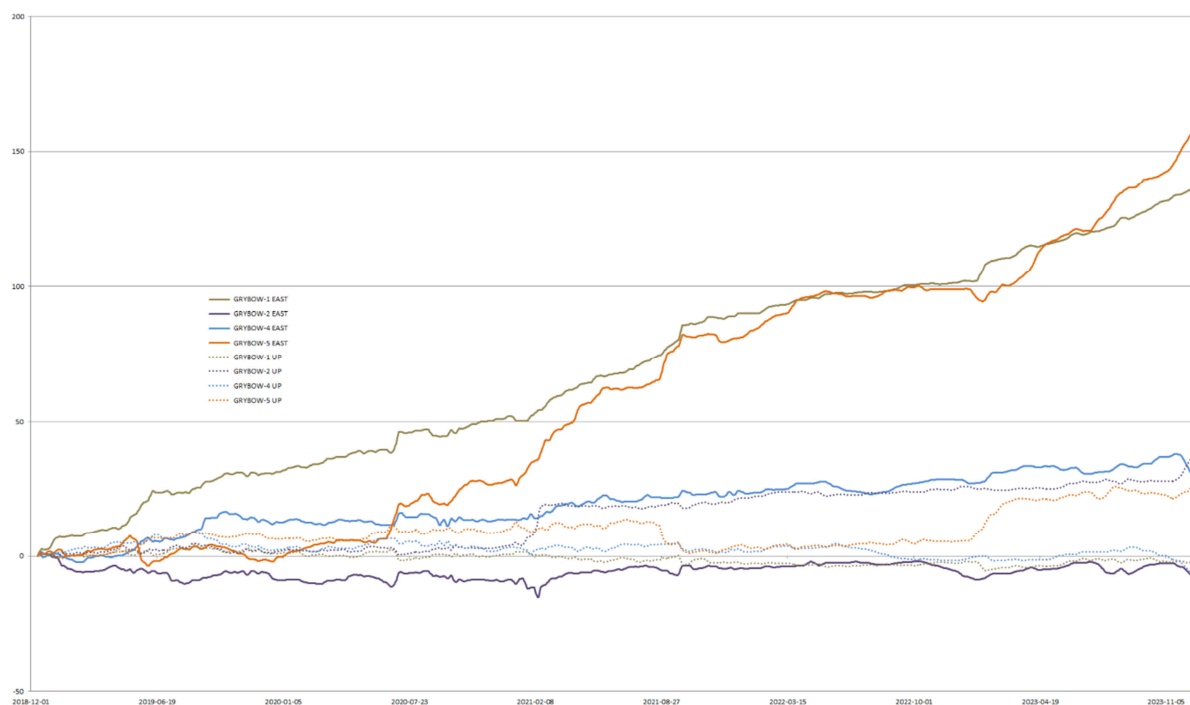
Rys. 11. Zestawienie serii danych dla reflektora CR08. Osuwisko Szymbark Zapadle.

Grybów

Wszystkie reflektory na osuwisku w Grybowie wykazują ruchy w dół stoku. Pewnym wyjątkiem jest reflektor CR02 wykazujący nieznaczne podnoszenie, wynika ono z jego lokalizacji w dolnej części jęzora i jest zgodne z modelem deformacji tej części osuwiska. Reflektor CR04 zlokalizowany przy ściętym inklinometrze nr. 1 wykazywał w 2023 r. dalsze obniżanie, reflektory CR01 i CR05 wykazywały największe deformacje – odpowiednio 140 i 170 mm (Rys. 12, Rys. 13).

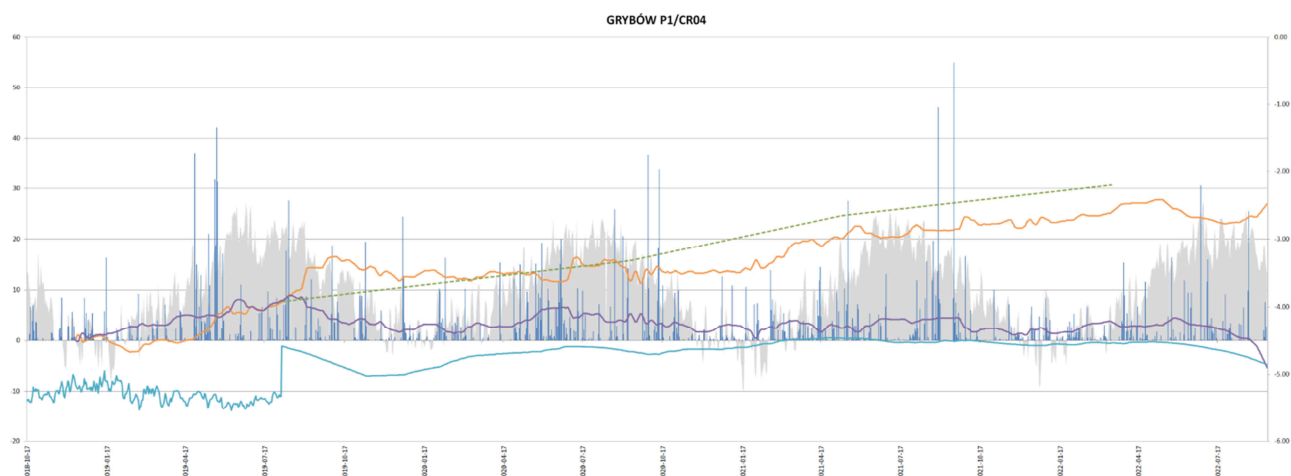


Rys. 12. Rozmieszczenie reflektorów radarowych na osuwisku w Grybowie.



Rys. 13. Przeszyczenia pionowe i poziome (w osi W-E) reflektorów [mm] na osuwisku w Grybowie.

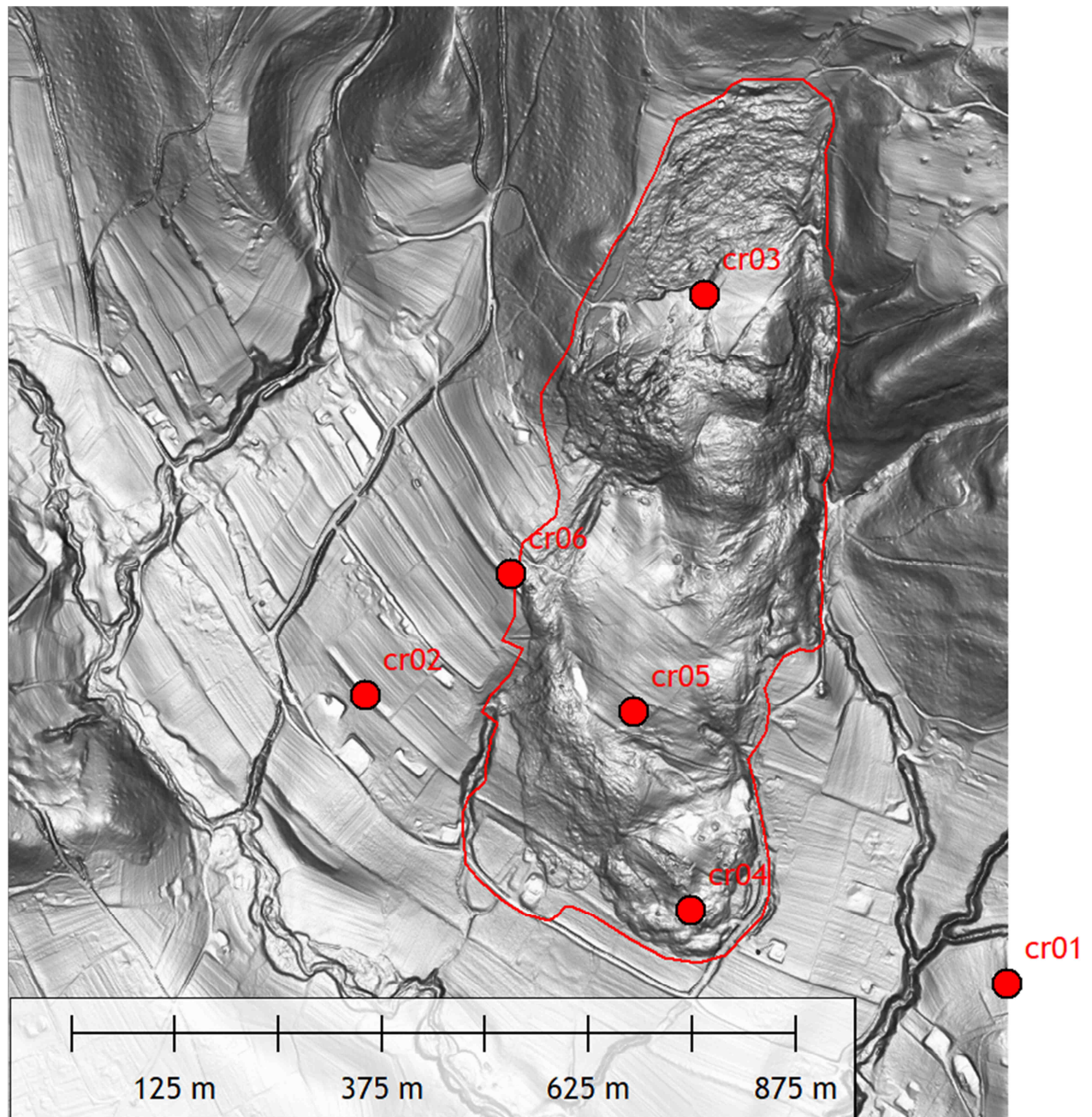
Reflektor CR04. W analizowanym okresie podlegał niewielkim przemieszczeniom o prędkościach ok 20 mm/rok. Analizując wykres zmian zwierciadła wód podziemnych piezometru P2 widać wyraźnie wymianę urządzenia, która nastąpiła 08.08.2019 (Rys. 14). Od tego momentu rejestrowane są bowiem znacznie niższe wahania dobowe co wynika z charakterystyki użytego urządzenia nowszej generacji. W przebiegu zmian zwierciadła wód podziemnych za cały analizowany okres można mimo to dostrzec wyraźną, sinusoidalną zmienność sezonową, która znajduje swoje odzwierciedlenie w wahaniami prędkości przemieszczeń reflektora, o podobnej, sinusoidalnej charakterystyce z około 4-miesięcznym opóźnieniem. Dla reflektora CR04 w Grybowie również zaobserwowano charakterystyczne niestabilności termiczne związane z ujemnymi temperaturami.



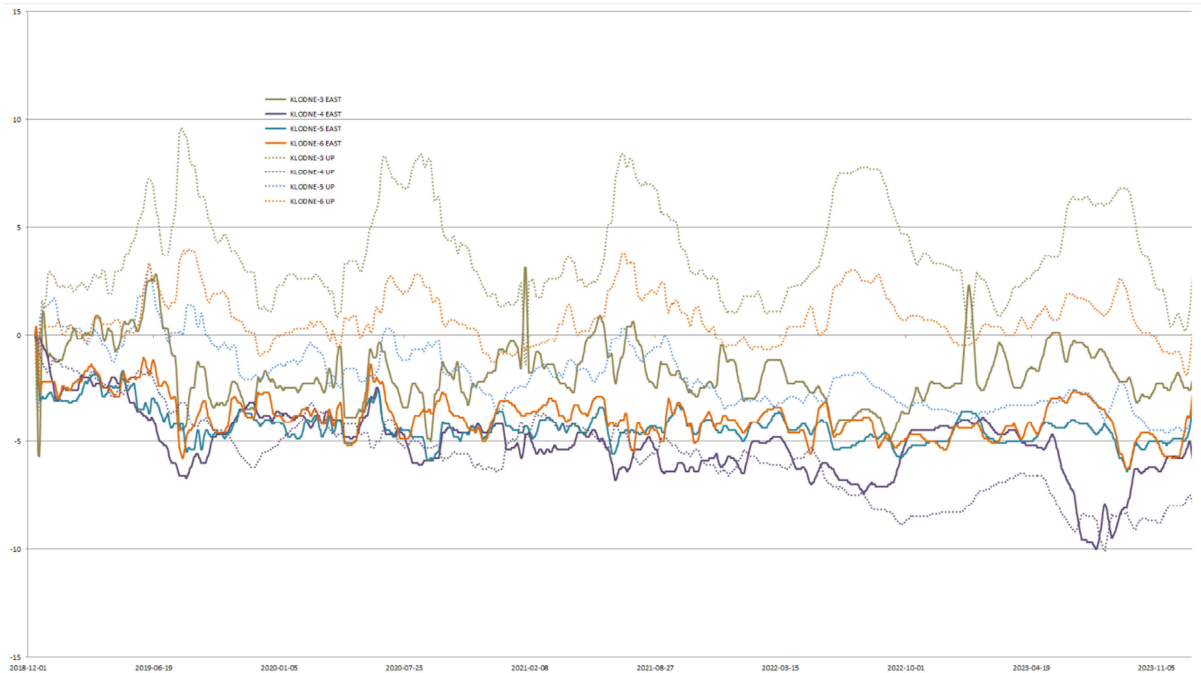
Rys. 14. Zestawienie serii danych dla reflektora CR04. Osuwisko w Grybowie.

Kłodne

Reflektory na osuwisku w Kłodnem wykazują jedynie niewielkie przemieszczenia. Reflektor CR03 w górnej części osuwiska nie wykazuje przemieszczeń a jedynie zmiany termiczne/sezonowe. Reflektor CR04 przemieścił się o ok 10 mm w dół stoku, reflektory CR05 i CR06 o ok 5/6 mm (Rys. 15, Rys. 16).

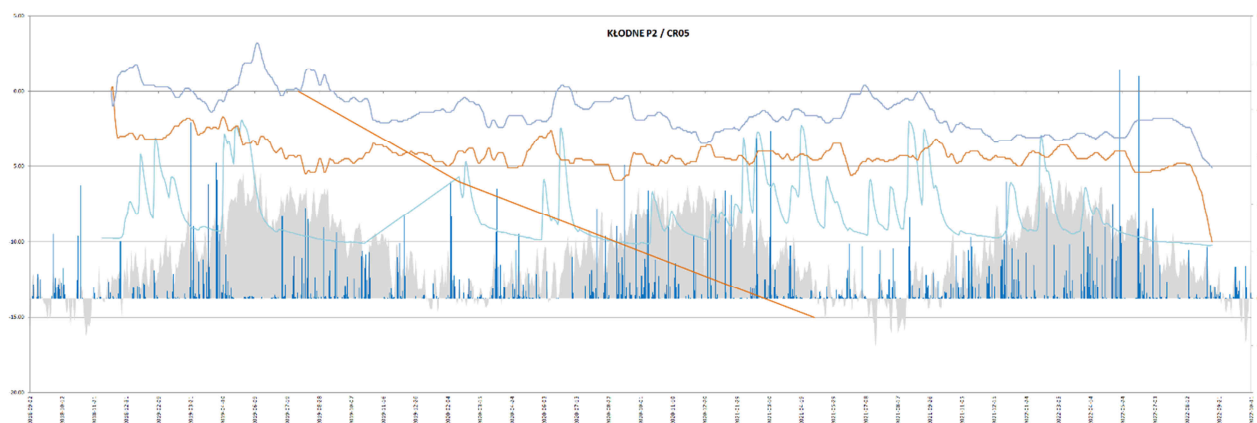


Rys. 15. Rozmieszczenie reflektorów na osuwisku w Kłodnem.



Rys. 16. Przeszczenia pionowe i poziome (w osi W-E) reflektorów [mm] na osuwisku w Kłodnem.

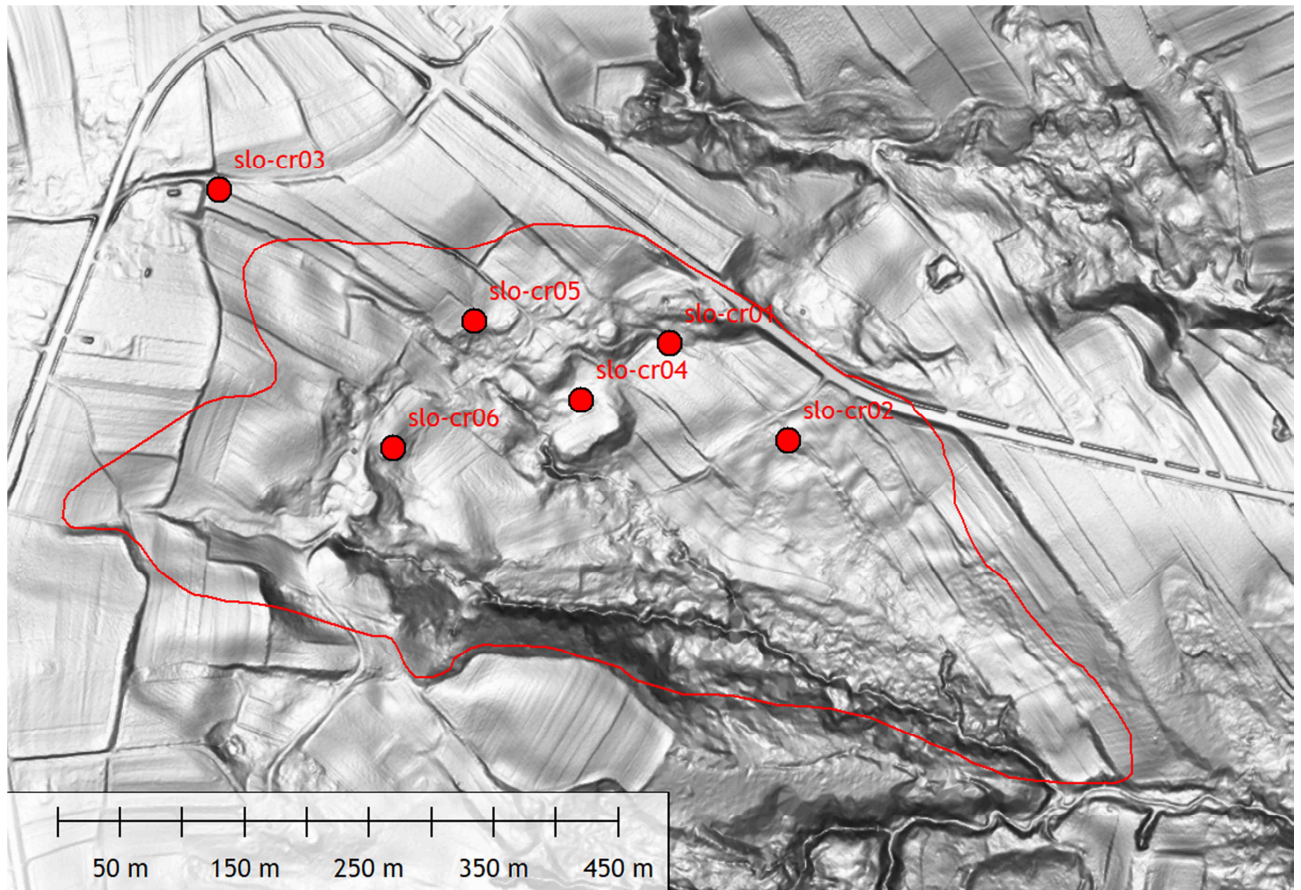
Reflektor CR05. Z uwagi na charakter górotworu (silnie spękane piaskowce) zmiany zwierciadła wód podziemnych następują bardzo gwałtownie. Są to nagłe wzrosty zwierciadła tuż po intensywnych opadach, po których następują nieco wolniejsze spadki do średniej wieloletniej o wartości ok. -10 m ppt. Przebieg przemieszczeń reflektora jest również sinusoidalny, jednak niemal idealnie skorelowany z sezonowymi zmianami temperatur powietrza (Rys. 17, Rys. 6). Zmiany zwierciadła wód podziemnych wydają się tutaj nie mieć wpływu na przemieszczenia reflektora. Tak jak w pozostałych przypadkach obserwuje się również charakterystyczne niestabilności związane z ujemnymi temperaturami. Oprócz wymienionych zmian sezonowych i termicznych reflektor, podobnie jak w świetle pomiarów GNSS na reperach ziemnych powierzchnia osuwiska, nie podlegał przemieszczeniom.



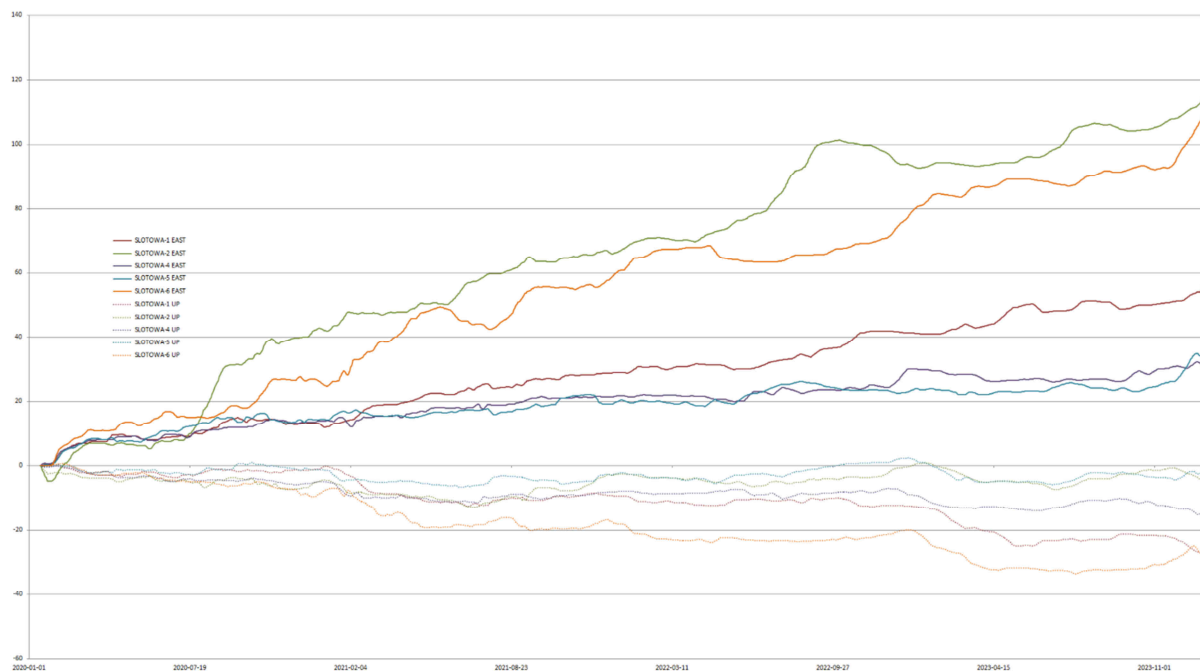
Rys. 17. Zestawienie serii danych dla reflektora CR05. Osuwisko w Kłodnem.

Słotowa

Wszystkie reflektory wykazywały w analizowanym okresie przemieszczenia w dół stoku. Reflektory CR01, CR04, CR05 w przedziale 30 - 58 mm, reflektory CR06 i CR02 aż 110 mm (Rys. 18, Rys. 19).

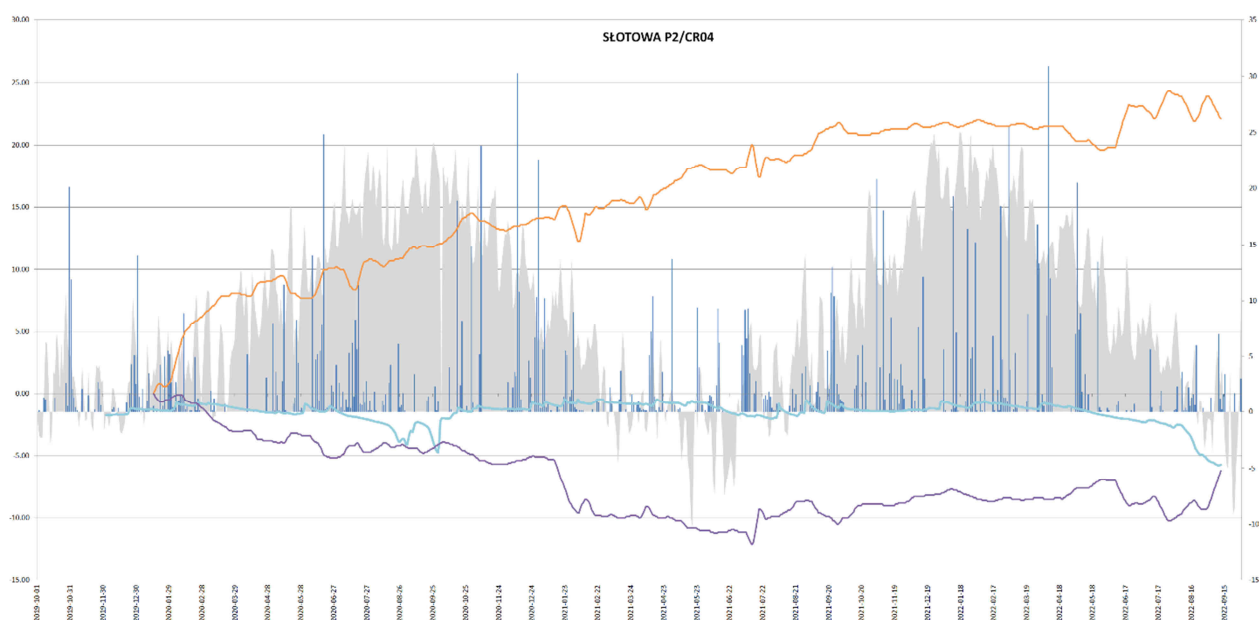


Rys. 18. Rozmieszczenie reflektorów na osuwisku w Słotowej.



Rys. 19. Przeszyczenia pionowe i poziome (w osi W-E) reflektorów [mm] na osuwisku w Słotowej.

Reflektor CR04. Osuwisko to zostało najpóźniej spośród wszystkich tu analizowanych wyposażone w reflektory i stąd seria obserwacji jest najkrótsza i obejmuje jedynie ok. 2 lata. Dane piezometryczne charakteryzuje wysoki i stosunkowo stały poziom wód gruntowych z relatywnie dużym (ok 2 m) spadkiem zwierciadła w lecie 2020 roku. Zmiany zwierciadła wód gruntowych praktycznie nie odzwierciedlają się w wysokich i w miarę stałych prędkościach przemieszczeń reflektora o prędkościach (ok 10 mm/rok). Zaobserwować można i tutaj opisaną powyżej niestabilność termiczną związaną z ujemnymi temperaturami w lutym 2021 roku (Rys. 20). Brak związku deformacji ze zmianami zwierciadła wód gruntowych można tłumaczyć budową geologiczną koluwiów osuwiska: występowaniem pokryw lessowych na gliniastym podłożu co sprzyja osuwaniu niezależnie od nawodnienia.



Rys. 20. Zestawienie serii danych dla reflektora CR04. Osuwisko w Słotowej.

7. Podsumowanie i wnioski

Wyniki przeprowadzonych, wciąż bardzo wstępnych analiz potwierdziły wpływ nawet stosunkowo niewielkich wahań zwierciadła wód podziemnych na zmiany prędkości przemieszczania powierzchni osuwiska. Co warto podkreślić, związek ten jest jednak silnie uwarunkowany budową geologiczną. Jeśli zależność taka występuje, wysoka rozdzielczość czasowa danych CRInSAR umożliwia określenie po jakim czasie powierzchnia terenu reaguje na zmiany hydrogeologiczne. Dalsze, wnikliwe analizy ilościowe powinny pozwolić na wyznaczenie dokładnych wartości takich opóźnień. Zebrane dotychczas doświadczenia zachęcają do kontynuowania tych analiz, zwłaszcza, że wydłużające się serie czasowe obserwacji dają nadzieję na odkrycie kolejnych ciekawych zależności.

Dotychczasowe doświadczenia wykorzystania reflektorów pozwalają stwierdzić, że urządzenia te mimo pewnych ograniczeń, sprawdzają się na niezalesionych obszarach na stokach, gdzie występuje korzystna orientacja kierunku ruchu osuwiskowego w stosunku do kierunku przelotów satelitów. Reflektory skorelowane z innymi urządzeniami monitoringu są natomiast świetnym narzędziem, o zastosowaniu przede wszystkim na poziomie naukowym, wspomagającym tworzenie modeli pozwalających zrozumieć i ująć ilościowo zagrożenia uruchomienia i ruchu osuwisk w przypadku konkretnej budowy geologicznej czy progów opadowych, gdyż zapewniają długie serie czasowe pomiaru przemieszczeń z bardzo krótkim interwałem pomiędzy dwoma obserwacjami. Zagadnienia te mają już konkretne przełożenie na praktyczne zastosowania. Metoda jako taka rokuje ponadto na możliwość określania stanu aktywności osuwisk. Dotyczy to przede wszystkim osuwisk bardzo powolnych, których przejawy deformacji mogą być niewidoczne ludzkim okiem oraz nie być wykrywane przez mniej czułe urządzenia pomiarowe. Implementacja takiego rozwiązania może przyczynić się w specyficznych warunkach w sposób wymierny na ograniczenie zagrożeń na konkretnych osuwiskach.

8. Literatura

- Bamler, R., Hartl, P., 1998. Synthetic aperture radar interferometry. *Inverse Problems* 14, R1–R54.
- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., Sansosti, E., 2002. A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 40, 2375–2383.
- Bovenga, F., Wasowski, J., Nitti, D.O., Nutricato, R., Chiaradia, M.T., 2012. Using COSMO/SkyMed X-band and ENVISAT C-band SAR interferometry for landslides analysis. *Remote Sensing of Environment* 119, 272–285. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.12.013>
- Bürgmann, R., Rosen, P.A., Fielding, E.J., 2000. Synthetic Aperture Radar interferometry to measure Earth's surface topography and its deformation. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 28, 169–209.
- Colesanti, C., Wasowski, J., 2006. Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry. *Engineering Geology* 88, 173–199. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.09.013>
- Crosetto, M., Monserrat, O., Cuevas-González, M., Devanthery, N., Crippa, B., 2016. Persistent Scatterer Interferometry: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 115, 78–89. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.011>
- Czikhhardt, R., Marel, H., Papco, J., 2021. GECORIS: An Open-Source Toolbox for Analyzing Time Series of Corner Reflectors in InSAR Geodesy. *Remote Sensing* 13, 926. <https://doi.org/10.3390/rs13050926>
- De Zan, F., Guarnieri, A.M., Rocca, F., 2008. Advances in SAR interferometry for sentinel-1 with TOPS. 1–6. <https://doi.org/10.1109/RADAR.2008.4720871>
- Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F., 1999. Permanent Scatterers in SAR Interferometry. 1–3.
- Fialko, Y., Simons, M., Agnew, D., 2001. The complete (3-D) surface displacement field in the epicentral area of the 1999 M_{7.1} Hector Mine earthquake, California, from space geodetic observations. *Geophysical Research Letters* 28, 3063.
- Froese, C., Poncos, V., Skirrow, R., Mansour, M., Martin, D., 2008. “Characterizing complex deep seated landslide deformation using Corner Reflector InSAR (CR-InSAR): Little Smoky Landslide, Alberta”.
- Fruneau, B., Achache, J., Delacourt, C., 1996. Observation and modelling of the Saint-Étienne-de-Tinée landslide using SAR interferometry. *Tectonophysics* 265, 181–190. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(96\)00047-9](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(96)00047-9)
- Garthwaite, M.C., Lawrie, S., Dawson, J., Thankappan, M., 2015. Corner reflectors as the tie between InSAR and GNSS measurements: Case study of resource extraction in Australia. European Space Agency, (Special Publication) ESA SP SP-731.
- Goldstein, R.M., Zebker, H.A., Werner, C.L., 1988. Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping. *Radio Science* 23, 713–720.
- Guarnieri, A.M., Parizzi, F., Prati, C., Rocca, F., 1993. SAR Interferometry Experiments with ERS-1. 991–993.
- Hartl, P., Reich, M., Thiel, K.-H., Xia, Y., 1993. SAR interferometry applying ERS-1: some preliminary test results. First ERS-1 Symposium—Space at the Service of our Environment, Cannes, France, 4–6 November 1992, ESA SP-359. 219–222.
- Hooper, A., Bekaert, D., Spaans, K., Arkan, M., 2012. Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation. *Tectonophysics* 514–517, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.10.013>
- Hooper, A., Zebker, H., Segall, P., Kampes, B., 2004. A new method for measuring deformation on volcanoes and other non-urban areas using InSAR persistent scatterers. *Geophysical Research Letters* 31, L23611, doi:10.1029/2004GL021737.
- Jauvin, M., Yan, Y., Trouvé, E., Fruneau, B., Gay, M., Girard, B., 2019. Integration of Corner Reflectors for the Monitoring of Mountain Glacier Areas with Sentinel-1 Time Series. *Remote Sensing* 11, 988. <https://doi.org/10.3390/rs11080988>

- Ketelaar, V.B.H., 2008. Monitoring surface deformation induced by hydrocarbon production using satellite radar interferometry. Delft University of Technology, Delft, the Netherlands.
- Kos, J., Wójcik, A., 2022a. - Karta rejestracyjna osuwiska (numer ewidencyjny 12-05-042-000145) w miejscowości Szymbark-Huciska.
- Kos, J., Wójcik, A., 2022b. Karta rejestracyjna osuwiska (numer ewidencyjny 12-05-042-000141) w miejscowości Szymbark-Zapadle.
- Kos, J., Wójcik, A., 2022c. Karta rejestracyjna osuwiska (numer ewidencyjny 12-10-011-016892) w miejscowości Grybów.
- Kos, J., Wójcik, A., 2022d. Karta rejestracyjna osuwiska (numer ewidencyjny 12-05-011-132487) w miejscowości Grybów.
- Kos, J., Wójcik, A., 2022e. Karta rejestracyjna osuwiska (numer ewidencyjny 12-07-072-014555) w miejscowości Kłodne.
- Kos, J., Wójcik, A., 2022f. Karta rejestracyjna osuwiska (numer ewidencyjny 18-03-065-071897) w miejscowości Słotowa.
- Marinkovic, P., Ketelaar, G., Leijen, F. van, Hanssen, R., 2008. InSAR Quality Control: Analysis of Five Years of Corner Reflector Time Series. 8 pp.
- Massonnet, D., Feigl, K.L., 1998. Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface. *Reviews of Geophysics* 36, 441–500.
- Menne, M.J., Durre, I., Vose, R.S., Gleason, B.E., Houston, T.G., 2012. An Overview of the Global Historical Climatology Network-Daily Database. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 29, 897–910. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-11-00103.1>
- Nescieruk, P., Perski, Z., Wojciechowski, T., Warmuz, B., Kowalski, Z., Kowalski, K., Karwacki, K., Dacka, J., 2017a. Raport z prac monitoringowych przeprowadzonych w roku 2017 na osuwisku Szymbark Huciska.
- Nescieruk, P., Perski, Z., Wojciechowski, T., Warmuz, B., Kowalski, Z., Kowalski, K., Karwacki, K., Dacka, J., 2017b. Raport z prac monitoringowych przeprowadzonych w roku 2017 na osuwisku Szymbark Zapadle.
- Nescieruk, P., Perski, Z., Wojciechowski, T., Warmuz, B., Kowalski, Z., Kowalski, K., Karwacki, K., Dacka, J., 2017c. Raport z prac monitoringowych przeprowadzonych w roku 2017 na osuwisku Grybów.
- Nescieruk, P., Perski, Z., Wojciechowski, T., Warmuz, B., Kowalski, Z., Kowalski, K., Karwacki, K., Dacka, J., 2022a. Raport z prac monitoringowych przeprowadzonych w roku 2021 na osuwisku Szymbark Huciska.
- Nescieruk, P., Perski, Z., Wojciechowski, T., Warmuz, B., Kowalski, Z., Kowalski, K., Karwacki, K., Dacka, J., 2022b. Raport z prac monitoringowych przeprowadzonych w roku 2021 na osuwisku Szymbark Zapadle.
- Nescieruk, P., Perski, Z., Wojciechowski, T., Warmuz, B., Kowalski, Z., Kowalski, K., Karwacki, K., Dacka, J., 2022c. Raport z prac monitoringowych przeprowadzonych w roku 2021 na osuwisku Kłodne.
- Nescieruk, P., Perski, Z., Wojciechowski, T., Warmuz, B., Kowalski, Z., Kowalski, K., Karwacki, K., Dacka, J., 2022d. Raport z prac monitoringowych przeprowadzonych w roku 2021 na osuwisku Słotowa.
- Perissin, D., 2006. SAR super-resolution and characterization of urban targets. Politecnico di Milano, Italy.
- Perski, Z., 1999. Osiadania terenu GZW pod wpływem eksploatacji podziemnej określane za pomocą satelitarnej interferometrii radarowej (InSAR). *Przegląd Geologiczny* 2, 171–174.
- Perski, Z., 2019. Zaawansowane techniki InSAR w monitorowaniu osuwisk. *Przegląd Geologiczny* 67, 351–359. <https://doi.org/10.7306/2019.29>
- Perski, Z., Warmuz, B., Laskowicz, I., Wódka, M., Mrozek, T., Malata, T., Krawczyk, M., Chowaniec-Tobiasz, K., Michalski, A., 2018. Monitoring osiadania powierzchni terenu w 3 wybranych lokalizacjach poszukiwań gazu w formacjach łupkowych – projekt pilotażowy”. Opracowanie naukowo-badawcze. Państwowy Instytut Geologiczny - Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa.
- Perski, Z., Wojciechowski, T., 2022. Monitoring dynamiki ruchów powierzchni osuwisk w warunkach zmiennego poziomu wód gruntowych z wykorzystaniem reflektorów radarowych. *Przegląd Geologiczny* 70, 661–670. <https://doi.org/10.7306/2022.20>

- Qin, Y., Perissin, D., Lei, L., 2013. The Design and Experiments on Corner Reflectors for Urban Ground Deformation Monitoring in Hong Kong. *International Journal of Antennas and Propagation* 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/191685>
- Refice, A., Bovenga, F., Guerriero, L., Wasowski, J., Interateneo, D., Amendola, V., 2001. DInSAR applications to landslide studies. 2, 3–5.
- 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, 333–382.
- Singleton, A., Li, Z., Hoey, T., Muller, J.-P., 2014. Evaluating sub-pixel offset techniques as an alternative to D-InSAR for monitoring episodic landslide movements in vegetated terrain. *Remote Sensing of Environment* 147, 133–144. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.03.003>
- Torres, R., Snoeij, P., Davidson, M., Bibby, D., Lokas, S., 2012. The Sentinel-1 mission and its application capabilities. 1703–1706. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2012.6351196>
- Warmuz, B., Nescieruk, P., 2019. Dynamika przemieszczeń wybranych osuwisk w Karpatach. *Przegląd Geologiczny* 67, 326–331. <https://doi.org/10.7306/2019.26>
- Wojciechowski, T., Laskowicz, I., Nescieruk, P., Uęcinowicz, G., Czerwiński, T., Perski, Z., 2021. Zagrożenia geologiczne w Polsce w 2020 roku. 69, 10.
- Wojciechowski, T., Perski, Z., Wójcik, A., 2008. Wykorzystanie satelitarnej interferometrii radarowej do badań osuwisk w polskiej części Karpat. *Przegląd Geologiczny* 56, 1087–1091.
- Wójcik, A., Perski, Z., Borkowski, A., Wojciechowski, T., 2011. Zastosowanie danych teledetekcji lotniczej i satelitarnej do badania dynamiki czynnych osuwisk w 2010r. na przykładzie osuwiska w Kłodnem koło Limanowej. *Polski Kongres Drogowy*. 30.03-01.04.2011 Zakopane. 111–120.
- Wright, T.J., Parsons, B.E., Lu, Z., 2004. Toward mapping surface deformation in three dimensions using InSAR. *Geophysical Research Letters* 31, 5 PP. <https://doi.org/200410.1029/2003GL018827>
- Xia, Y., Kaufmann, H., Guo, X., 2002. Differential SAR interferometry using corner reflectors. *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2002. IGARSS '02. 2002 IEEE International. 1243–1246 t.2. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2002.1025902>
- Zimnal, Z., Wojciechowski, T., Perski, Z., 2019. Osuwiska w Polsce – od rejestracji do prognozy, czyli 13 lat projektu SOPO. 67, 7.