



Państwowy Instytut Geologiczny  
Państwowy Instytut Badawczy

państwowa służba geologiczna  
państwowa służba hydrogeologiczna



## Interferometryczny Monitoring Terenu Polski etap I

Metodyka opracowania cyklicznych map deformacji terenu Polski w oparciu  
o dane interferometryczne  
Część 1 – założenia

### Nadzorujący:

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

### Finansujący:

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



Sfinansowano ze środków  
Narodowego Funduszu  
Ochrony Środowiska  
i Gospodarki Wodnej

### Wykonawca:

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



### Osoba sporządzająca raport:

**Zbigniew PERSKI**

Imię i nazwisko

.....  
Podpis

### Kierownik komórki organizacyjnej:

### Dyrektor/Dyrektor pionu:

.....  
Pieczątką i podpis

.....  
Pieczątką i podpis

Warszawa, dn. 30.12.2020 r.

Szczegóły dokumentu:

EFEKT RZECZOWY Z REALIZACJI ZADANIA  
Z ZAKRESU PAŃSTWOWEJ SŁUŻBY GEOLOGICZNEJ  
*za okres: od 1 stycznia 2018 r do 31 grudnia 2020 r.*

w ramach umowy dotacji 194/2018/Wn-07/FG-go-dn/D z dnia 23.08.2018 r.

Autorzy	Dr Zbigniew Perski Dr Maria Przyłucka
Uwagi	Raport sporządzono w lipcu 2019 r. Aktualizacja: grudzień 2020 r.

## Spis treści

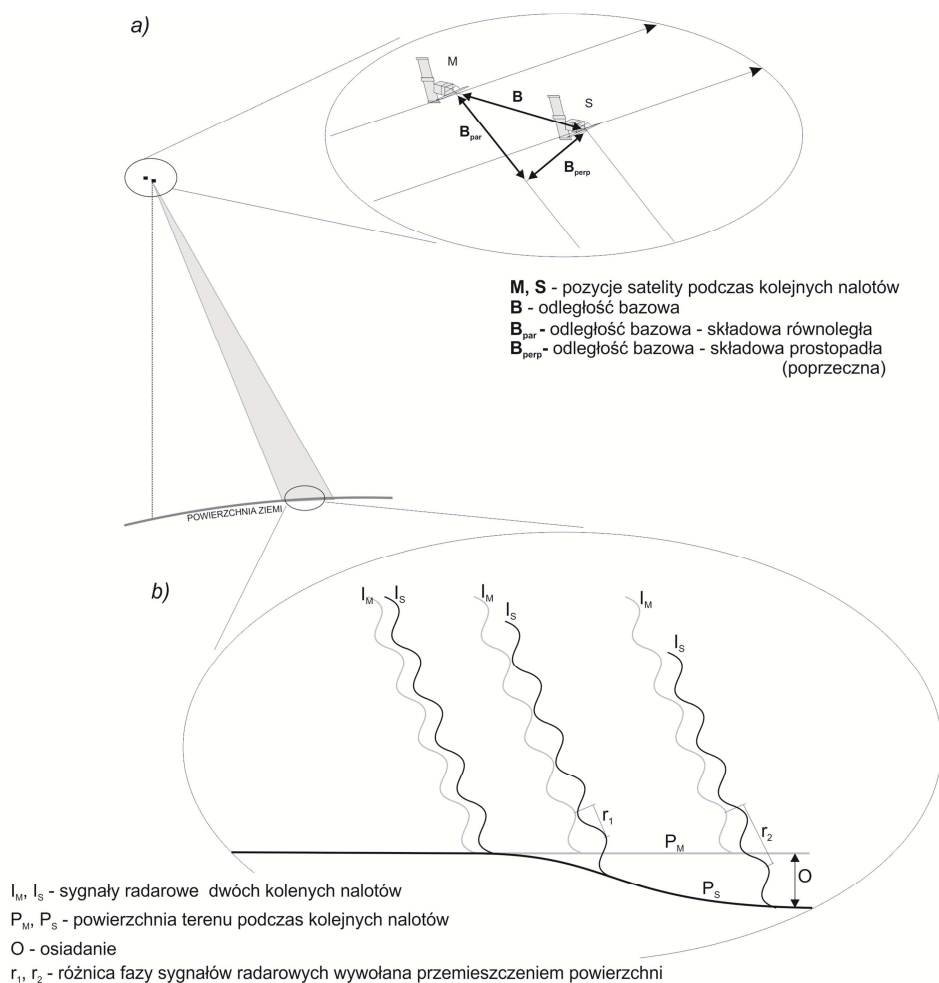
1	Wstęp.....	4
2	Założenia i metodyka pomiarów Interferometrii SAR.....	5
2.1	Metody wieloczasowe .....	6
2.1.1	Wykorzystanie reflektorów radarowych do walidacji danych.....	8
3	Przegląd istniejących serwisów udostępniających dane interferometryczne na Świecie. 13	
3.1	Włochy.....	15
3.2	Norwegia .....	16
3.3	Niemcy.....	16
3.4	Dania i Holandia .....	17
4	European Ground Motion Service.....	18
4.1	Kontekst polityczny i koncepcja.....	18
4.2	EGMS White Paper .....	19
4.3	Status i kolejne kroki .....	20
4.4	Definicja serwisu .....	21
4.5	Produkty.....	23
5	Wnioski .....	27
6	Literatura .....	28

## 1 Wstęp

Celem niniejszego raportu jest podsumowanie etapu prac, związanego z opracowaniem metodyki opracowania cyklicznych map deformacji terenu Polski w oparciu o dane interferometryczne. Raport niniejszy jest pierwszą częścią prac i zawiera zbiór podstawowych założeń na bazie których metodyka będzie opracowywana w ramach prac projektu InMoTeP II. W raporcie omówiono podstawową metodykę satelitarnej interferometrii radarowej, metody wieloczasowe oraz wykorzystanie reflektorów radarowych do walidacji danych. W drugiej części raportu przedstawiono istniejące na Świecie pierwsze rozwiązania podobnych serwisów ora omówiono założenia serwisu ogólnoeuropejskiego EGMS.

## 2 Założenia i metodyka pomiarów Interferometrii SAR

Interferometria SAR (InSAR) to technika służąca do uzyskiwania informacji dotyczących względnych danych wysokościowych (Goldstein et al., 1988). Wykorzystuje ona różnice fazy sygnałów radarowych pochodzących z dwóch obserwacji mikrofalowych typu SAR (*Synthetic Aperture Radar*) tego samego obszaru (Rys. 1). Dobry przegląd podstaw metodyki, potencjału i obszarów zastosowań InSAR można znaleźć w szeregu prac o charakterze podstawowym: (Bamler and Hartl, 1998; Bürgmann et al., 2000; Massonnet and Feigl, 1998; Perski, 1999). Tradycyjna technika InSAR opiera się na wykorzystaniu interferogramów tj. rastrowych zbiorów przedstawiających różnice fazy pomiędzy dwoma rejestracjami SAR. Nazywana jest ona metodą D-InSAR (*Differential – InSAR*) dla odróżnienia od technik wykorzystujących jednoczesne rejestracje przy użyciu dwóch anten SAR (Bistatic-InSAR). Podsumowując, D-InSAR wykorzystuje rejestracje SAR wykonywane sekwencyjnie za pomocą jednej anteny SAR w czasie kolejnych przelotów satelity nad tym samym obszarem.

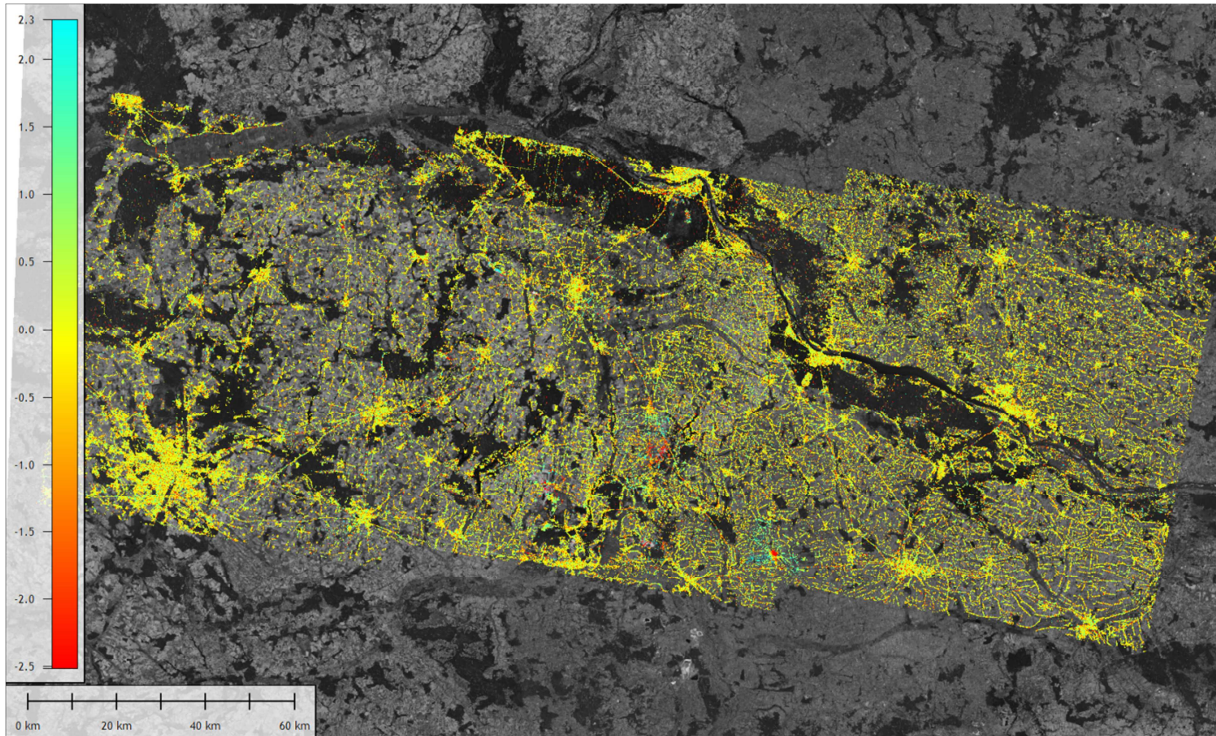


Rys. 1. Geometria i zasada działania D-InSAR

Największe ograniczenia metody InSAR wiążą się z tzw. dekorelacją czasową (stopniową utratą koherencji w czasie), która związana jest ze zmianami właściwości elektromagnetycznych lub/i pozycją rozpraszacza wewnątrz komórki rozdzielczości (Cattabeni et al., 1994; Villasenor and Zebker, 1992). Zagadnienia koherencji omówiono szczegółowo w odrębnym raporcie (Perski et al. 2020). Kolejnym ograniczeniem metody InSAR jest występowanie tzw. artefaktów atmosferycznych. Zróżnicowana zawartość pary wodnej w troposferze a także jej turbulentny charakter są źródłem dodatkowej składowej fazowej sygnału nazywanej atmosferycznym obrazem fazy (*Atmospheric Phase Screen APS*). W przypadku pojedynczego lub jedynie kilku interferogramów dla danego obszaru efekty atmosferyczne są bardzo trudne lub wręcz niemożliwe do usunięcia, stąd uzyskiwane dokładności pomiarowe są często dużo niższe od oczekiwanych (Hanssen, 2005). Z powodu wymienionych ograniczeń praktyczne użycie metody InSAR jest w większości przypadków zredukowane do danych o małych bazach czasowych, przypadków badania zjawisk o dużych przyrostach deformacji zachodzących w czasie pomiędzy kolejnymi rejestracjami, badania obszarów pozbawionych roślinności, przypadków, gdy oba obrazy użyte do konstrukcji interferogramu zostały zarejestrowane w tych samych bądź bardzo zbliżonych warunkach atmosferycznych.

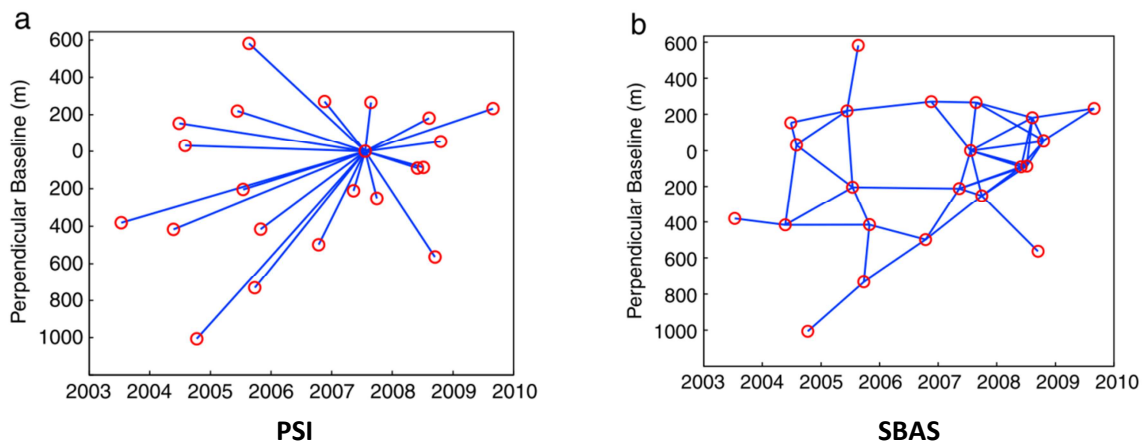
## 2.1 Metody wieloczasowe

Ominięcie podstawowych ograniczeń metody InSAR i jej rozwinięcie w kierunku analiz szeregów czasowych (MTI – *Multi Temporal InSAR*) okazało się możliwe dzięki zastosowaniu metod punktowych, opartych na selekcji pikseli zachowujących koherencję w czasie. Charakteryzują je różne strategie przetwarzania i selekcji koherentnych pikseli. Pierwsza tego typu metoda (PSI – *Persistent Scatterers SAR interferometry*) została opracowana w końcu lat '90 XX wieku przez zespół POLIMI z Politechniki w Mediolanie (Ferretti et al., 1999). Wykorzystuje ona właściwości rozpraszaczy stabilnych (PS). Była ona pierwszą opracowaną i wdrożoną w praktyce metodą analiz wieloczasowych SAR. Główną ideą metody PSI jest dekompozycja serii interferometrycznych obserwacji fazowych na trzy podstawowe składowe: deformacji, wysokości względnej i APS dla pikseli spełniających warunek PS. Podstawowym warunkiem prawidłowego przeprowadzenia dekompozycji sygnału jest odpowiednia liczba obserwacji, stąd wymagane co najmniej 20 interferogramów (Rys. 2).



Rys. 2. Wielkoobszarowy zbiór punktów PS otrzymanych w wyniku przetwarzania danych Sentinel-1. Deformacja [mm/rok]. Rejon Poznań – Bydgoszcz – Płock – Łowicz (opracowanie: autor)

Kolejne rozwinięcia metody wykorzystują koherencję; metoda StaMPS – (Hooper et al., 2004) oraz wykorzystanie interferogramów o krótkich bazach, metoda SBAS – (Berardino et al., 2002). Metoda SBAS (*Small Baseline Subsets*) wykorzystuje wszystkie najkorzystniejsze kombinacje interferometryczne w obrębie serii (Rys. 3). Ma to na celu obliczenie serii interferogramów w taki sposób by miały one jak najwyższą koherencję.



Rys. 3. Wykresy odległości bazowych w stosunku do baz czasowych dla par interferometrycznych tego samego zestawu danych. Niebieskie linie pokazują w jaki sposób tworzy się pary interferometryczne w metodzie a) PSI i b) SBAS (Hooper et al., 2012)

### 2.1.1 Wykorzystanie reflektorów radarowych do walidacji danych

Ze specyfiki obrazowania mikrofalowego SAR wynika, że wartość zarejestrowanego sygnału jest koherentną sumą odbić od obiektów elementarnych znajdujących się wewnątrz komórki rozdzielczości (*resolution cell*). Moc odebranego sygnału zależy od nachylenia powierzchni odbijającej w stosunku do kąta padania fali radarowej, właściwości dielektrycznych powierzchni oraz jej szorstkości. W zależności od rodzaju pokrycia terenu tylko część sygnału ulegającego rozproszeniu zostaje odbita w stronę anteny SAR. Ten typ rozproszenia nazywamy rozproszeniem wstecznym (*backscattering*). Jeśli w obrębie komórki rozdzielczości występuje element charakteryzujący się bardzo wysokim rozpraszaniem wstecznym to właśnie jego amplituda będzie sygnałem dominującym dla wartości piksela. Dla obiektów tego typu obie składowe sygnału: faza i amplituda wykazują bardzo wysoką stabilność w czasie (dla kolejnych obserwacji). Obiekty takie, dzięki swoim właściwościom, nazywane są obiektami koherentnymi (*coherent targets*), rozpraszaczami koherentnymi (*coherent scatterers*) albo rozpraszaczami stabilnymi (PS: *persistent scatterers, permanent scatterers*). Rozpraszacze stabilne wykorzystuje się w satelitarnej interferometrii radarowej (InSAR) w tzw. metodzie interferometrii rozpraszaczy stabilnych (PSI).

Rozpraszacze stabilne to obiekty charakteryzujące się silnym rozpraszaniem wstecznym, które jest dominującym sygnałem dla danej komórki rozdzielczości. Obiekty takie można scharakteryzować za pomocą wysokich wartości tzw. radarowego przekroju skutecznego RCS (*Radar Cross Section*). Najogólniej mówiąc RCS danego obiektu jest to ekwiwalent płaskiej powierzchni izotropowo odbijającej fale elektromagnetyczne, jaka byłaby potrzebna do odbicia tej samej mocy sygnału (Henderson and Lewis, 1998). Na obszarach zurbanizowanych mamy do czynienia z grupami obiektów zbudowanych z płaskich, gładkich powierzchni o różnym nachyleniu takimi jak ściany czy dachy budynków o niejednokrotnie wysokiej stałej dielektrycznej (powierzchnie metalowe).

Oprócz obiektów, które działają jak rozpraszacze stabilne, istnieje możliwość celowego instalowania urządzeń zapewniających odbicie sygnału radarowego w żądany sposób. Obiekty takie nazywamy **reflektorami radarowymi**. Stosuje się je w dwóch podstawowych przypadkach:

1. Dla uzupełnienia sieci naturalnych stabilnych rozpraszaczy. Reflektory instaluje się wówczas w miejscach pozbawionych infrastruktury bądź wychodni skalnych – na obszarach upraw rolnych bądź nieużytków. Dla uzyskania optymalnych wyników



instalację reflektorów należy w takim przypadku poprzedzić interferometryczną analizą danych archiwalnych dla danego obszaru.

2. Dla walidacji wyników. Reflektor radarowy jest jedynym obiektem, gdzie interferometryczny pomiar deformacji można bezpośrednio odnieść do wyników pomiarów geodezyjnych. Reflektor radarowy ma ściśle zdefiniowane fizyczne centrum fazowe, które można zmierzyć metodami geodezyjnymi (za pomocą niwelacji precyzyjnej czy GNSS). Pomiar taki zapewnia absolutną integrację pomiarów interferometrycznych z pomiarami geodezyjnymi i geodezyjnym układem odniesienia. Reflektory walidacyjne są jednocześnie uzupełnieniem sieci naturalnych rozpraszaczy (patrz pkt 1).

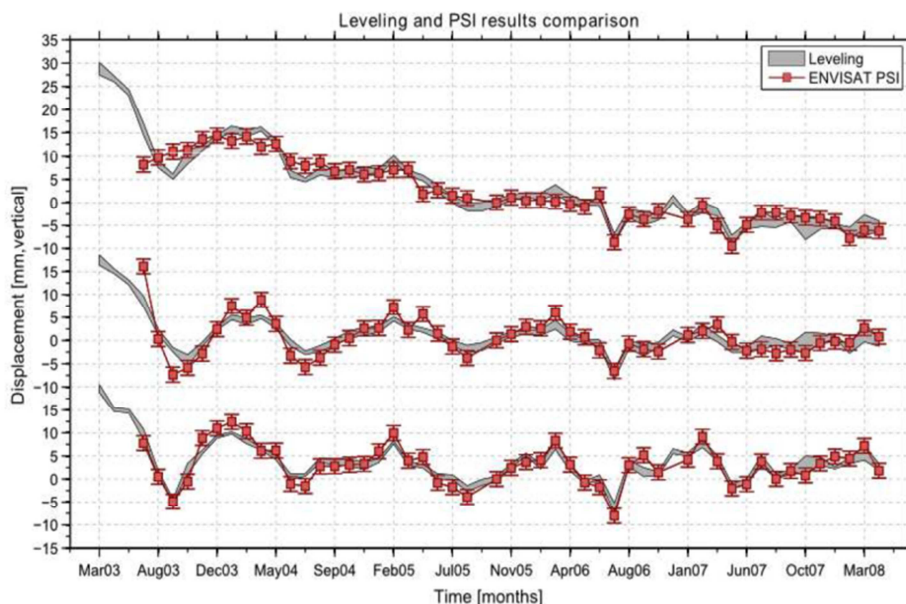
Rozpraszanie mikrofalowe, jakie zachodzi w przypadku reflektorów radarowych można sprowadzić do trzech elementarnych przypadków tzw. rozpraszaczy podstawowych (*canonical scatterers* – Franceschetti et al., 2002), do których należą (Inglada et al., 2004):

1. Rozpraszacz jednopowierzchniowy lub zwierciadlany (*specular scatterer*),
2. Rozpraszacz dwuścienny (*dihedral scatterer*),
3. Rozpraszacz trójścienny (*trihedral scatterer*).

Z uwagi na dużą efektywność i małą wrażliwość na błędy orientacji najczęściej stosowany typem reflektora jest reflektor trójścienny (*Trihedral*). Z uwagi na kształt jest zwany reflektorem narożnikowym (*Corner Reflector* - CR). Reflektory narożnikowe były od początku stosowane do walidacji i testów dokładnościowych radarowych systemów satelitarnych.

Ważnych danych na temat efektywności systemów SAR satelitów ERS-2 i Envisat dostarczył 5-letni eksperyment DCRE (*Delft Corner Reflector Experiment*) realizowany przez zespół TU Delft w latach 2003 – 2007 (Marinkovic et al., 2007). 5 trójściennych reflektorów o wymiarach 1,5 m wykonanych z pełnej blachy aluminiowej zlokalizowano na płaskim obszarze pastwisk między Rotterdamem a Delft (Rys. 4). Były one mierzone za pomocą niwelacji precyzyjnej dzień po każdej rejestracji satelitarnej. Dla integracji wyników i prawidłowej ich walidacji wewnętrznej stosowano tzw. podwójne różnice (w czasie i pomiędzy sąsiednimi reflektorami). Po uwzględnieniu poprawek na lokalizację reflektora wewnątrz komórki rozdzielczości (Perrisin, 2006) otrzymano dokładność wyznaczenia wysokości reflektora (dla podwójnych różnic) na poziomie 1,6 mm. Oznaczało to, że dokładność pomiaru interferometrycznego jest na poziomie niwelacji II klasy (wg. Instrukcji

Technicznej G-2 Głównego Geodety Kraju) i może być on stosowany w pomiarach geodynamicznych.



Rys. 4. DCRE (Delft Corner Reflector Experiment) – przykładowe serie czasowe dla reflektorów (Marinkovic et al, 2007)

Dla obliczeń interferometrycznych reflektory radarowe stanowią szczególną sieć PS, którą wykorzystuje się do obliczeń. Obliczenia wykonuje się metodą PSI, jednak w znacznie uproszczonej wersji. Dla reflektorów CR znane bowiem są współrzędne X, Y, Z centrum fazowego reflektora, które można dokładnie zmierzyć metodami geodezyjnymi. W związku z tym nie jest konieczne wyszukiwanie PSC za pomocą analizy amplitudy. Reflektory zazwyczaj nie są zbyt odległe od siebie i nie jest wymagana korekta atmosferyczna (różnice APS pomiędzy reflektorami są zanedbywalne). Wymagana jest jedynie korekta fazy uwzględniająca położenie reflektora wewnątrz komórki rozdzielczości (Perissin, 2006).

W zadaniach Państwowej Służby Geologicznej realizowanych przez PIG-PIB reflektory radarowe zostały po raz pierwszy użyte 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 radarowych z czego 15 dla satelity TerraSAR-X (Rys. 5) i 5 dla satelity Sentinel-1 (Rys. 6).



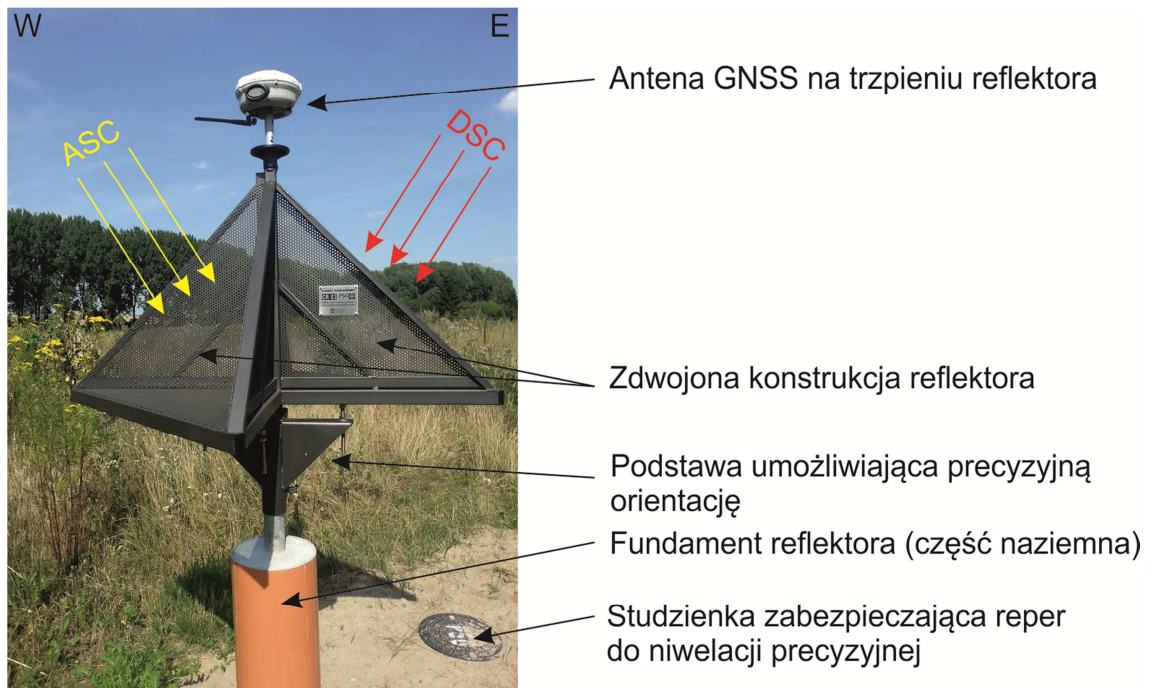
Rys. 5. Reflektor dla pomiarów sygnałów z satelity TerraSAR-X (poligon Berejów). Fot. Autor



Rys. 6. Reflektor dla pomiarów sygnałów z satelity Sentinel-1 (poligon Berejów). Fot. Autor

Każdy z reflektorów zaopatrzone w trzpień umożliwiającą instalację geodezyjnego odbiornika GNSS co pozwoliło na prowadzenie weryfikacyjnych pomiarów niwelacji GNSS.

W ramach kolejnego zadania PSG p.t. „Monitoring geodynamiczny w zakresie interferometrii satelitarnej pasa wysadów solnych w Polsce oraz próba określenia ruchliwości soli w czwartorzędzie z wykorzystaniem tomografii elektrooporowej i technik modelowania 3d” zainstalowano 7 reflektorów radarowych o zmienionej konstrukcji. Celem ich instalacji było przeprowadzenie pomiarów z użyciem wysokorozdzielczych danych TerraSAR-X z przelotów schodzących (*descending*) jak i wschodzących (*ascending*) stąd konieczność zmiany konstrukcji na zdwojoną (Rys. 7).

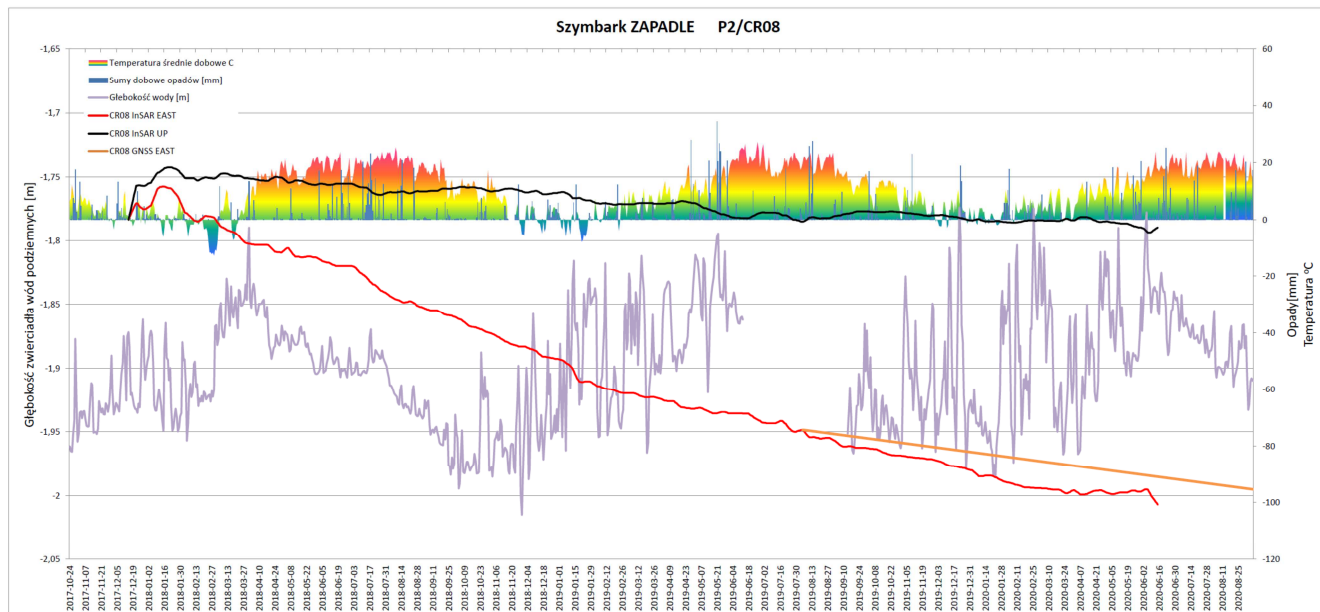


Rys. 7. Reflektor radarowy poligonu Wapno i jego podstawowe elementy

W latach 2017-2019 zainstalowano 30 reflektorów na terenie 6 osuwisk w Karpatach w ramach projektu SOPO. Są to również reflektory o zdwojonej konstrukcji skonstruowane z myślą o pomiarach z użyciem danych Sentinel 1 (Rys. 8 i 9). W roku 2020 zdemontowano reflektory na poligonach Berejów, Babiak i Lewino.



Rys. 8. Wygląd ogólny reflektora na osuwisku w Szymbarku. Fot. Autor



Rys. 9. Przykład kompleksowej analizy danych dla reflektora CR08 na osuwisku Zapadle w Szymbarku.

Czerwony – składowa W-E ruchu reflektora [mm], czarny – składowa Z [mm], pomarańczowy składowa W-E pomiarów GNSS. Na tle zmian wysokości zwierciadła wód podziemnych, opadów i temperatury powietrza

### 3 Przegląd istniejących serwisów udostępniających dane interferometryczne na Świecie

Idea tworzenia wielkoobszarowych map deformacji towarzyszy interferometrii od samego początku. Możliwości opracowań wieloczasowych (PSI, SBAS) pozwalających obserwować nawet kilkumilimetrowe przemieszczenia jeszcze bardziej rozbudziły apetyt na takie rozwiązania, nawet o zasięgu ogólnokrajowym. Głównym ograniczeniem tego typu przedsięwzięć były i nadal są ograniczenia mocy komputerów i zasobów pamięci. Popularne w ostatnich latach rozwiązania chmurowe sprawiły, że wykonanie ujednoliconego zbioru PS dla całej powierzchni nawet dużego kraju stało się dużo realniejsze do wykonania. Niektóre kraje, głównie europejskie rozpoczęły prace w tym zakresie. W rozdziale tym zostanie przedstawiony krótki przegląd istniejących doświadczeń w tym zakresie.

Włochy, Norwegia, Niemcy, Dania i Holandia to pierwsze kraje europejskie pracujące nad rozwojem własnej usługi Ground Motion Service (GMS) na skalę regionalną lub krajową

(tab. 1 i 2). Każda usługa ma swoją własną charakterystykę, zdefiniowaną przez potrzeby użytkownika i reżimy deformacji, które mają być uchwycone: niektóre GMS działają w skali regionalnej z dużą częstotliwością aktualizacji, podczas gdy inne mają np. roczne częstotliwości aktualizacji dla całego terytorium.

Tabela 1. Charakterystyka krajowych serwisów GMS (Solari 2020) – cz.1

Kraj	Portfolio produktu	Charakterystyka przetwarzania
Dania	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mapa deformacji LOS skalibrowana na danych GNSS i szeregach czasowych</li> <li>• E / W i elementy pionowe</li> <li>• Odkształcenia pionowe skalibrowane na danych GNSS i modelu podnoszenia</li> <li>• Baza danych anomalnych punktów</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dane Sentinel 1A/B</li> <li>• Przetwarzanie PSI + DSI</li> <li>• Pełna rozdzielczość dla map deformacji i</li> <li>• Rozdzielczość 80x80 m dla rzutowanych zbiorów danych</li> </ul>
Niemcy	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Skalibrowana na GNSS mapa deformacji LOS i szeregi czasowe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dane Sentinel 1A/B</li> <li>• Przetwarzanie PSI w pełnej rozdzielczości</li> </ul>
Włochy (region Toskanii)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mapy deformacji LOS i szeregi czasowe</li> <li>• Baza danych i mapy anomalnych punktów</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dane Sentinel 1A/B</li> <li>• Przetwarzanie PSI + DSI</li> <li>• Przetwarzanie w pełnej rozdzielczości z danymi szeregów czasowych oraz algorytmem data mining</li> </ul>
Holandia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mapa deformacji LOS skalibrowana na danych GNSS i szeregach czasowych</li> <li>• Mapa E / W i komponentów pionowych</li> <li>• Monitorowanie deformacji obiektów oparte na komponentach E / W i pionu</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dane Sentinel 1A/B</li> <li>• Przetwarzanie PSI w pełnej rozdzielczości</li> </ul>
Norwegia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mapy deformacji LOS i szeregi czasowe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dane Sentinel 1A/B</li> <li>• Przetwarzanie PSI w pełnej rozdzielczości</li> </ul>

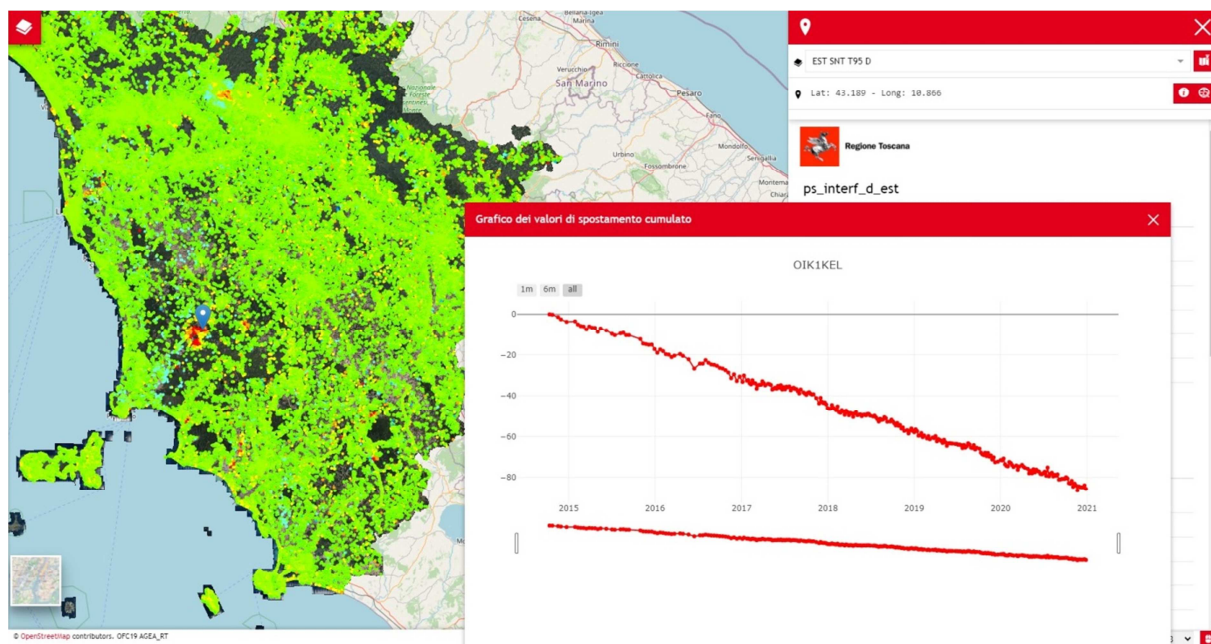
Tabela 2. Charakterystyka krajowych serwisów GMS (Solari 2020) – cz.2

Kraj	Rozpowszechnianie danych	Walidacja
Dania	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pełna i otwarta polityka. Rozpowszechniane przez WebGIS na żądanie</li> <li>• Całe portfolio produktów będzie dostępne do pobrania, w tym szeregi czasowe</li> <li>• Dostępne są wytyczne i zastrzeżenia dotyczące danych</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Poprzez pomiary naziemne i porównanie z danymi pomocniczymi</li> </ul>
Niemcy	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pełna i otwarta polityka. Rozpowszechniane przez WebGIS</li> <li>• Pobieranie danych dla stałego zasięgu i na żądanie dla większych obszarów</li> <li>• Dostępne są wytyczne i zastrzeżenia dotyczące danych</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wspierane przez dane GNSS i oparte na trzech kluczowych pojęciach: szacowanie dokładności na bazie precyzji średniej prędkości, dokładności geokodowania i dokładności średniej</li> </ul>

		<p>prędkości</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Badania pilotażowe przeprowadzone na szczeblu federalnym / krajowym</li> </ul>
Włochy (region Toskanii)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pełna i otwarta polityka dotycząca map deformacji (WebGIS),</li> <li>• Ograniczenia dla bazy danych anomalnych punktów</li> <li>• Użytkownik może pobrać całą mapę deformacji na poziomie regionalnym wraz z wytycznymi dotyczącymi danych</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• W celu walidacji najwyższych wartości deformacji wykonywane są pomiary naziemne, poparte danymi pomocniczymi</li> <li>• Procedura pomiarów zaprojektowana zgodnie z podmiotami regionalnymi</li> </ul>
Holandia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pełna i otwarta polityka</li> <li>• Dane będą rozpowszechniane za pośrednictwem opracowywanej platformy rozpowszechniania</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• GNSS, niwelacja i reflektory radarowe</li> </ul>
Norwegia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pełna i otwarta polityka. Rozpowszechniane przez WebGIS</li> <li>• Użytkownik może pobrać pojedyncze lub uśrednione szeregi czasowe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pomiary naziemne, okresowe pomiary GNSS,</li> <li>• permanentne GNSS kolokowane z reflektorami</li> </ul>

### 3.1 Włochy

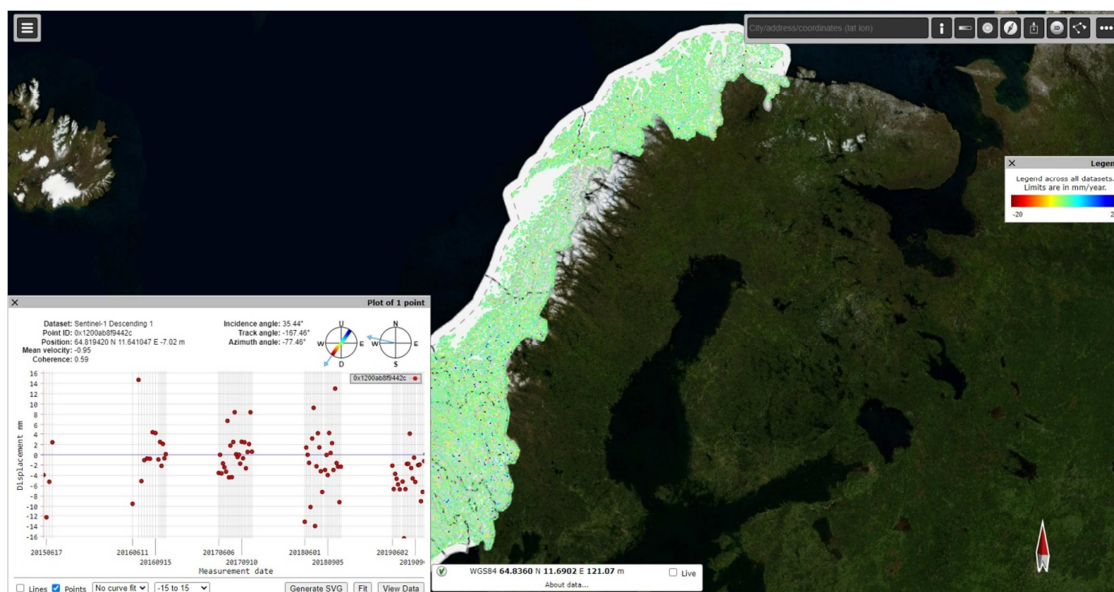
Są pierwszym krajem, w którym powstał jednolity zbiór PS dla całego terytorium. Działania takie podjęto w latach 2008-2012 (Constantini et al. 2017) na bazie archiwalnych danych z satelitów radarowych ERS-1/2, Envisat i Cosmo SKYMED. Zbiór ten obejmuje lata od 1992 r. do dziś. Obecnie we Włoszech prace te są kontynuowane na bazie opracowań regionalnych jak np. serwisy regionów Wenecja czy Toskania (Rys. 10).



Rys. 10. Serwis GMS regiony Toskania

### 3.2 Norwegia

W listopadzie 2018 roku Norweska Służba Geologiczna (NGU), Norweska Dyrekcja ds. Zasobów Wodnych i Energii (NVE) oraz Norweskie Centrum Kosmiczne uruchomiły pierwszą bezpłatną i otwartą ogólnokrajową internetową usługę GMS (Rys. 11). Serwis udostępnia dane InSAR dla całej Norwegii, a instytut badawczy Norut odegrał kluczową rolę w rozwoju technologii. Źródło: <http://www.insar.ngu.no/>

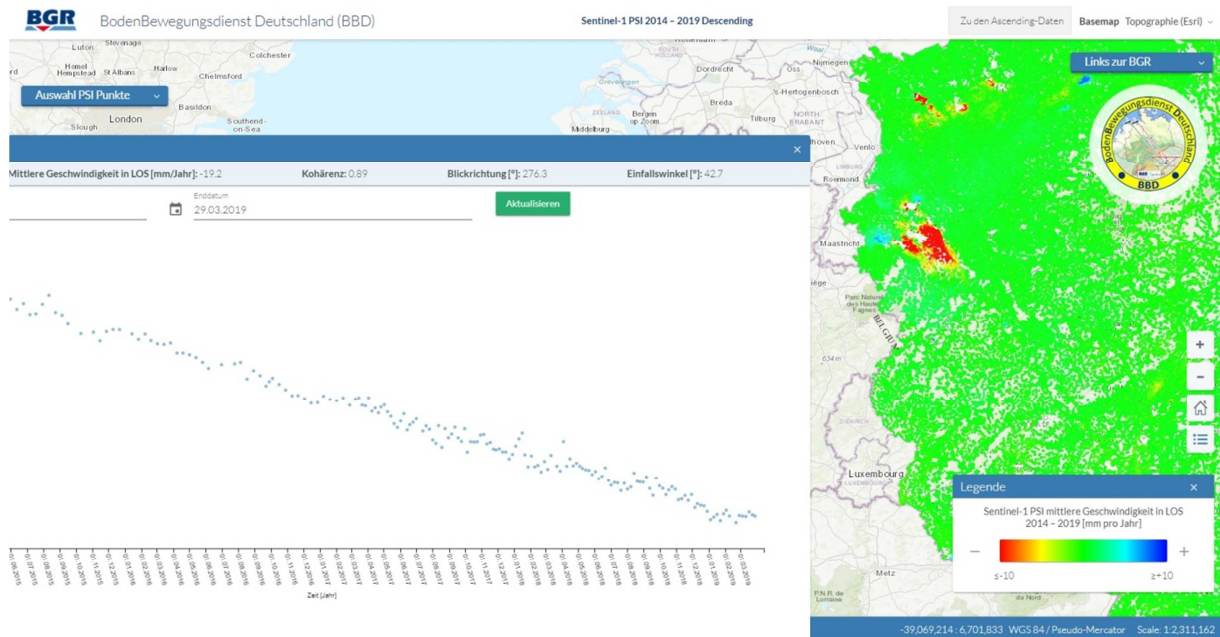


Rys. 11. Okno główne serwisu InSAR Norway

### 3.3 Niemcy

Od 2019 r. działa serwis BodenBewegungsdienst Deutschland (BBD), niemiecki serwis GMS, zarządzany przez niemiecką służbę geologiczną BGR. Podstawowy zbiór danych BodenBewegungsdienst Deutschland oparty jest na ogólnokrajowych danych Sentinel-1, które są przetwarzane przy użyciu metody PSI-WAP - Persistent Scatterer Interferometry Wide-Area Product (Rys.12). Oprócz tego regularnie aktualizowanego zestawu danych, opcjonalnie możliwe są dodatkowe przetworzenia dla wybranych regionów. Są one oparte na danych SAR o wysokiej rozdzielczości z np. TerraSAR-X. Aby zapewnić połączenie danych dotyczących o deformacjach terenu generowanych przez InSAR z innymi niezależnymi zbiorami danych, dane PSI-WAP są kalibrowane z szeregami czasowymi z permanentnych stacji GNSS. Ponadto przeprowadza się kontrole wiarygodności poprzez kontrole terenowe (charakterystyka wstecznego rozpraszania poszczególnych obiektów), optyczne dane teledetekcyjne (Sentinel-2) i inne dane geologiczne (mapy geologiczne).





Rys. 12. Okno główne serwisu BBD

### 3.4 Dania i Holandia

W obu tych krajach tworzone są serwisy GMS jednak nie zostały jeszcze uruchomione. Ich podstawową funkcjonalność przedstawiono w tabelach 1 i 2.

## 4 European Ground Motion Service

Bazując na sukcesie wielu badań demonstracyjnych InSAR, pojawiło się szereg inicjatyw międzynarodowych, których celem było wykonanie opracowań InSAR o wiekoobszarowym charakterze. Najważniejsze spośród nich były to: projekt TerraFirma (2003-2014), PanGeo (2011-2014); włoski Piano Straordinario di telerilevamento Ambientale (2008-2016); a także szereg projektów spin-off powstałych na bazie TerraFirma i PanGeo, w tym SubCoast, EVOSS i DORIS. Wspólnym mianownikiem wszystkich tych inicjatyw było usprawnienie niezależnych działań w ujednoliconą usługę prototypową, aczkolwiek z różnymi odbiorcami docelowymi. Skoncentrowano się zarówno na rozwoju algorytmicznym i operacyjnym, jak i na działaniach walidacyjnych.

Niemniej jednak wiele z tych inicjatyw stało w obliczu poważnych ograniczeń operacyjnych z powodu braku systematycznego źródła obrazów radarowych, utrudnianych przez nieodłączne ograniczenia trybów rejestracji danych. W rezultacie wymagało to kilku lat rejestracji danych SAR, aby uzyskać wiarygodne wyniki InSAR. Oznaczało to, że dane były zwykle przetwarzane tylko raz i nie były regularnie aktualizowane.

Obecnie, dzięki programowi Copernicus, dostępne stały się wszystkie właściwe składniki potrzebne do wprowadzenia i obsługi systemu GMS krajowego jak i o szerszym zasięgu. W ostatnich latach są prowadzone intensywne prace w kierunku wprowadzenia European Ground Motion Service (EGMS).

### 4.1 Kontekst polityczny i koncepcja

European Ground Motion Service (EGMS) jest częścią portfolio produktów Copernicus do monitorowania powierzchni lądów, a jego wdrożenie powierzono Europejskiej Agencji Środowiska (EEA).

EGMS ma na celu dostarczanie spójnych, regularnych, znormalizowanych, zharmonizowanych i wiarygodnych informacji dotyczących naturalnych i antropogenicznych zjawisk ruchu powierzchni terenu w Europie, niezależnie od granic administracyjnych państw, z milimetrową dokładnością. EGMS będzie wspierać polityki na szczeblu zarówno europejskim jak i krajowym.

Głównym celem EGMS jest pomiar przemieszczeń terenu, w tym osuwisk i osiadań, a także deformacji infrastruktury. Przemieszczenia zostaną określone z analiz szeregów czasowych

danych Sentinel-1 programu Copernicus z wykorzystaniem interferometrii radarowej Rozpraszaczy Stabilnych (ang. *Persistent Scatterers*) i Rozproszonych Rozpraszaczy (ang. *Distributed Scatterers*). Dane będą stanowić uzupełnienie globalnych systemów nawigacji satelitarnej (GNSS) i innych obserwacji in situ.

EGMS zapewni również narzędzia do wizualizacji, interaktywnej eksploracji danych i wymiany doświadczeń wykorzystania danych przez użytkowników (protokoły i przykłady najlepszych praktyk) do dalszych badań zmian na powierzchni terenu.

EGMS będzie stanowić uzupełnienie istniejących i powstających inicjatyw krajowych oraz będzie służyć jako podstawa do bardziej szczegółowych krajowych i regionalnych badań. Serwis zapewni szerszy kontekst i zmniejszy koszty dostępu do danych o przemieszczeniach powierzchni terenu.

Kilka państw uczestniczących w programie Copernicus wdrożyło lub jest w trakcie wdrażania krajowych serwisów monitoringu zmian powierzchni terenu. Wszystkie te usługi zarówno skorzystają z EGMS, jak i uzupełnią go, ponieważ będzie on dostarczał podstawową mapę deformacji oraz pomagał w ustanowieniu norm i jak największej standaryzacji danych z krajowych serwisów. Wspomoże wykorzystanie danych dotyczących deformacji zarówno przez użytkowników publicznych, jak i komercyjnych dostawców usług niższego szczebla.

<https://land.copernicus.eu/user-corner/technical-library/european-ground-motion-service>

## **4.2 EGMS White Paper**

Proces definiowania EGMS rozpoczął się w listopadzie 2016 r. W 2016 i 2017 r. odbyły się trzy spotkania grupy zadaniowej (*Task Force*) na szczeblu europejskim. Uczestnicy reprezentowali 13 państw uczestniczących w programie Copernicus. Celem tych spotkań było omówienie i konsolidacja potrzeb użytkowników oraz określenie kluczowych założeń specyfikacji. Prace grupy zadaniowej doprowadziły do powstania White Paper, który stanowi założenia serwisu EGMS.

Kilka państw uczestniczących w programie Copernicus wdrożyło lub jest w trakcie wdrażania krajowych serwisów informujących o powierzchniowych ruchach terenu, np. Niemcy,

Włochy, Norwegia, Holandia i Dania. Wszystkie te usługi będą korzystać z i uzupełniać EGMS.

**Korzyści:**

o EGMS może dostarczyć podstawową mapę deformacji i doprowadzić do ustanowienia norm i jak największej standaryzacji krajowych komponentów usług.

o EGMS może wspierać wykorzystanie danych dotyczących deformacji zarówno przez użytkowników publicznych, jak i komercyjnych dostawców usług niższego szczebla.

**Uzupełnianie:**

o Mimo że koncepcje krajowe są dostosowane i zaprojektowane z myślą o konkretnych krajowych potrzebach użytkowników końcowych, wspólne dla wszystkich będą prawdopodobnie częstsze aktualizacje danych niż w przypadku EGMS, które będą aktualizowane co roku.

Bezpośrednimi użytkownikami EGMS są:

- Służby geologiczne i geodezyjne
- Władze publiczne na poziomie europejskim, krajowym, regionalnym i gminnym
- Uniwersytety

Główne grupy użytkowników korzystające z usług końcowych EGMS:

- Służby geologiczne i geodezyjne
- Administracje drogowe, kolejowe i górnicze
- Planowanie przestrzenne
- Władze publiczne na poziomie europejskim, krajowym, regionalnym i gminnym
- Państwa uczestniczące w programie Copernicus
- Przemysł (zarządzanie infrastrukturą, inżynieria, ropa i gaz, ubezpieczenia,...)
- Uniwersytety

### 4.3 Status i kolejne kroki

Orientacyjny harmonogram wdrożenia EGMS przez EEA przewiduje rozpoczęcie produkcji około połowy 2020 r.

ID	Main Service Components	2019				2020				2021			
		Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
1	Service definition												
2	Auxiliary data survey												
3	Supporting services												
4	Production												
5	Validation												

Rys.13. Orientacyjny harmonogram wdrożenia EGMS (źródło: <https://land.copernicus.eu/user-corner/technical-library/european-ground-motion-service>)

**Service definition - Definicja usługi.** Przygotowanie zestawu dokumentów, które szczegółowo i zbiorczo opiszą *Copernicus European Ground Motion Service* i będą stanowić podstawę fazy produkcyjnej, tj. specyfikacja produktu i plan wdrożenia usługi. Prace rozpoczęły się w połowie czerwca 2019 r.

**Auxiliary data survey - Badanie danych pomocniczych.** Szczegółowa analiza niezbędnych danych in situ potrzebnych do produkcji i walidacji produktów EGMS. Prace rozpoczęły się w lutym 2019 r.

**Supporting services - Usługi wspierające.** Usługi pomocnicze dla serwisu EGMS, tj. wewnętrzny konsultant i Rada Doradcza (*Advisory Board*). Prace rozpoczęły się w drugiej połowie 2019 r.

**Production - Produkcja.** Przetworzenie danych i dostarczenie informacji o szeregach czasowych ruchu powierzchni terenu z pełną rozdzielczością przestrzenną i czasową na obszarach lądowych państw uczestniczących w programie Copernicus. Narzędzia do wizualizacji i interaktywnej eksploracji danych (otwarte zaproszenie do składania ofert).

**Validation - Walidacja.** Niezależna walidacja (dopasowana do celu) otrzymanych produktów (otwarte zaproszenie do składania ofert).

#### 4.4 Definicja serwisu

EGMS dostarczy informacje o szeregach czasowych ruchu powierzchni terenu z pełną rozdzielczością przestrzenną i czasową obrazów Sentinel-1 na podstawie analizy interferometrycznej PS i DS.

##### Obszar

Obszar usług powinien obejmować obszary lądowe państw uczestniczących w programie Copernicus.

##### Częstotliwość aktualizacji produktu

Produkty oferowane przez usługę będą aktualizowane co 12 miesięcy. Aktualizacje powinny być generowane przyrostowo, tj. przetwarzając nowo pozyskane obrazy, a nie cały zestaw danych od zera. Na późniejszym etapie, gdy będzie dostępna wystarczająca ilość danych, dane powinny być przetwarzane i archiwizowane w epokach np. pięcioletnich w celu monitorowania czasowych zmian trendów deformacji.

### **Rozdzielczość przestrzenna**

Przetwarzanie InSAR szeregów czasowych w EGMS będzie opierać się na wykorzystaniu produktów Single Look Complex Sentinel-1 tryb IW o rozdzielczości 5 x 20 metrów.

W przetwarzaniu nie wszystkie piksele dają w wyniku punkty pomiarowe do detekcji ruchu terenu. Algorytmy InSAR wykorzystują analizę tzw. „rozpraszaczy szans” (ang. *scatterers of opportunity*), co oznacza, że dane deformacji będą dostępne tylko tam, gdzie są dobre rozpraszacze fali radarowej. Gęstość przestrzenna wiarygodnych pomiarów ruchu terenu zależy od charakterystyki pokrycia terenu danego obszaru, przy czym więcej informacji znajduje się na obszarach miejskich, a mniej na terenach roślinnych. Oczekiwana gęstość punktów pomiarowych mieści się w przedziale tysięcy na kilometr kwadratowy dla obszarów miejskich i do setek na kilometr kwadratowy dla obszarów pozamiejskich. Zatem dokładna rozdzielczość przestrzenna dla produktu końcowego będzie zależać od lokalizacji, trybu akwizycji Sentinel i typu rozpraszacza (trwały i rozproszony, ang. Persistent and Distributed). Pełna rozdzielczość przestrzenna oznacza, że końcowa gęstość punktów nie jest w żaden sposób zmniejszana ani próbkowana.

### **Rozdzielczość czasowa**

Na terenie Europy aktualny plan operacyjny wysokiego poziomu Sentinel (ang. High-Level Operations Plan, HLOP) zapewnia spójne pozyskanie scen każdej geometrii obserwacji co 6 dni w trybie IW. EGMS zapewni szeregi czasowe punktów terenu wykorzystujące wszystkie wiarygodne próbki. Na obszarach miejskich zwykle można wykorzystać wszystkie dane. Na naturalnym terenie wpływ roślinności i pogody (pokrywa śnieżna, duża wilgotność), może ograniczyć liczbę użytecznych próbek danych.

### **Metodologia**

Głównym źródłem informacji do pozyskiwania danych o ruchu terenu są dane radarowe syntetycznej apertury (ang. *Synthetic Aperture Radar*, SAR) z misji Copernicus Sentinel-1. Ta misja zapewnia pełne pokrycie Europy z dwóch różnych geometrii obserwacyjnych

(wschodzącej/schodzącej, ang. ascending/descending) co sześć dni. Na podstawie tych danych ruch powierzchni terenu jest uzyskiwany przy użyciu zaawansowanych analiz szeregów czasowych InSAR (PS / DS). Istnieje wiele różnych koncepcji przetwarzania InSAR, a wspólny dla wszystkich jest produkt końcowy składający się z zestawu szeregów czasowych ruchu terenu ważnych dla określonych punktów lub pikseli, z odpowiednią miarą jakości.

Aby zapewnić płynną i spójną mapę bazową ruchu terenu na terenie Europy, metoda przetwarzania w EGMS zostanie znormalizowana, z wykorzystaniem konfiguracji najnowocześniejszych algorytmów. Produkty końcowe i pośrednie dane pomocnicze zostaną udostępnione, aby umożliwić dalszą analizę lokalnych zjawisk deformacji przez użytkowników.

## **4.5 Produkty**

W EGMS głównymi produktami będą:

### **(Level 1) - (Poziom 1)**

o Dane Copernicus Sentinel-1 Single Look Complex. Są to tylko dane wejściowe, a nie produkt EGMS.

### **Level 2a - Poziom 2a (produkt pośredni)**

o Podstawowe informacje o przemieszczeniu w punktach pomiarowych podane w kierunku obrazowania satelity (ang. line-of-sight , LOS), ze współrzędnymi kartograficznymi i miarami jakości podanymi we współrzędnych radarowych.

o Produkt zostanie dostarczony dla pojedynczych i spójnych ramek (tj. tej samej względnej orbity) zestawów obrazu.

o W przetwarzaniu i analizie danych będą zastosowane najlepsze znane praktyki i najnowocześniejsze algorytmy.

### **Level 2b - Poziom 2b**

- o Produkty poziomu 2a zintegrowane i zmozaikowane w znormalizowanym układzie odniesienia z wykorzystaniem informacji zewnętrznych, takich jak pomiary sieci GNSS.
- o Do integracji produktów i mozaikowania zostaną wykorzystane najlepsze praktyki geodezyjne.
- o Sieć EUREF zostanie zastosowana do georeferencji.

### **Level 3 - Poziom 3**

- o Prędkości ruchu terenu w kierunku wschód-zachód i góra-dół powstałe przez połączenie danych poziomu 2b pochodzących z orbit wschodzących i schodzących..
- o Poziom szczegółowości produktu poziomu 3, tj. rozmiar siatki próbkowania, zależy od obszaru zainteresowania i otrzymanego sygnału deformacji.

Różne produkty są zdefiniowane tak, aby spełniały różne wymagania użytkowników: produkt poziomu 2a umożliwi wcześniejszą dystrybucję do użytkowników zaawansowanych, takich jak środowisko akademickie, wyspecjalizowane zespoły badawcze InSAR i firmy inżynieryjne. Produkty poziomu 2b i poziomu 3 zawierają więcej informacji, a zatem są odpowiednie dla dalszych odbiorców, takich jak obywatele i zainteresowane strony zaangażowane w tworzenie map i zarządzanie ryzykiem. Obejmuje to ocenę zagrożenia geologicznego, geodezję i zarządzanie gruntami, planowanie urbanistyczne i wiejskie, ochronę dziedzictwa kulturowego, usługi klimatyczne, rozwój infrastruktury, wydobywanie i zarządzanie zasobami naturalnymi, monitorowanie zapór i wód podziemnych, ubezpieczenia i spory sądowe, inżynierię budowlaną i inżynierię lądową, rynek nieruchomości i transport. Do użytkowników należą służby geologiczne, administracja drogowa, kolejowa i górnicza, organy regulacyjne i planistyczne, władze publiczne na poziomie europejskim, krajowym, regionalnym i gminnym, obywatele państw uczestniczących w programie Copernicus, MŚP i przemysł.



## **Opis produktu**

### **Poziom 2a:**

InSAR to technika, która określa komponent ruchu wzdłuż wektora równoległego do wektora linii obrazowania satelita-ziemia (ang. line of sight , LOS), względem wybranego (zakładanego stabilnego) punktu odniesienia. Dane poziomu 2a należy postrzegać jako produkt pośredni, niezbędny do wytworzenia produktów poziomu 2b i 3. Niemniej jednak w przypadku niektórych interpretacji ten produkt może być wystarczający.

### **Poziom 2b:**

Jest to główny produkt EGMS. Obliczając przemieszczenia między lokalnymi punktami odniesienia a siecią geodezyjną EUREF, produkty poziomu 2a mogą być ponownie przeliczone i finalnie zawierać informację o przemieszczeniach względem sieci geodezyjnej (a nie względem wybranych punktów referencyjnych). Produkt poziomu 2b będzie spójny, tj. zmozaikowany dla terenu Europy.

Odbywa się to przy założeniu, że zidentyfikowany ruch jest głównie pionowy. Aby umożliwić użytkownikom konwersję produktu do prawdziwego kierunku LOS, dostarczone zostaną dodatkowe informacje.

Należy pamiętać, że uzyskanie bezszwowych (zmozaikowanych) produktów będzie w niektórych szczególnych przypadkach utrudnione (np. na obszarach deformacji o znaczącym składniku poziomym). Produkty zmozaikowane z lokalnym rozbiciem na wektory ruchu góra-dół i wschód-zachód np. regiony o znacznych ruchach poziomych będą dostępne jako produkty poziomu 3 (patrz poniżej).

W procesie harmonizacji ok. 350 stacji EPN (stałej sieci EUREF) można będzie uzupełnić sieciami krajowymi, np. powstałymi w ramach zagęszczania EPN. Odniesienie do sieci EUREF umożliwi porównanie wyników z tradycyjnymi pomiarami geodezyjnymi. Zharmonizowany i jednorodny ogólnounijny produkt będzie zawierał informację o regionalnych ruchach tektonicznych i polodowcowym ruchu izostatycznym. Korekta i kompensacja za pośrednictwem sieci stacji naziemnych GNSS będą częścią łańcucha produkcyjnego, aby zmniejszyć lub wyeliminować wpływ ruchów na dużą skalę i podkreślić ruchy lokalne i autonomiczne.

**Poziom 3:**

Każdy punkt na powierzchni Europy jest regularnie obrazowany zarówno z orbity wschodzącej (w kierunku północy), jak i schodzącej (w kierunku południa). Ponieważ kierunek obrazowania satelity Sentinel-1 jest skierowany w bok, w rezultacie prędkość każdego punktu można zmierzyć wzdłuż dwóch różnych linii obrazowania, jednej skierowanej na wschód, a drugiej na zachód. Te dwa komponenty wektorowe LOS można wykorzystać do obliczenia części składowych ruchu: wschód-zachód i góra-dół. Są to produkty poziomu 3. Należy zauważyć, że ze względu na różnice w topografii nie zawsze można uzyskać pomiary zarówno w geometrii wschodzącej, jak i schodzącej dla każdego punktu. Ponieważ poszczególne pomiary w wejściowych zestawach danych niekoniecznie reprezentują ten sam punkt na ziemi, wejściowe zestawy danych mogą wymagać uśrednienia przestrzennego w celu uzyskania wiarygodnych wyników. W rezultacie produkty poziomu 3 mogą mieć niższą rozdzielczość przestrzenną i mogą nie być dostępne we wszystkich lokalizacjach, w których dostępne są produkty poziomu 2. Produkty poziomu 3 będą bardzo przydatne dla użytkowników, którzy uznają je za łatwiejsze do interpretacji niż pomiary w kierunku LOS. Będą również bardzo przydatne do podkreślania deformacji poziomych.

## **5 Wnioski**

W ramach projektu, pierwotnie zamierzano przeprowadzać cyklicznie przetwarzanie danych Sentinel -1A/B dla obszaru całej Polski. W międzyczasie prace nad projektem EGMES znacznie przyspieszyły i realna stała się jego realizacja. W związku z tym faktem odstąpiono od realizacji pełnego przetwarzania danych od podstaw. Możliwość taka pozostanie jedynie dla wytypowanych obszarów specjalnego znaczenia. W drugim etapie prace skupiać się będą również na walidacji i udostępnianiu danych dla terenu Polski.

Z przeprowadzonych analiz istniejących serwisów wydaje się, że udostępnianie pełnych zbiorów punktów wraz z seriami czasowymi dla każdego z punktów PS może wprowadzać w błąd niedoświadczonych użytkowników. Co więcej, dane te, bez odpowiedniego komentarza może nieść za sobą trudne do wyobrażenia skutki dla chociażby rynku nieruchomości czy ubezpieczeń. Należy zatem opracować produkt bardziej zrozumiały dla przeciętnego odbiorcy danych kartograficznych. Dla celów regionalnych, optymalnym wydaje się być, dla skali całego kraju rastrowa mapa o siatce np. 100m przedstawiająca wyinterpolowany obraz deformacji.

## 6 Literatura

- Bamler, R., Hartl, P., 1998. Synthetic aperture radar interferometry. *Inverse Probl.* 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 Trans. Geosci. Remote Sens.* 40, 2375–2383.
- Bürgmann, R., Rosen, P.A., Fielding, E.J., 2000. Synthetic Aperture Radar interferometry to measure Earth's surface topography and its deformation. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 28, 169–209.
- Cattabeni, M., Monti-Guarnieri, A., Rocca, F., 1994. Estimation and Improvement of Coherence in SAR Interferograms. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1994. IGARSS '94*, 720–722.
- Costantini, M., Ferretti, A., Minati, F., Falco, S., Trillo, F., Colombo, D., Novali, F., Malvarosa, F., Rucci, A., Fumagalli, A., Allievi, J., Ciminelli, M., Costabile, S. 2017. Analysis of surface deformations over the whole Italian territory by interferometric processing of ERS, Envisat and COSMO-SkyMed radar data. *Remote Sensing of Environment* 202 (2017) 250–275
- Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F., 1999. Permanent Scatterers in SAR Interferometry. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1999. IGARSS '99*, 1–3.
- Franceschetti, G., Iodice, A., Ricco, D., 2002. A canonical problem in electromagnetic backscattering from buildings. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 40, 1787-1801.
- Goldstein, R.M., Zebker, H.A., Werner, C.L., 1988. Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping. *Radio Sci.* 23, 713–720.
- Hanssen, R.F., 2005. *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*, 2nd ed. Springer Verlag, Heidelberg.
- Hartl, P., Reich, M., Thiel, K.-H., Xia, Y., 1993. SAR interferometry applying ERS-1: some preliminary test results, in: *ESA SP-359*. 219–222.
- Henderson, F.M., Lewis, A.J., 1998. *Principles and applications of imaging radar. Manual of remote sensing*, 3rd edn, vol 2. John Wiley, New York
- 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. <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. *Geophys. Res. Lett.* 31, L23611, doi:10.1029/2004GL021737.

- Inglada J., Souyris J-C., Henry C., 2004. ASAR multi-polarization images phase difference: assessment in the framework of persistent scatterer interferometry. Proceedings of the ENVISAT & ERS Symposium, 6-10 September 2004, Salzburg (Austria).
- Ketelaar, G., 2008. Monitoring surface deformation induced by hydrocarbon production using satellite radar interferometry. Delft Institute of Earth Observation and Space Systems, 2008. 256.
- Marinkovic, P., Ketelaar, G., van Leijen, F., Hanssen, R., 2007. InSAR quality control: Analysis of five years of corner reflector time series. Proceedings of Fringe 2007 Workshop (ESA SP-649), Frascati, Italy, 26-30.
- Massonnet, D., Feigl, K.L., 1998. Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface. *Rev. Geophys.* 36, 441–500.
- Perissin, D., 2006. SAR super-resolution and characterization of urban targets. Ph.D.thesis, Politecnico di Milano, Italy.
- Perski, Z., 1999. Osiedlenia terenu GZW pod wpływem eksploatacji podziemnej określane za pomocą satelitarnej interferometrii radarowej (InSAR). *Przegląd Geol.* 2, 171–174.
- Perski, Z., Przyłucka M., Jania D., 2020. Interferometryczny Monitoring Terenu Polski etap I. Zakres możliwości wykorzystania map koherencji do detekcji nielegalnej eksploatacji. RAPORT TECHNICZNY. Niepublikowane
- Perski, Z., Ketelaar, G., Mróz, M., 2006. Interpretacja danych ENVISAT/ASAR o przemiennej polaryzacji na obszarach zurbanizowanych w kontekście charakterystyki stabilnych rozpraszaczy (Persistent Scatterers). *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji* 16, 467 – 482.
- Prati, C., Rocca, F., Monti Guarnieri, A., 1993. SAR interferometry experiments with ERS-1, in: ESA SP-359. pp. 991–993.
- Solari, L., Crosetto, M., Balasis-Levinsen, J., Casagli, N., 2020. The European Ground Motion Service: a continental scale map of ground deformation. EGU2020 Presentation. <https://www.researchgate.net/publication/341407898>
- Zebker, H.A., Villasenor, J., 1992. Decorrelation in interferometric radar echoes. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 30, 950–959.