



Państwowy Instytut Geologiczny
Państwowy Instytut Badawczy

Państwowa służba geologiczna
Państwowa służba hydrogeologiczna

Monitoring osiadania powierzchni terenu w 3 wybranych lokalizacjach poszukiwań gazu w formacjach łupkowych – projekt pilotażowy”

Opracowanie naukowo-badawcze

Główny autor

Kierownik projektu

.....
dr Zbigniew Perski

.....
dr Zbigniew Perski



Sfinansowano ze środków
Narodowego Funduszu
Ochrony Środowiska
i Gospodarki Wodnej

Szczegóły dokumentu:

Numer podzadania	Dokument podstawowy
Autorzy	<p>Zbigniew Perski – opracowanie i redakcja</p> <p>Autorzy materiałów podstawowych: Zbigniew Perski Bartłomiej Warmuz Izabela Laskowicz Marcin Wódka Tomasz Malata Teresa Mrozek Michał Krawczyk Katarzyna Chowaniec – Tobiasz Andrzej Michalski</p> <p>Współpraca: Petar Marinkovic (PPO.labs) Paweł Wielgosz (UWM) Radosław Baryła (UWM) Katarzyna Stępnia (UWM) Jacek Paziewski (UWM) Marta Krukowska (UWM)</p> <p>Zespół terenowy (PIG-PIB): Katarzyna Chowaniec – Tobiasz, Jacek Dacka, Jerzy Frydel, Leszek Jurys, Sylwester Kamieniarz, Michał Krawczyk, Zbigniew Kowalski, Piotr Nescieruk, Zbigniew Perski, Maria Przyłucka, Marta Tomaszczyk, Tomasz Wojciechowski, Marcin Wódka</p> <p>Zespół terenowy (UWM): Radosław Baryła, Paweł Gołaszewski, Marta Krukowska, Jacek Paziewski, Paweł Przestrzelski, Katarzyna Stępnia, Tomasz Szarafin, Paweł Wielgosz</p> <p>Niwelacja precyzyjna (UWM): Radosław Baryła, Michał Birkholz, Adam Czyżewski, Radosław Dziańok, Aleksander Jurczyk, Karolina Lewandowska, Adrian Kochanowski, Tomasz Michalski, Łukasz Mokrzycki, Łukasz Witwicki, Kacper Wojtkiewicz, Grzegorz Zdanio</p>
Uwagi	<p>Opracowanie sporządzono w lutym 2017 r. Aktualizacje: lipiec 2017 r., luty 2018 r.</p>

Spis treści

1	Wstęp.....	5
2	Cele i założenia projektu	5
3	Szczelinowanie i eksploatacja gazu oraz ich wpływ na powierzchnię terenu	6
3.1	Technologie udostępniania złóż gazu w łupkach	6
3.2	Spodziewane deformacje i ich modele	7
3.2.1	Podnoszenie powierzchni terenu	8
3.2.2	Obniżanie powierzchni terenu (osiadanie).....	11
4	Metody pomiaru deformacji.....	12
4.1	Niwelacja precyzyjna	14
4.2	Pomiary GNSS	14
4.3	Interferometria	14
4.3.1	CRInSAR - Satelitarna Interferometria z wykorzystaniem reflektorów radarowych	17
5	Poligony badawcze.....	24
5.1	Kryteria i wybór poligonów badawczych.....	24
5.2	Lokalizacja, budowa geologiczna i infrastruktura pomiarowa.....	24
5.2.1	Poligon Lewino – lokalizacja i budowa geologiczna.....	25
5.2.2	Poligon Berejów – lokalizacja i budowa geologiczna	26
5.2.3	Poligon Babiak – lokalizacja i budowa geologiczna.....	27
5.2.4	Infrastruktura pomiarowa	28
6	Dane pomiarowe - przetwarzanie i analiza	33
6.1	Dane satelitarne SAR.....	33
6.1.1	Dane archiwalne ERS-1, ERS-2 i Envisat.....	33
6.1.2	Dane TerraSAR-X.....	34
6.1.3	Dane TerraSAR-X rejestrowane w trybie polaryzacji alternatywnej.....	35
6.1.4	Dane Sentinel-1	36
6.2	Kampanie pomiarowe w terenie	37
6.3	Przetwarzanie danych satelitarnych metodą InSAR.....	39
6.3.1	Przetwarzanie archiwalnych danych z satelitów ERS-1/2	39
6.3.2	Przetwarzanie archiwalnych danych z satelity Envisat.....	42
6.3.3	Przetwarzanie danych z satelity TerraSAR-X.....	44
6.3.4	Przetwarzanie danych z satelity TerraSAR-X metodą CRInSAR.....	46
6.3.5	Analiza danych polarymetrycznych TerraSAR-X	48
6.3.6	Przetwarzanie danych z satelity Sentinel-1	50
6.3.7	Przetwarzanie danych z satelity Sentinel-1 metodą CRInSAR.....	51
6.4	Przetwarzanie danych GNSS	53

6.4.1	Nawiązanie do sieci ASG-EUPOS.....	53
6.4.2	Wyznaczenie współrzędnych reflektorów	54
6.5	Analiza wyników dla reflektorów	55
7	Podsumowanie i wnioski.....	59
8	Literatura	62

1 Wstęp

W latach 2002 – 2012 na całym świecie nastąpił gwałtowny wzrost zainteresowania firm naftowych poszukiwaniem i eksploatacją gazu z łupków. Rozwój nowych technologii, w tym wierceń kierunkowych i wielokrotnych zabiegów szczelinowania hydraulicznego sprawił, że eksploatacja złóż niekonwencjonalnych stała się ekonomicznie uzasadniona. W Polsce nastąpił wówczas gwałtowny wzrost zainteresowania poszukiwaniami gazu w formacjach łupkowych. Zainteresowaniu temu, oprócz inwestycji w prace poszukiwawcze i nowe koncesje, towarzyszyło zwiększone zainteresowanie mediów. Pracom tym towarzyszyła również negatywna kampania zmierzająca do uwydatnienia rzeczywistych jak i wymaganych negatywnych wpływów potencjalnej eksploatacji na środowisko. Towarzyszyły jej protesty lokalnych społeczności oraz burzliwe debaty społeczne. PIG-PIB podjął wówczas temat badań zagrożeń środowiska związanych tak z pracami poszukiwawczymi, jak i przyszłą eksploatacją (Koniecznyńska et. al., 2011). W ramach tych prac badano szczegółowo skażenie gleby, wód podziemnych, powietrza, a także emisje hałasu i wibracje. Odrębnym zagadnieniem były potencjalne deformacje powierzchni terenu, które w większym bądź mniejszym stopniu towarzyszą każdej działalności podziemnej człowieka. Zagadnieniu deformacji, które mogą towarzyszyć szczelinowaniu jak i późniejszej eksploatacji poświęcono odrębne zadanie badawcze p.t. *„Monitoring osiadania powierzchni terenu w trzech wybranych lokalizacjach poszukiwań gazu łupkowego – projekt pilotażowy”*, który był realizowany przez PIG-PIB w latach 2013 – 2017. Opracowanie niniejsze stanowi podsumowanie przeprowadzonych badań.

2 Cele i założenia projektu

Celem tematu *„Monitoring osiadania powierzchni terenu w trzech wybranych lokalizacjach poszukiwań gazu łupkowego”* było wyznaczenie wartości osiadania powierzchni terenu na obszarach objętych poszukiwaniami złóż gazu łupkowego.

Monitorowanie osiadania powierzchni terenu w trakcie poszukiwań gazu łupkowego miało polegać na ciągłym pomiarze powierzchni terenu z zastosowaniem zaawansowanych metod pomiarowych: satelitarna interferometria radarowa InSAR oraz satelitarne pomiary GNSS.

Uzasadnieniem dla podjęcia tematu było Prawo geologiczne i górnicze. Według ustawy z 9 czerwca 2011 roku (Prawo geologiczne i górnicze) obszary na których prowadzona jest eksploatacja surowców mineralnych i energetycznych (węgla kamiennego i brunatnego, ropy naftowej i gazu ziemnego) stanowią tereny górnicze, definiowane jako przestrzeń objęta przewidywanymi szkodliwymi wpływami robót górniczych zakładu górniczego. W związku z tym obszary na których obecnie prowadzone są poszukiwania, a w przyszłości planuje się wydobycie gazu łupkowego, uznaje się za tereny górnicze i obejmuje wymogiem dokumentowania niekorzystnych zmian zachodzących w górotworze i na powierzchni terenu.

Zadania te leżą w zakresie obowiązków zakładu górniczego, niemniej jednak niezależne źródła danych w zakresie pomiarów deformacji stanowią podstawowy materiał dla celów sprawdzających.

Drugim bardzo poważnym argumentem dla podjęcia projektu były względy społeczne. W latach 2011 – 2013 trwała ożywiona debata społeczna stymulowana przez środowiska i organizacje „ekologów”, nierzadko jawnie bądź skrycie wspierane przez lobby przeciwników rozwoju przemysłu wydobywania gazu z formacji łupkowych w Polsce. W tym kontekście zdobyta w wyniku realizacji tematu wiedza o deformacjach powierzchni terenu bądź ich braku, poparta danymi liczbowymi jak i transparentną metodyką stanowiła niezmiernie ważny argument debaty społecznej oraz istotne uzupełnienie oceny zagrożeń dla środowiska związanych z eksploatacją gazu łupkowego.

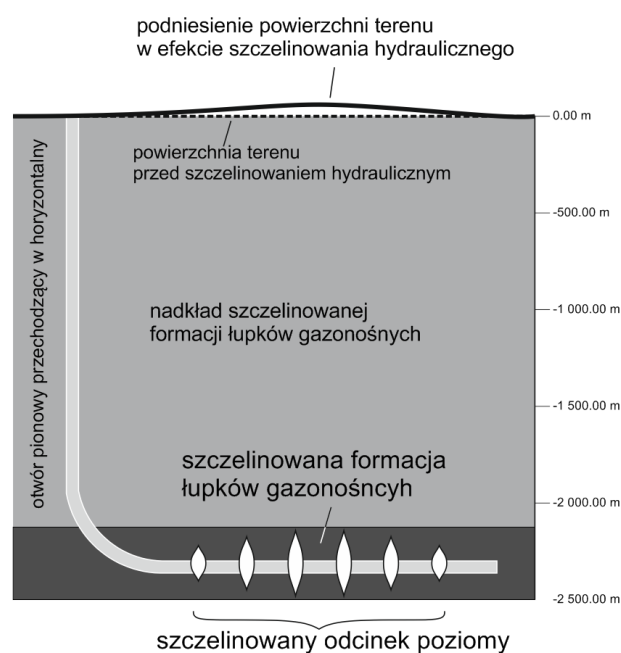
3 Szczelinowanie i eksploatacja gazu oraz ich wpływ na powierzchnię terenu

3.1 Technologie udostępniania złóż gazu w łupkach

W przypadku złóż gazu łupkowego, dla ich udostępniania stosuje się kombinację odwiertów pionowych i poziomych. Zabiegi szczelinowania hydraulicznego intensyfikujące przepływ gazu ze złoża są wykonywane zazwyczaj w odcinkach horyzontalnych otworów (Stopa i in., 2007).

Szczelinowanie hydrauliczne (*hydraulic fracturing*) jest najpowszechniejszym zabiegiem stymulującym złożę i intensyfikującym przepływ gazu uwięzionego w skale o zwykle ekstremalnie niskiej przepuszczalności. Obecnie prowadzony jest szereg badań dotyczących odpowiedzi formacji skalnej na zabieg szczelinowania hydraulicznego (Nagel et al., 2013; Yu

et al., 2014). Obecność w skale łupkowej naturalnej laminacji a także nieciągłości i uskoków warunkuje pomyślność zabiegu szczelinowania hydraulicznego. Aby wskutek iniekcji cieczy szczelinującej do otworu horyzontalnego mogły powstać szczeliny sztuczne i ulec otwarciu szczeliny naturalne, ciśnienie szczelinowania musi przewyższać wypadkową naprężeń panujących w skale powiększoną o maksymalną wartość sił spistości. Kiedy ciśnienie w istniejących szczelinach wzrasta, materiał na krawędziach tych szczelin ulega rozdzieleniu, a szczeliny te zaczynają propagować (rys. 1).



Rys. 1. Schemat szczelinowania formacji łupków gazonośnych

3.2 Spodziewane deformacje i ich modele

Proces wyrównawczy, będący naturalną reakcją górotworu, jest funkcją czasu, a jego wynikiem jest powstanie zmian na powierzchni terenu. Przyjmuje się, że eksploatacja gazu ziemnego, również gazu z formacji łupkowych, będzie skutkować wystąpieniem na powierzchni terenu wyłącznie przemieszczeń pionowych, co wynika z faktu, że rozciągłość złóż gazu łupkowego jest znacznie większa od ich miąższości.

W trakcie realizacji tematu obserwowane miały być 2 rodzaje powstających deformacji (osiadań) powierzchni terenu:

1) podnoszenie powierzchni terenu związane wtłaczaniem do górotworu określonej objętości cieczy szczelinującej,

2) osiadanie powierzchni terenu związane z wypływem (początkowo) płynu zwrotnego a następnie gazu do otworu; odpływ gazu z formacji łupkowej może spowodować zmniejszenie objętości formacji łupkowej (zjawisko kompaktacji).

3.2.1 Podnoszenie powierzchni terenu

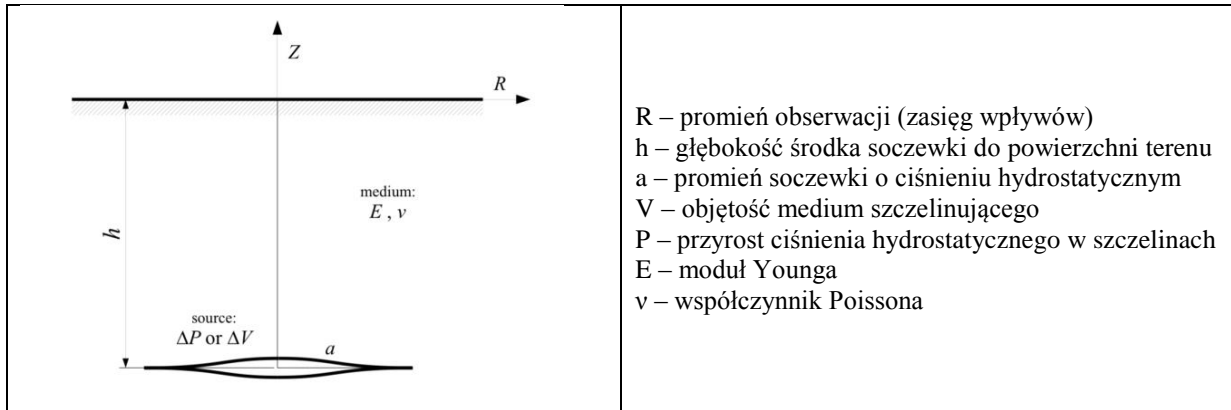
Podnoszenie powierzchni terenu może pojawić się w początkowej fazie, tj. na etapie prac przygotowawczych złoża gazu do eksploatacji. Aby udrożnić i zagęścić system naturalnych szczelin stosuje się zabieg szczelinowania. Polega on na wtłaczaniu odpowiedniego roztworu szczelinującego a następnie medium podsadzkowego aby szczeliny nie uległy zaciśnięciu po spadku ciśnienia, który nastąpi w związku z wypompowaniem cieczy szczelinującej (Kasza, 2011).

Istnieje bogata literatura dotycząca modelowania powstawania i propagacji samych szczelin (np. Chen, 2012; Zienkiewicz, 1977; Choi, Dahl, 1981). Modelowanie deformacji górotworu związane z propagacją szczelin wykonuje się w oparciu o bardzo szczegółowe, lokalne dane geologiczne i geofizyczne, wykorzystując złożone metody elementów skończonych (MES). Dla szacowania spodziewanych deformacji w przypadku braku szczegółowych danych można posłużyć się znacznie prostszymi modelami. Jednym z najprostszych a jednocześnie bardzo skutecznym jest model powiększającego się źródła punktowego w półprzestrzeni sprężystej (Mogi, 1958) zwany modelem Mogi (Mogi-Yamakawa). Stosowany jest do modelowania i szacowania przyrostów objętości magmy w komorach magmowych w oparciu o wielkości deformacji powierzchni terenu.

Adaptacją modelu Mogi dla potrzeb szczelinowania hydraulicznego jest model Suna (Sun, 1969). Zakłada on rozwój nie sfery a soczewki w półprzestrzeni sprężystej. Model Suna został opracowany przy okazji badania wpływu szczelinowania w otworze pionowym na potrzeby składowania odpadów radioaktywnych. Badania przeprowadzone zostały w 1965 r. przez *Oak Ridge National Laboratory, Tennessee, USA*.

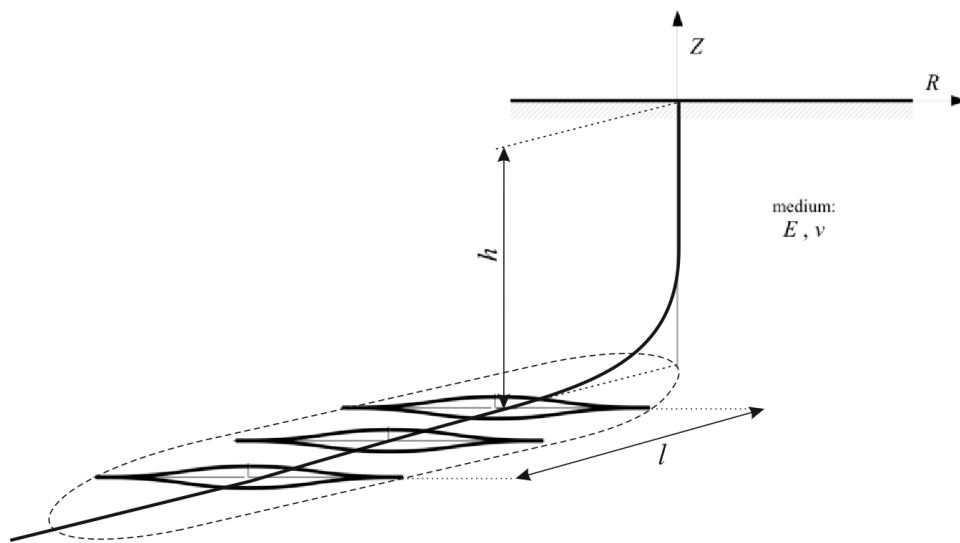
W prognozowaniu zjawiska podnoszenia powierzchni terenu w oparciu o model Sun'a zakłada się, że górotwór jest ośrodkiem izotropowym i jednorodnym o liniowym rozkładzie zależności naprężenie – odkształcenie. W ośrodku takim powstawać będą szczeliny o różnym przebiegu, zależnym od orientacji najmniejszych naprężeń ściskających. Gęstość i rozwarcie szczelin będą zmniejszać się w miarę oddalania się od otworu. W modelu Suna model soczewki odpowiada zatem nie powstawaniu pojedynczej szczeliny a aproksymuje strefę, w której powstaje zespół szczelin wokół otworu i gdzie następuje wzrost objętości warstwy

łupkowej wywołany szczelinowaniem. Spłaszczenie soczewki w kierunku pionowym odpowiada wpływowi ciśnienia nadkładu, zmniejszanie się wysokości soczewki wraz z przyrostem odległości od centrum odpowiada zanikaniu gęstości i rozwarcia szczelin wraz ze wzrostem odległości od otworu (rys. 2).



Rys. 2. Schemat modelu Suna w implementacji F. Beauducel'a

Szczelinowanie może być prowadzone w otworach pionowych jak i horyzontalnych. W obu przypadkach rozkład naprężeń i odkształceń pozostaje taki sam. W przypadku szczelinowania w otworze horyzontalnym zjawisko to można aproksymować jako ciąg przenikających się soczewek występujących w kierunku szczelinowanego odcinka poziomego (rys. 3). Tym samym wartości przemieszczeń nie ulegną zmianie a jedynie ich rozkład przestrzenny



Rys. 3. Model Suna dla przypadku szczelinowania w otworze poziomym na odcinku l

Na potrzeby niniejszego opracowania modelowanie zjawiska podnoszenia powierzchni terenu wykonano w oparciu o model Suna w implementacji F. Beauducel'a (*Institute de Physique du Globe, Paris, 2009*) dla środowiska obliczeniowego Matlab.

Obliczenia wykonano dla 3 wariantów różniących się głębokością otworu horyzontalnego H. Dla każdego wariantu obliczono w oparciu o założenia teorii Knothego promień zasięgu wpływów na powierzchni terenu R jako iloraz głębokości H i tangensa kąta zasięgu wpływów β . Wartość kąta zasięgu wpływów zależy od budowy geologicznej górotworu w danym miejscu i jest określana empirycznie w trakcie rozpoznania złoże i analizy geomechanicznej warstw nadkładu (Knothe 1984). Dla potrzeb modelowania założono, że górotwór jest ośrodkiem izotropowym i przyjęto, że kąt zasięgu wpływów ma przeciętnie przyjmowaną wartość 35° . Bazując na literaturze (Konieczńska et al., 2011; PIG-PIB, 2012), przyjęto objętość cieczy szczelinującej jako $20\ 000.00\ m^3$ a następnie $30\ 000.00\ m^3$. Wyniki zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wartości parametrów i wyniki modelowania podnoszenia terenu metodą Suna

	I		II		III	
Głębokość H [m]	2000		2500		3000	
Długość odcinka poziomego [m]	1000					
Objętość cieczy szczelinującej V [m ³]	20 000	30 000	20 000	30 000	20 000	30 000
Kąt zasięgu wpływów β [°]	35°					
Promień zasięgu wpływów R [m]	2 856		3 570		4 284	
Otrzymane, maksymalne wartości podnoszenia [mm]	2,3	3,4	1,5	2,2	1,0	1,5

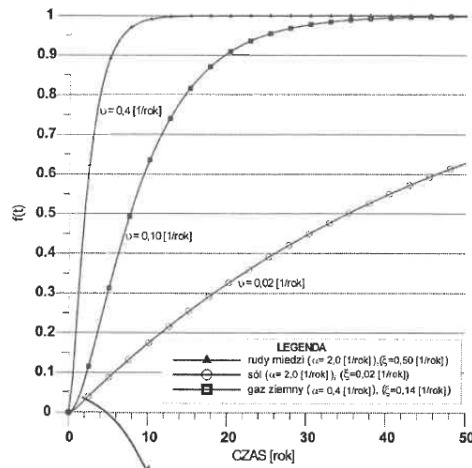
Otrzymane w wyniku prognozy, opartej na modelu Suna, wartości podnoszenia powierzchni terenu dla poszczególnych wariantów zróżnicowanych pod względem: głębokości odcinka poziomego H i objętości cieczy szczelinującej V, są rzędu kilku milimetrów. Należy podkreślić, że są to wartości otrzymane dla warunków uogólnionych i przy założeniu wykonywania pojedynczego zabiegu szczelinowania hydraulicznego na danym obszarze. Założono również, że szczelinowanie odbywa się w wyidealizowanym górotworze o izotropowym, jednorodnym i liniowym rozkładzie relacji naprężenie – odkształcenie. Na obecnym etapie można stwierdzić, że podnoszenie terenu dla pojedynczych zabiegów szczelinowania prowadzonych w celach testowych, nie powinno stanowić

zagrożenia dla infrastruktury mieszkaniowej, przemysłowej czy rolniczej. Należy pamiętać, że w warunkach naturalnych, o zróżnicowanym górotworze, a także w przypadku wykonywania większej liczby zabiegów szczelinowania hydraulicznego na danym otworze wartości podniesienia powierzchni terenu będą większe nawet o rząd wielkości.

3.2.2 Obniżanie powierzchni terenu (osiadanie)

Zwiększona czasowo objętość warstwy gazonośnej powoduje wzrost intensywności przepływu gazu do otworu przy jednoczesnym spadku panującego w niej ciśnienia porowego. Niższe ciśnienie porowe oraz stały nacisk warstw nadkładu wymuszają zmniejszenie objętości warstwy gazonośnej i rozpoczęcie procesów konwergencji i kompaktacji. Należy pamiętać, że pozostawiony w formacji łupkowej materiał podsadzkowy będzie, do pewnego stopnia, zapobiegał zaciskaniu szczelin i tym samym minimalizował konwergencję. Równocześnie zachodzić będą straty objętości formacji wskutek odpływu gazu (kompaktacja). Decydujący wpływ na wielkość osiadania na powierzchni terenu będzie miała miąższość warstwy gazonośnej, głębokość jej zalegania oraz wydajność odwiertu. Prognozowanie wartości osiadania powierzchni terenu należy oprzeć o uogólnioną teorię Knothego (Hejmanowski et al., 2001).

Obniżenia powierzchni terenu pojawia się na powierzchni terenu z pewnym opóźnieniem, które zależy od głębokości i rodzaju eksploatacji. Zależności te opisuje trójparametrowa funkcja czasu zależna od intensywności eksploatacji, względnej prędkości kompaktacji lub konwergencji, współczynnika czasu jaki odpowiada przeniesieniu się deformacji na powierzchnię. Dla eksploatacji gazu ziemnego parametry te osiągają bardzo niewielkie wartości (rys. 4), z których wynika, że nie należy się spodziewać pojawienia się mierzalnych osiadań powierzchni terenu w trakcie 3 lat prowadzenia projektu.



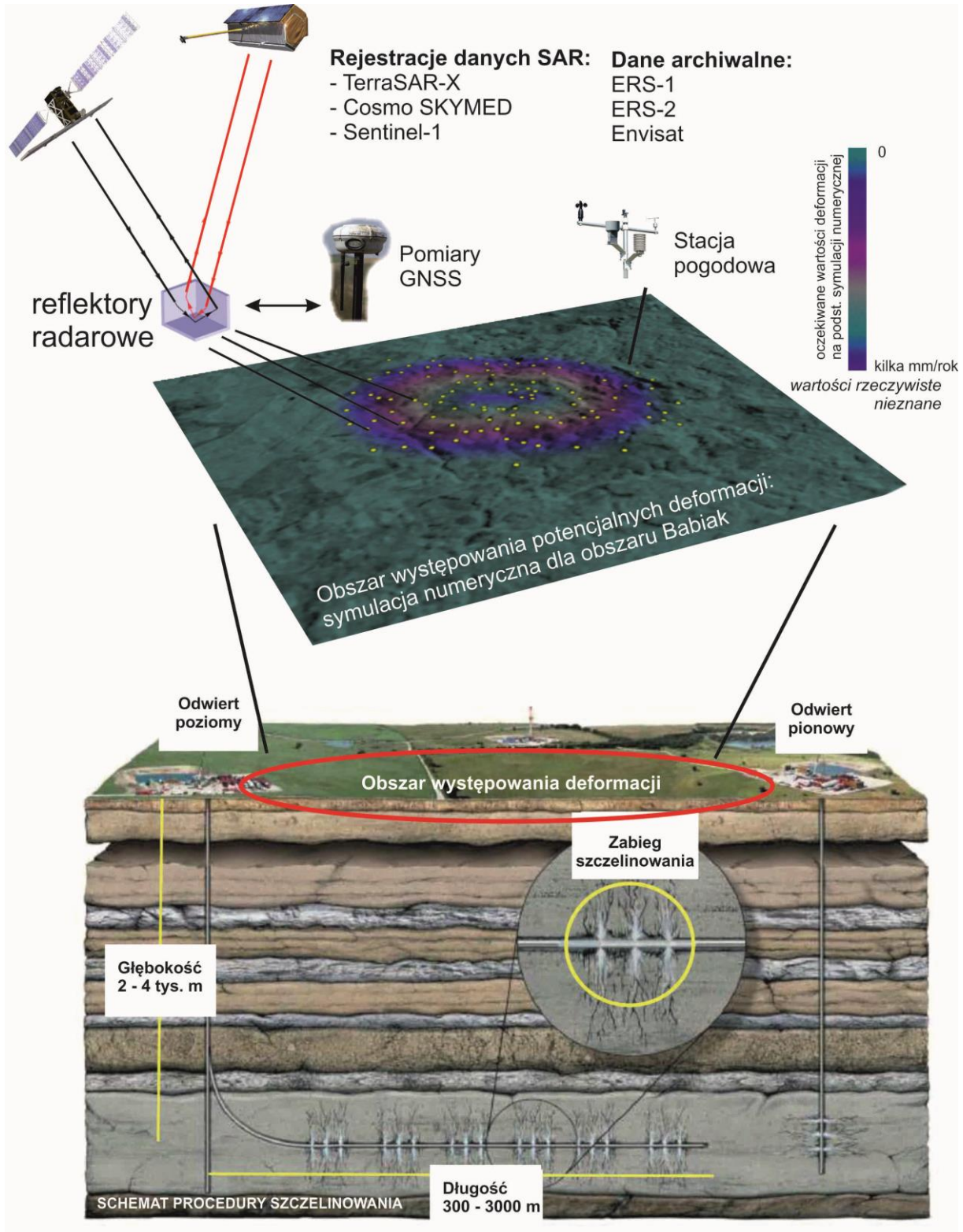
Rys. 4. Przebieg funkcji czasu dla złóż miedzi, soli i gazu (Hejmanowski et al., 2001).

Pojawienia się osiadań na powierzchni terenu w krótszym czasie należałoby się natomiast spodziewać, gdyby w trakcie prowadzenia prac doszło do niekontrolowanych i nieprzewidzianych zjawisk, takich jak przebicie hydrauliczne i ucieczka wód z poziomów wodonośnych lub uaktywnienie nierozpoznanych stref uskokowych. Możliwość monitorowania rozwoju takich zjawisk jest szczególnie cenna z uwagi na ochronę infrastruktury na powierzchni.

4 Metody pomiaru deformacji

Jednym z wymagań projektu „Monitoring osiadania...” było przeprowadzenie precyzyjnych pomiarów osiadań. Spodziewane, ewentualne deformacje nie przekraczały kilku mm/rok, stąd potrzeba zaplanowania i budowy geodezyjnej infrastruktury pomiarowej, która gwarantowałaby najwyższą dokładność pomiarów. Dla precyzyjnego określenia współrzędnych x , y , z zdecydowano się wykorzystać technologię GNSS, zaś dla walidacyjnych / weryfikacyjnych pomiarów składowej z , optyczną niwelację precyzyjną. Założono, że punkty pomiarowe stanowić będą jednocześnie reflektory do pomiarów interferometrycznych. Zostanie rozmieszczonych 20 punktów na każdym z poligonów badawczych. Jednocześnie zostaną wyposażone w uchwyty do montowania anten GNSS i repery do niwelacji precyzyjnej (rys. 5). Reflektory zostaną zlokalizowane wewnątrz spodziewanego, maksymalnego zasięgu wpływów wokół otworu wiertniczego jak i szczelinowanego odcinka horyzontalnego. Oprócz reflektorów dodano punkty referencyjne dla pomiarów GNSS i niwelacji: 4 punkty poza obszarem spodziewanych deformacji i 4 wewnątrz obszaru. Obok każdego z reflektorów zastabilizowano reper ziemny do

niwelacji. Pozwoliło to zweryfikować, czy mierzone deformacje są ruchem samego reflektora czy też dotyczą powierzchni terenu.



Rys.5. Schemat założeń pomiarowych projektu „Monitoring osiadnia...”

4.1 Niwelacja precyzyjna

Niwelacja precyzyjna jest szczególnym przypadkiem niwelacji geometrycznej, metody wyznaczania różnic wysokości znanej od czasów starożytnych. Pomiar różnic wysokości punktów odbywa się na podstawie pomiaru położenia poziomej osi celowej niwelatora na pionowo ustawionych na tych punktach łąkach niwelacyjnych. Zasady jej wykonania określa Instrukcja Techniczna G-4 "Pomiary sytuacyjne i wysokościowe".

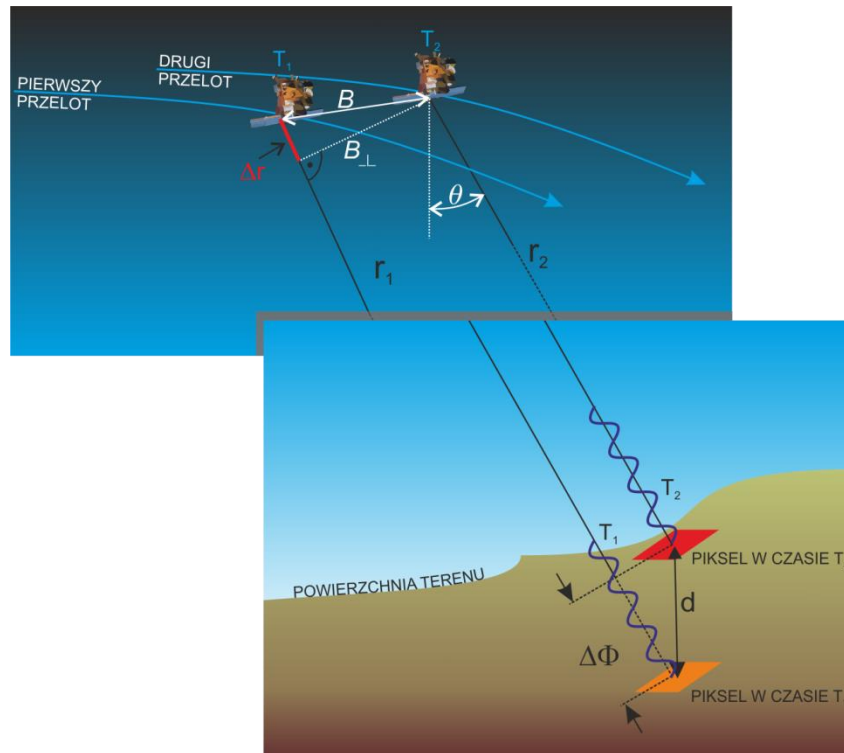
4.2 Pomiary GNSS

GPS (*Global Positioning System*) a obecnie szerzej GNSS (*Global Navigation Satellite System*) to technika najpowszechniej obecnie stosowana w pomiarach inżynierskich i geodezji. Technologia GNSS służyć może również do precyzyjnych pomiarów niwelacyjnych zwanych niwelacja satelitarną. Jest to pomiar różnic wysokości punktów wykonywany metodą precyzyjnego pozycjonowania przy pomocy odbiorników GNSS. W rezultacie pomiarów i obliczeń wyznacza się wysokości ortometryczne na podstawie wysokości geometrycznych wyznaczanych techniką satelitarną GPS oraz informacji o ziemskim polu siły ciężkości, które pozwalają wyznaczyć odstęp geoidy od elipsoidy. Do regionalnych wyznaczeń modelu potencjału grawitacyjnego wprowadza się regionalne i lokalne anomalie grawimetryczne, a w podejściu lokalnym numeryczne modele terenu. Z uwagi na fakt, że wyznaczenie współrzędnej wysokościowej jest obarczone wyższym błędem niż współrzędnych horyzontalnych pomiary i obliczenia należy prowadzić z wykorzystaniem zaawansowanych metod (Stępnia et al., 2013).

4.3 Interferometria

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. 6). Dobry przegląd podstaw metodyki, potencjału i obszarów zastosowań InSAR można znaleźć w szeregu prac o charakterze podstawowym: (Bamler, Hartl, 1998; Bürgmann et al., 2000; Massonnet, 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.

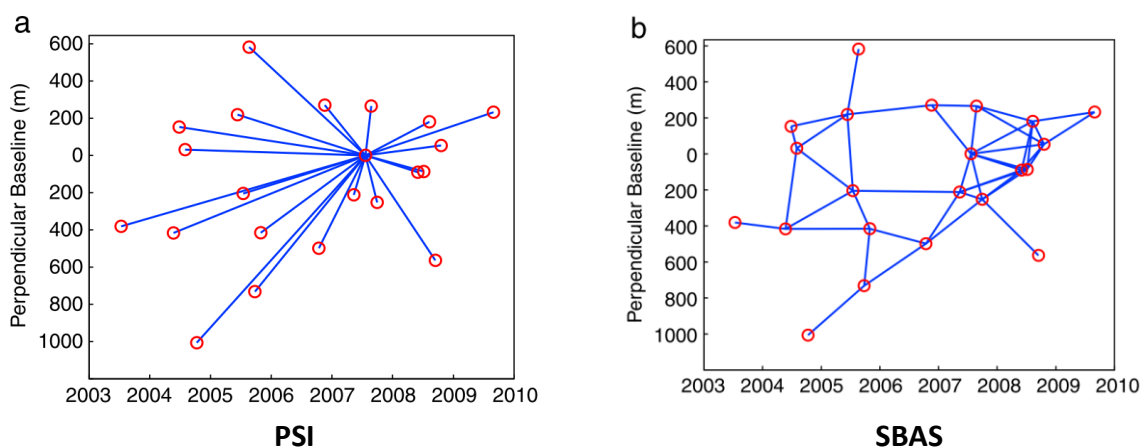


Rys. 6. Geometria i zasada działania D-InSAR

Największe ograniczenia metody InSAR wiążą się z tzw. dekorrelacją czasową (stopniową utratą koherencji w czasie), która związana jest ze zmianami właściwości elektromagnetycznych lub/i pozycją rozpraszacza wewnątrz komórki rozdzielczości (Cattabeni et al., 1994; Zebker, Villasenor, 1992). 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.

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. Pierwszą tego typu metodą (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 (Ferretti et al., 1999). 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 wymaganie co najmniej 20 interferogramów.

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. 7). Ma to na celu obliczenie serii interferogramów w taki sposób by miały one jak najwyższą koherencję.



Rys. 7. 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)

4.3.1 CRInSAR - Satelitarna Interferometria z wykorzystaniem reflektorów radarowych

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, 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.

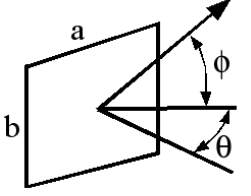
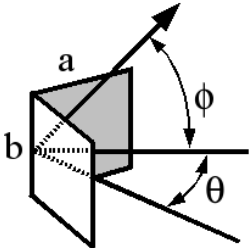
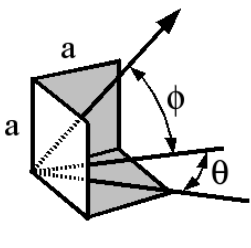
2. Dla walidacji wyników. Reflektor radarowy jest jedynym obiektem, gdzie interferometryczny pomiar deformacji można bezpośrednio odnieść do wyników pomiarów geodezyjnych. Reflektor radarowy ma ściśle zdefiniowane fizyczne centrum fazowe, które można zmierzyć metodami geodezyjnymi (za pomocą niwelacji 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*).

Charakterystyki i geometrię poszczególnych typów rozpraszaczy elementarnych przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. – Charakterystyka typów rozpraszaczy elementarnych (Perski et al. 2006).

Typ rozpraszacza	Nazwa	RCS	Uwagi
	Jednopowierzchniowy (Płaszczyznowy) (<i>Specular</i>)	$\sigma = \frac{4\pi a^2 b^2}{\lambda^2}$	Rozpraszanie wsteczne największe przy prostopadłym ustawieniu reflektora.
	Dwupowierzchniowy (Dwuścienny) (<i>Dihedral</i>)	$\sigma = \frac{8\pi a^2 b^2}{\lambda^2}$	Rozpraszanie wsteczne zmniejsza się gwałtownie wraz ze zmianą kąta ϕ . Mała wrażliwość na zmiany kąta θ .
	Trójpowierzchniowy (Trójścienny) (<i>Trihedral</i>)	$\sigma = \frac{12\pi a^4}{\lambda^2}$	Największe rozpraszanie wsteczne w stosunku do innych typów, najmniejsza wrażliwość na zmiany kątów ϕ i θ .

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. Do walidacji pomiarów interferometrycznych użyto ich po raz pierwszy w marcu 1992 roku w trakcie tzw. „*Bonn Experiment*” (Hartl et al. 1993; Prati et al. 1993). 19 reflektorów trójściennych skonstruowanych przez Instytut Nawigacji Uniwersytetu w Stuttgarcie, o rozmiarach przyprostokątnej 1,4 m (RCS = 37 dB sqm) zbudowanych z pełnych blach aluminiowych rozmieszczono w terenie w okolicy Bonn. Reflektory rozmieszczono w odległościach od 500 do 100 m wzdłuż liniowego ciągu równoległego do kierunku LoS (*Line of Sight* – kierunek padania wiązki radarowej). Reflektory umieszczono na ramowych podstawach zbudowanych z rur stalowych, 7 z nich miało możliwość regulacji pionowej, skokowo o odpowiednio 1 cm, 5 cm, 10 cm i 20 cm. Reflektory wychylono o $24,5^\circ$ od poziomu, w kierunku satelity. Współrzędne każdego z reflektorów mierzono za pomocą odbiornika GPS. W dniach 23 i 26 marca zespół terenowy TU Stuttgart dokonał przemieszczenia wybranych reflektorów nie informując o tym zespołu przetwarzającego dane

(Politechnico Milano). Nad całościową koordynacją eksperymentu czuwał zespół specjalistów ESA. Różnicowe pomiary interferometryczne (pomiędzy reflektorem a jego otoczeniem) wykazały przemieszczenia reflektorów nr 9 i 11 dla par interferometrycznych 23.03 – 29.03 i 26.03 – 29.03 odpowiednio o 7 mm i 9 mm. Zespół terenowy dokonał zmiany wysokości reflektorów 9 i 11 o 10 mm. Eksperyment potwierdził wysoką dokładność i ogromną przydatność interferometrii do praktycznych zastosowań.

Od czasu „Eksperymentu z Bonn” reflektory radarowe stosowane były w szeregu innych eksperymentach walidacyjnych, pracach badawczych. Ponadto są one stosowane w przemysłowych systemach monitoringu, których wyniki z uwagi na komercyjny charakter nie są publikowane.

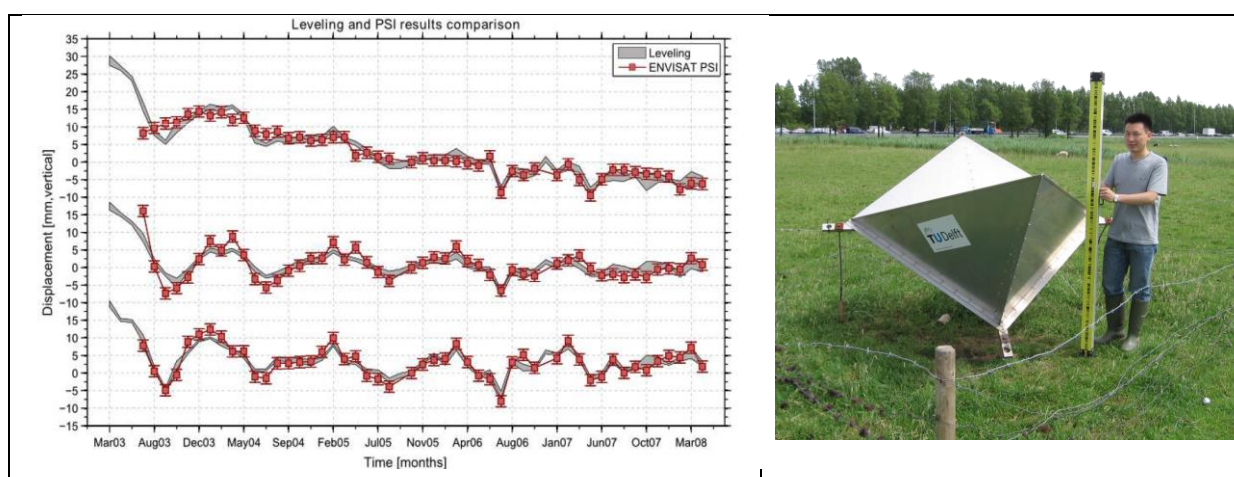
Spośród opisanych w literaturze warto wymienić projekt MODIFI (*Monitoring of Displacement Fields by Radar Interferometry*), w którym trójścienne reflektory radarowe wykorzystano po raz pierwszy do interferometrycznego badania deformacji pogórnicych (Timmen et al., 1996). 10 reflektorów o wymiarach 2,5 m rozmieszczono na obrotowych podstawach (dla pomiaru z orbity wschodzącej i schodzącej) na terenach nad wyrobiskami nieczynnej kopalni uranu (Turyngia, Niemcy) – rys. 8.



Rys. 8. Reflektory projektu MODIFI (Timmen et al. 1996)

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. 9). 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. 9. DCRE (Delft Corner Reflector Experiment) – przykładowe serie czasowe dla reflektorów (Marinkovic et al., 2007). Z prawej widok ogólny reflektora (fot. Autor)

Kolejnym, istotnym z punktu widzenia rozwoju technologii InSAR eksperymentem był ten przeprowadzony przez POLIMI (Politechnika w Mediolanie) w ciągu 10 miesięcy pomiędzy listopadem 2004 a sierpniem 2005 r. Eksperyment przeprowadzono z użyciem dwóch zestawów reflektorów dwuściennych o wymiarach 45 cm, przy czym jeden z reflektorów mógł być przesuwany wzdłuż osi xyz podczas gdy drugi zamontowany był na stałe. Każdy z zestawów składał się z 2 reflektorów na wspólnej ramie umieszczonych w ten sposób by odbijały sygnały satelitarne z orbity wschodzącej i schodzącej. Orientacja reflektorów została dobrana w ten sposób by wykorzystywać sygnały z satelitów Radarsat-1 i Envisat (Ferretti et al., 2007), działających w pasmie C (5,3 GHz). Eksperyment udowodnił, że reflektory mogą być użyte w pomiarach z różnych systemów satelitarnych oraz, że jest możliwe mierzenie sub-milimetrowych przemieszczeń poziomych, jak i pionowych.

Warto wspomnieć również opracowania, w których wykorzystano reflektory radarowe w pomiarach deformacji. Naukowcy z *Chinese University of Hong Kong* wykorzystali

reflektory z aluminiowej blachy perforowanej (rys. 10) do pomiarów kilkumilimetrowych osiadań obszarów zurbanizowanych Hong Kongu (Qin et al., 2013).



Rys. 10. Prototyp reflektora stosowanego w Hong Kongu (Qin et al. 2013)

Osuwisko Shuping stanowiące zagrożenie dla zbiornika Trzech Przełomów w Chinach jest od lat badane za pomocą interferometrii SAR (rys. 11). Badania walidacyjne na reflektorach umożliwiły pomiar bardzo dużych przyrostów przemieszczeń (Guang et al., 2016).



Rys.11. Reflektory trójkątne stosowane na osuwisku Shuping (fot. T. Wojciechowski)

Na bazie dotychczasowych doświadczeń, w oparciu o reflektory radarowe (rys. 12), rozwijana jest obecnie obserwacyjna sieć geodezyjna w Australii (Garthwaite et al., 2015).



Rys. 12. Reflektory sieci geodezyjnej Australii (Garthwaite et al. 2015).

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).

5 Poligony badawcze

5.1 Kryteria i wybór poligonów badawczych

Badania deformacji zdecydowano się przeprowadzić na 3 poligonach badawczych zlokalizowanych wokół otworów wiertniczych, na których były lub miały być realizowane zabiegi szczelinowania w odcinkach poziomych odwiertów w związku z pracami poszukiwawczymi gazu w formacjach łupkowych. W czasie, kiedy rozpoczynano badania dostępne było jedynie kilka lokalizacji spełniających powyższe kryteria i spośród nich wytypowano trzy lokalizacje w okolicach miejscowości Lewino, Babiak i Berejów (rys. 13).

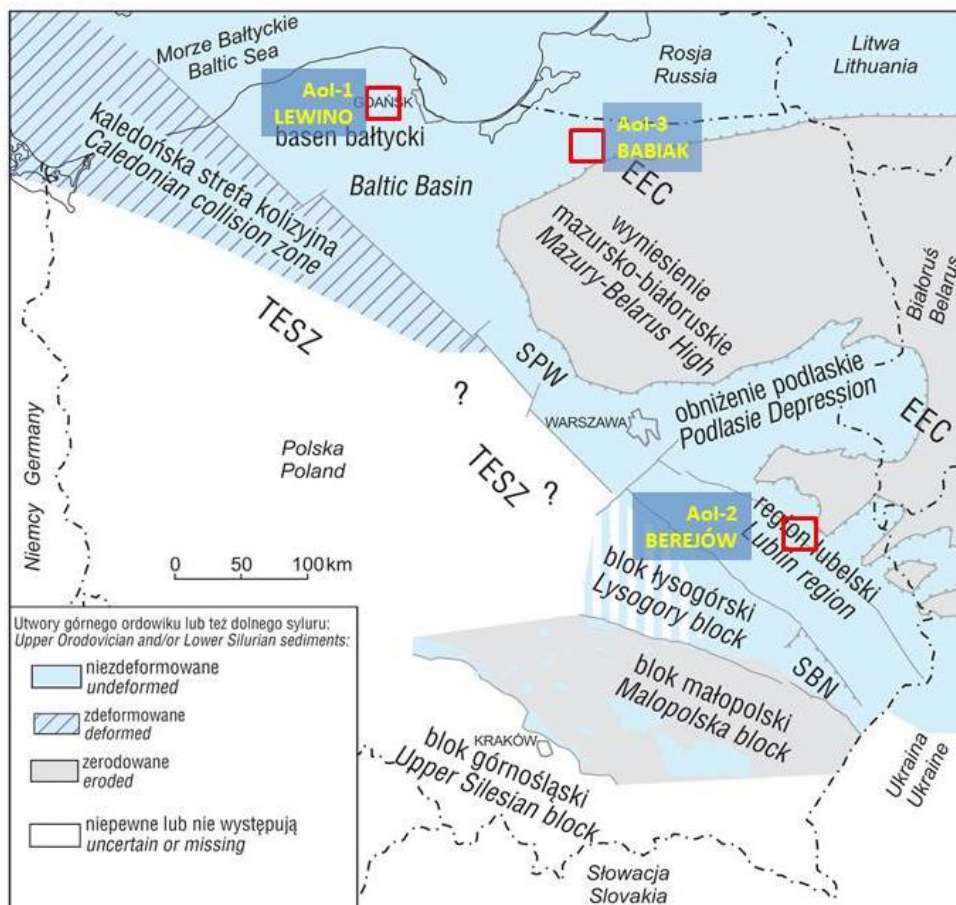


Rys. 13. Lokalizacja poligonów badawczych

5.2 Lokalizacja, budowa geologiczna i infrastruktura pomiarowa

Na terenie Polski łupki wzbogacone w substancję organiczną były deponowane w systemie basenów sedymentacyjnych rozwiniętych we wczesnym paleozoiku na zachodnim skłonie kratonu wschodnioeuropejskiego. Utwory te tworzą rozprzestrzenione na znacznych obszarach ilasto-mułowcowe osady ciemnych barw, wzbogacone w substancję organiczną, które potencjalnie zawierają akumulacje gazu ziemnego (Poprawa, 2010). Są to głównie

górnordowickie i dolnosylurskie łupki graptolitowe. W wyniku późniejszych procesów tektonicznych oraz erozji baseny, w których osady te były deponowane zostały rozdzielone na basen bałtycki (syneklizę perybałtycką), obniżenie podlaskie oraz region lubelski (Poprawa 2010) – rys. 14.



Rys. 14. Lokalizacja poligonów badawczych na tle lokalizacji dolnopaleozoicznych basenów sedymentacyjnych oraz obszarów występowania łupków górnego ordowiku lub też dolnego syluru (Poprawa 2010). Skróty: SPW — strefa płocko-warszawska; SBN — strefa Biłgoraj-Narol; EEC — kraton wschodnioeuropejski; TESH — strefa szwu transeuropejskiego

5.2.1 Poligon Lewino – lokalizacja i budowa geologiczna

Obszar badań położony jest na Pojezierzu Kaszubskim, w województwie pomorskim, powiecie wejherowskim, w gminie Linia. Granicę obszaru wyznacza okrąg o średnicy 18 km, którego środek został wyznaczony w miejscu wykonania otworu poszukiwawczego gazu w formacjach łupkowych Lewino-2H.

Poszukiwania prowadzono w łożyskach formacji łożysków wapienistych z Pucka (wiek: późny sylur – przydol) zalegających prawdopodobnie na podłożu krystalicznym. łożyski zalegają na głębokości ok. 3500 m (Tomczyk, 1976; Poprawa, 2010). Bezpośrednio nad nimi znajdują się utwory górnego permu, rozpoczynające kompleks permsko-mezozoiczny. Są one

reprezentowane przez wapień cechsztyński, dolomity oraz gipsy, anhydryty i sól kamienną. Powyżej nich występują utwory triasu formacji bałtyckiej a następnie osady jurajskie i górnej kredy zbudowane z margli, piaskowców i mułowców. Na utworach kredowych zalega pokrywa mioceńska o miąższości 150m miąższości reprezentowana przez osady lądowe sedymentacji limnicznej, rzecznej oraz bagiennej. Istotną rolę w budowie geologicznej badanego obszaru odgrywają osady czwartorzędowe, które w rejonie Lewina osiągają ok. 150 m. Na powierzchni terenu utwory czwartorzędu reprezentowane są przez gliny zwałowe zlodowacenia północnopolskiego budujące wzgórza poprzedzielane obniżeniami wypełnionymi piaskami i żwirami wodnolodowcowymi oraz nieckami bezodpływowymi wypełnionymi mułkami i torfami.

5.2.2 Poligon Berejów – lokalizacja i budowa geologiczna

Obszar badań wyznacza okrąg o promieniu 10 km i środku w punkcie lokalizacji otworu wiertniczego Berejów-UO2K. Powierzchnia tego obszaru wynosi ok. 62,8 km². Otwór wiertniczy Berejów-UO2K, zgodnie z trójstopniowym podziałem Polski leży na terenie gminy Niedźwiada, w powiecie lubartowskim w województwie lubelskim. Pod względem geologicznym obszar badań położony jest w obrębie struktury zwanej „karbońskim basenem lubelskim” lub „rowem lubelskim”. Przedmiotem badań były tu utwory dolnego syluru reprezentowane przez ciemnoszare i czarne iłowce z graptolitami należące do formacji iłowców z Pasłęka. Występują w nich przeławicenia margli i mułowców. Miąższość tych utworów nie przekracza 130 metrów i występują na głębokości ok. 2500 m. Ponad nimi zalegają utwory dewońsko-karbońskie basenu lubelskiego. Utwory dewonu zbudowane są z kompleksów iłowcowo-mułowcowo-piaskowcowych przechodzących w skały węglanowe i w górnej części w utwory terygeniczo-węglanowo-anhydrytowe (Prugar, 2013). Karbon tworzą utwory węglanowe przechodzące w drobnoklastyczne z bogatymi pokładami węgla.

Pokrywa mezozoiczna zbudowana jest ze środkowojurajskich wapieni piaszczystych, piaskowców i zlepieńców a następnie głównie wapieni i margli piaszczystych oxfordu i kimerydu. Na ich powierzchni erozyjnej zalegają utwory kredy górnej wykształcone w postaci wapieni marglistych, margli, kredy piaszczystej oraz gez i opok. Powyżej nich, w postaci izolowanych płatów występują utwory paleogenu i neogenu reprezentowane głównie przez piaski i ły piaszczyste. Utwory czwartorzędowe na opisywanym obszarze zalegają na zdenudowanym podłożu, które budują utwory mastrychtu górnego, eocenu górnego i miocenu. Miąższość utworów czwartorzędowych nie przekracza 100 metrów.

Na powierzchni budują je osady o charakterze pokrywowym: eoliczne, przede wszystkim piaski pyłowate i pyły piaszczyste, niekiedy z domieszką piasków drobnoziarnistych oraz eluwalne o charakterze peryglacialnych pokryw wietrzeniowych zbudowane głównie z piasków pylastych i pyłów piaszczystych. Dominują jednak piaski i żwiry wodnolodowcowe, gliny zwałowe oraz namuły, piaski i mułki jeziorno-zastoiskowe.

5.2.3 Poligon Babiak – lokalizacja i budowa geologiczna

Poligon Babiak położony jest wokół wiercenia Babiak-1 w województwie warmińsko-mazurskim w powiecie lidzbarskim, w zachodniej części terenu gminy Lidzbark Warmiński.

Na obszarze badań można wyróżnić cztery wyraźne kompleksy strukturalne, oddzielone powierzchniami nieciągłości: kompleks prekambryjski, staropaleozoiczny, perm – mezozoiczny oraz piętro najmłodsze - osady paleogenu, neogenu i czwartorzędu. Charakter budowy geologicznej tego regionu jest zdeterminowany obecnością krystalicznego cokołu platformy wschodnioeuropejskiej. Przedmiotem poszukiwań gazu ziemnego były na tym obszarze formacje iłowców z Sasina i Pasłęka. Formacja iłowców z Pasłęka wykształcona jako czarne iłowce bitumiczne przechodzące w ciemnoszare i szare z laminacjami iłowcami zielonawymi, szarozielonymi i czarnymi. Formacja z Pelplina zbudowana jest w niższej części z iłowców ciemnoszarych i szarych z soczewkami wapieni marglistych, w wyższej części z iłowców szarych i szarozielonych laminowanych, z rzadkimi laminami bentonitów. Osady syluru kończą profil starszego paleozoiku.

Późnkarbońsko-wczesnopermska erozja spowodowała usunięcie osadów karbońskich, dewońskich i częściowo sylurskich. Powyżej nich występują utwory piętra perm – mezozoicznego, którego spąg stanowią zlepieńce, mułowce i iłowce czerwonego spągowca. Powyżej nich występują osady europejskiego basenu cechsztyńskiego. Rejon badań znajdował się w granicach zatoki nadbałtyckiej, gdzie łączna miąższość osadów może sięgać 400 m. Utwory cechsztynu przykryte są ilasto-mułowcowymi i piaskowcowymi osadami triasu, na których występują klastyczne osady dolnojurańskie (kompleksy piaskowców kwarcowych oraz iłowców i mułowców). Powyżej nich zalegają wapienie biohermowe jury górnej a następnie niewielkiej miąższości piaskowce reprezentujące osady kredy. Kompleks paleogenu i neogenu wykształcony jest w postaci zielonkawych piasków drobnoziarnistych i pylastych, glaukonitowych paleogenu oraz piasków, iłów i mułków neogenu. Pokrywa

utworów czwartorzędowych osiąga w obszarze badań ponad 100 m miąższości, a składają się na nią osady plejstoceniowe i holoceniowe.

Utwory plejstoceniowe reprezentowane są przez osady zlodowceń najstarszych, zlodowceń południowopolskich, interglacjału wielkiego, zlodowceń środkowopolskich i zlodowceń północnopolskich. Na rzeźbę terenu największy wpływ mają osady zlodowceń północnopolskich, którego gliny zwałowe tworzą wzniesienia poprzedzielane dolinami i zagłębieniami bezodpływowymi wypełnionymi przez utwory wodnolodowcowe (piaski i żwiry) lub zastoiskowe (mułki, torfy).

5.2.4 Infrastruktura pomiarowa

Dla poszczególnych obszarów badawczych wyznaczono rejony potencjalnie objęte wpływami szczelinowania. Maksymalny zasięg od miejsca eksploatacji w jakim występują deformacje powierzchni terenu określa tzw. *rozproszenie wpływów* r (Knothe, 1984).

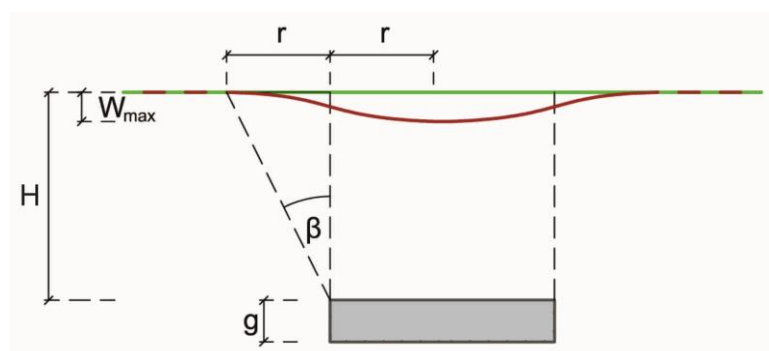
Rozproszenie wpływów określa się zależnością:

$$r = \frac{H}{\tan \beta}$$

Gdzie:

H – głębokość eksploatacji

β – kąt zasięgu wpływów głównych (rys. 15)



Rys. 15. Schemat maksymalnych osiadań i rozproszenie wpływów (Knothe, 1984)

Przyjęto $\beta = 55^\circ$ (jest to przeciętna wartość przyjmowana dla górotworów gdzie nie prowadzono wcześniej eksploatacji).

Dla poszczególnych poligonów wielkość rozproszenia wpływów zestawiono w tabeli 3.

Tabela. 3. Wartości rozproszenia wpływów dla poszczególnych poligonów badawczych

Poligon badawczy	Głębokość eksploatacji (szczelinowania)	Rozproszenie wpływów
LEWINO	3545 m	2482 m
BEREJÓW	2554 m	1790 m
BABIAK	2000 m	1400 m

Dla przeprowadzenia pomiarów monitoringowych w trzech niezależnych technologiach pomiarowych, na każdym z poligonów rozmieszczono następujące elementy infrastruktury:

- 20 reflektorów radarowych z czego 15 dla satelity TerraSAR-X (rys. 16) i 5 dla satelity Sentinel-1 (rys. 17);



Rys. 16. Reflektor dla pomiarów sygnałów z satelity TerraSAR-X (poligon Berejów). Fot. Autor



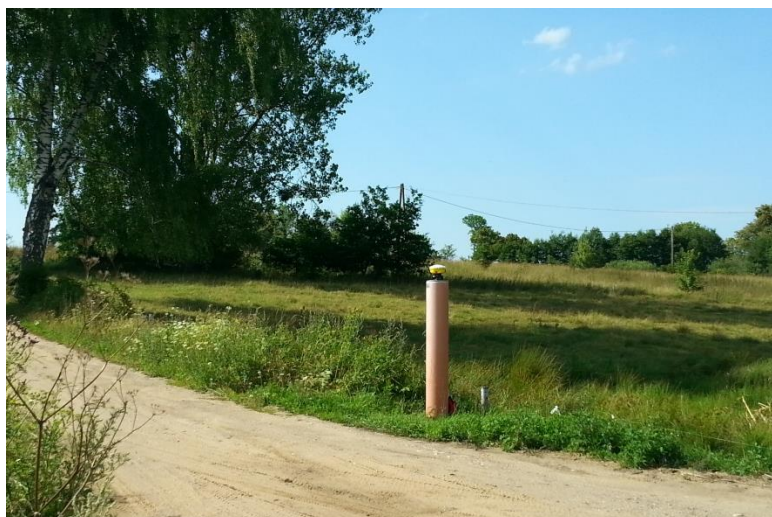
Rys. 17. Reflektor dla pomiarów sygnałów z satelity Sentinel-1 (poligon Berejów). Fot. Autor

- reflektory wyposażono w trzpienie do pomiarów niwelacji GNSS;
- 20 reperów ziemnych dla niwelacji precyzyjnej (zlokalizowanych w pobliżu reflektorów) – rys. 18;



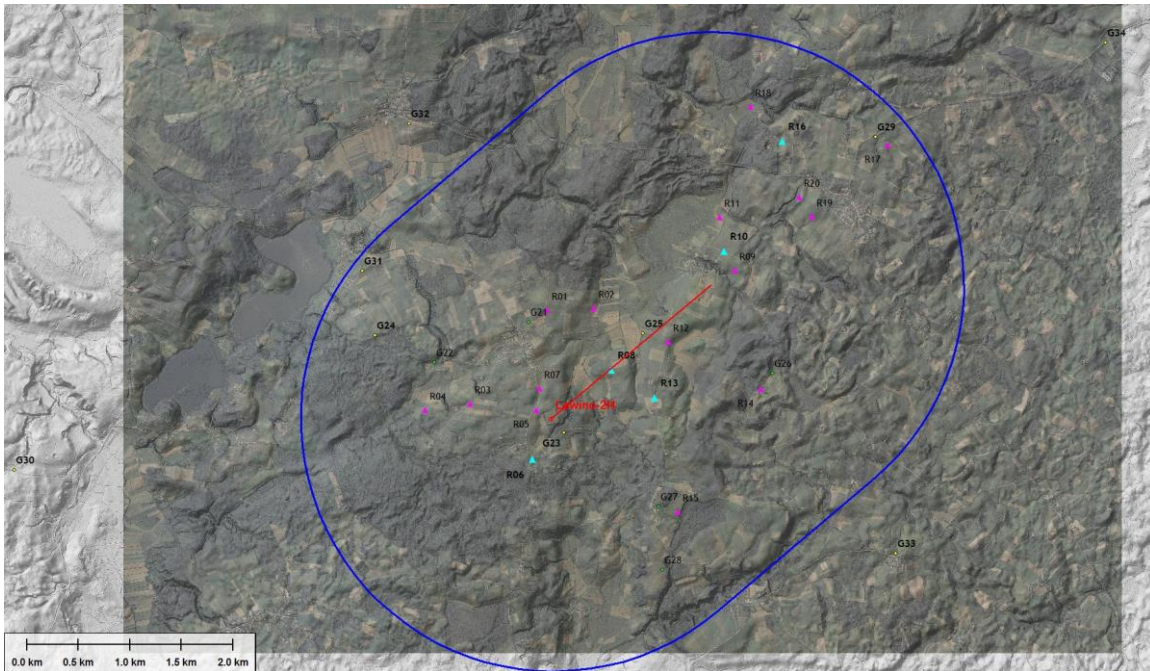
Rys. 18. Reper ziemny zastabilizowany w studziencie drenarskiej. Fot. Autor

- 4 monumenty referencyjne GNSS (rys. 19). Dodatkowo umieszczono 4 monumenty referencyjne GNSS poza terenem objętym wpływami.

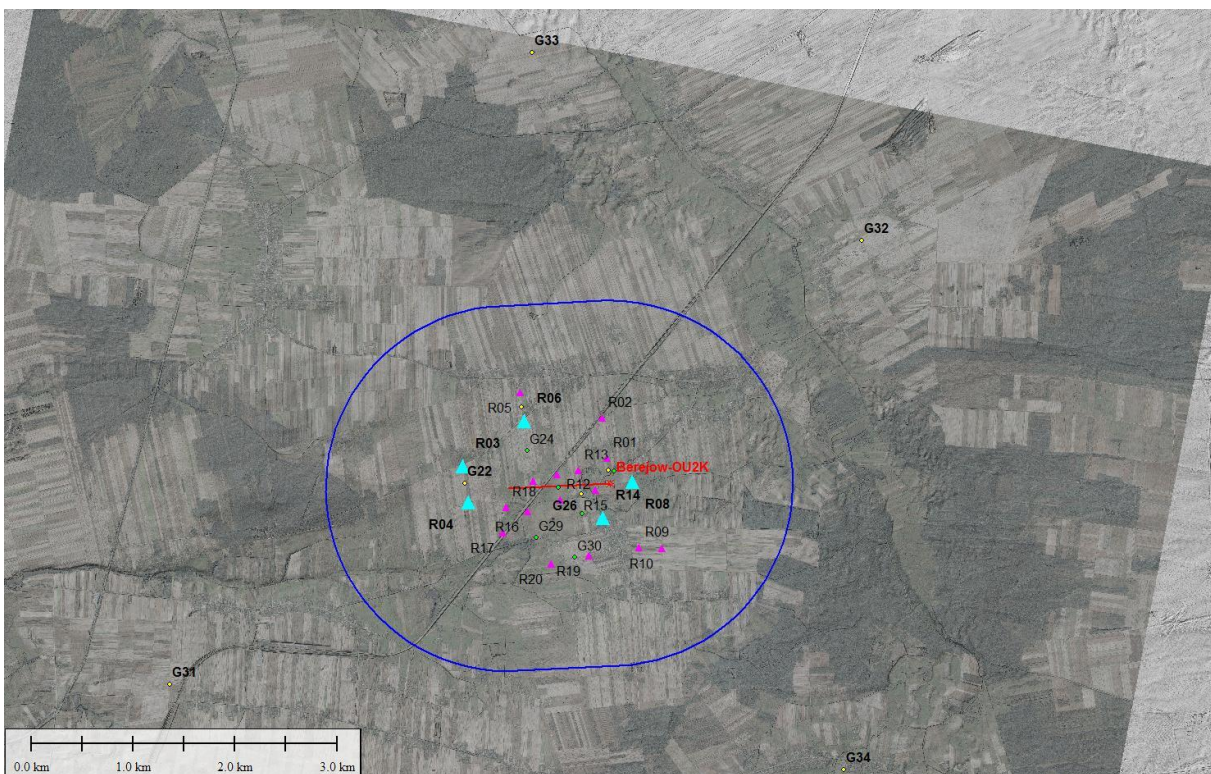


Rys. 19. Monument referencyjny z płytą do poziomowania spodarki. Poligon Babiak. Fot. Autor

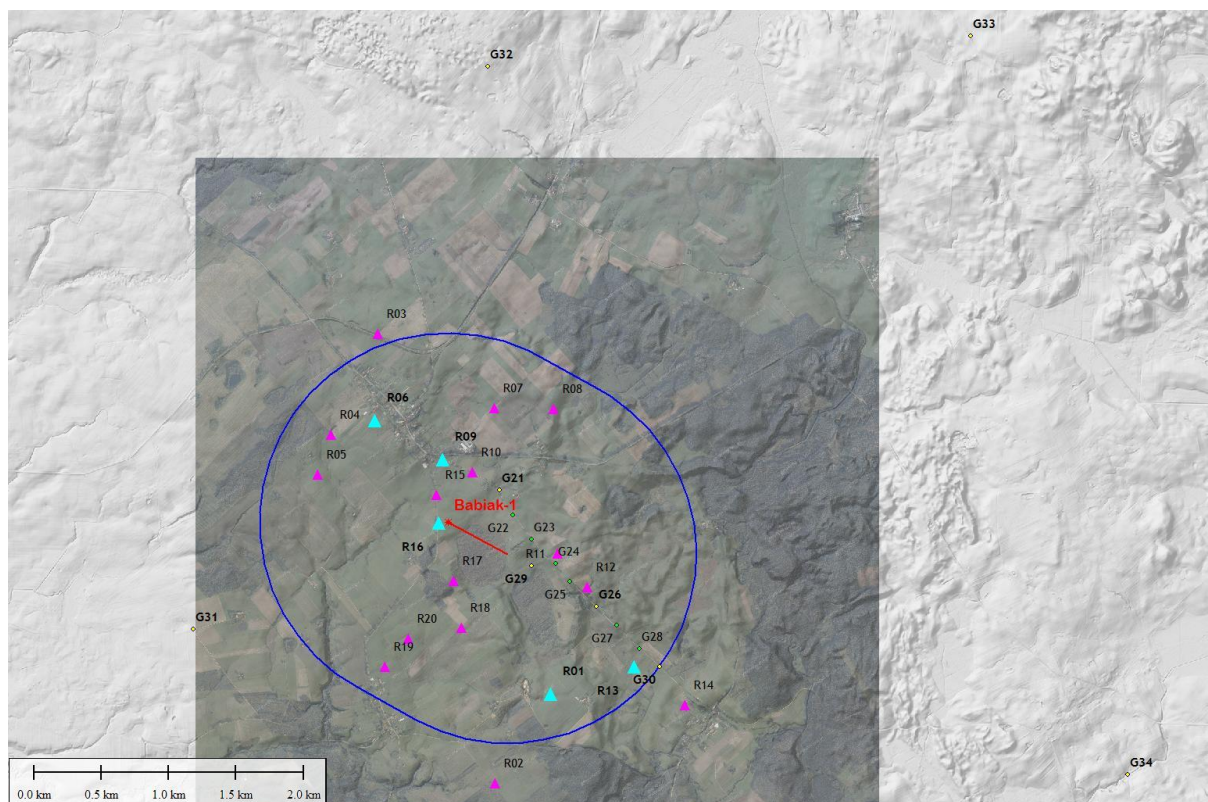
Rozmieszczenie infrastruktury na poszczególnych poligonach przedstawiają rys 20, 21, 22. Objasnienia do rysunków zawarto w tabeli 4.



Rys. 21. Rozmieszczenie infrastruktury pomiarowej na poligonie Lewino. Objasnienia symboli tab. 4. Czerwony: lokalizacja otworu i odcinka poziomego, niebieski – zasięg rozproszenia wpływów. Uwaga: repery ziemne znajdujące się w pobliżu reflektorów nie zostały zaznaczone z uwagi na skalę mapy







Rys. 22. Rozmieszczenie infrastruktury pomiarowej na poligonie Berejów. Objasnienia symboli tab. 4. Czerwony: lokalizacja otworu i odcinka poziomego, niebieski – zasięg rozproszenia wpływów. Uwaga: repery ziemne znajdujące się w pobliżu reflektorów nie zostały zaznaczone z uwagi na skalę mapy



Rys. 23. Rozmieszczenie infrastruktury pomiarowej na poligonie Babiak. Objaśnienia symboli tab. 4. Czerwony: lokalizacja otworu i odcinka poziomego, niebieski – zasięg rozproszenia wpływów. Uwaga: repery ziemne znajdujące się w pobliżu reflektorów nie zostały zaznaczone z uwagi na skalę mapy

Tabela 4. Objaśnienia symboli, rodzaje punktów infrastruktury pomiarowej

Symbol	Rodzaj punktu	Fotografia
R16 ▲	Reflektor radarowy dla Sentinel-1	
R20 ▲	Reflektor radarowy dla TerraSAR-X	
G29 ◆	Monument referencyjny GNSS	
G21 ◆	Reper ziemny dla niwelacji precyzyjnej	

6 Dane pomiarowe - przetwarzanie i analiza

6.1 Dane satelitarne SAR

6.1.1 Dane archiwalne ERS-1, ERS-2 i Envisat

Na potrzeby projektu wykorzystano dane archiwalne zarejestrowane przez systemy ERS-1, ERS-2 i Envisat w latach 1992 – 2012 (tab. 5). Dane te były udostępniane nieodpłatnie dla zarejestrowanych użytkowników naukowych przez Europejską Agencję Kosmiczną na potrzeby konkretnych zadań badawczych. Od 2017 roku dane te są dostępne nieodpłatnie dla wszystkich zarejestrowanych użytkowników bez dodatkowych restrykcji.

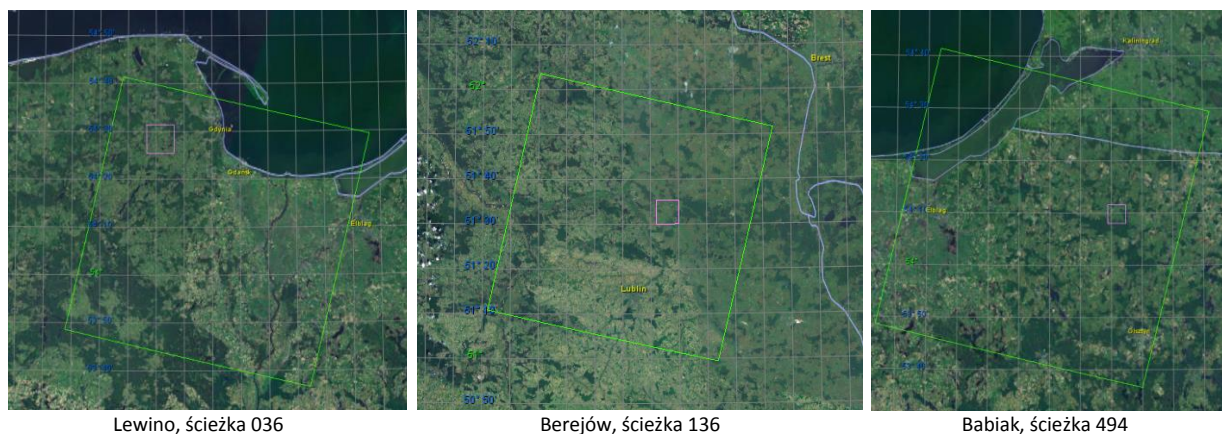
Dane te posłużyły do próby określenia czy na wybranych poligonach badawczych występowały wcześniej deformacje terenu i jako tło do analiz nowych danych rejestrowanych na potrzeby i w czasie trwania projektu.

Tabela 5. Parametry techniczne rejestracji ERS1/2 i Envisat

Rodzaj danych	SAR SLC			
Satelita	ERS-1	ERS-2	Envisat	
Tryb obrazowania	Strip Map			
Pasma C dł. fali	5,7 cm	5,7 cm	5,6 cm	
Rodzaj rejestracji	Descending, right-looking			
Numer ścieżki (<i>track</i>)	036 (Lewino), 136 (Berejów), 494 (Babiak)			
Kąty obrazowania	25° - 29° (środek sceny 23°)			
Liczba użytych scen	LEWINO	12	130	18
	BEREJÓW	9	121	16
	BABIAK	9	136	6

Radary SAR satelitów ERS-1 i ERS-2 miały identyczne charakterystyki w związku z czym można je objąć wspólnym przetwarzaniem danych. Dane Envisat, z uwagi na nieznacznie inną długość fali muszą być przetwarzane oddzielnie. Łączenie zbiorów odbywało się w domenie wyników.

Nominalne sceny ERS-1/2 i Envisat obejmują obszar 100 x 100 km o rozdzielczości terenowej ok. 25 m. Zasięg scen użytych do przetwarzania poszczególnych obszarów przedstawia rys. 23.



Rys. 23. Zasięg scen ERS-1/2 i Envisat użytych do opracowania poligonów. Lokalizację poligonu zaznaczono kolorem różowym

6.1.2 Dane TerraSAR-X

Na potrzeby projektu zamówiono wykonanie rejestracji wysokorozdzielczych SAR. Dane te obejmują okres od 17 sierpnia 2014 r. do 22 grudnia 2016 r. (tab. 6). Wykonywane były regularnie, w interwałach 11- i 22-dniowych przez komercyjnego satelitę TerraSAR-X. Zasięg scen użytych do przetwarzania poszczególnych obszarów przedstawia rys. 24.

Tabela 6. Parametry techniczne rejestracji TerraSAR-X

Rodzaj danych	SAR SLC	
Satelita	TerraSAR-X	
Tryb obrazowania	Strip Map / Alternate Polarization	
Pasma X dł. fali	3,1 cm	
Rodzaj rejestracji	Descending, right-looking	
Numer ścieżki (<i>track</i>)	017 (Lewino), 032 (Berejów) 108 (Babiak)	
Kąty obrazowania	strip006: 29.9° - 32.4°, strip009: 33.9° - 36.6°	
Liczba użytych scen	LEWINO	60
	BEREJÓW	60
	BABIAK	60

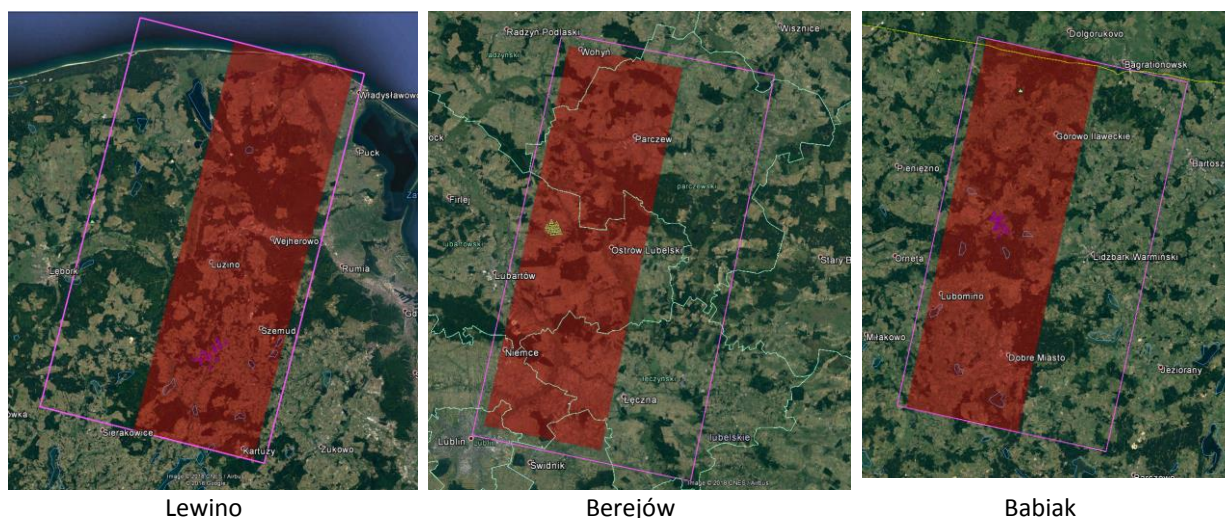


Rys. 24. Zasięg scen TerraSAR-X użytych to opracowania poligonów. Lokalizację reflektorów w obrębie poligonu zaznaczono kolorem różowym lub żółtym

Sceny TerraSAR-X obejmują nominalnie obszar 32 x 56 km przy rozdzielczości terenowej ok. 3 m (rys. 24). Dane rejestrowane były na zamówienie a rejestracje rozpoczęto po zainstalowaniu reflektorów radarowych w terenie. W początkowym okresie rejestracje wykonywano z najmniejszym możliwym interwałem czasowym 11 dni. Od czerwca 2015 r. zamawiano dane o 22-dniowym interwale.

6.1.3 Dane TerraSAR-X rejestrowane w trybie polaryzacji alternatywnej

Spośród 60 zamawianych rejestracji TerraSAR-X, zaprogramowano rejestrację 3 scen w trybie polaryzacji alternatywnej o polaryzacjach HH/VV. Z uwagi na to, że rejestracja dwóch kanałów polaryzacji odbywa się naprzemiennie, każda z polaryzacji wykorzystuje połowę pasma. Stąd szerokości scen w kierunku zasięgu (padania wiązki - *range direction*) są mniejsze (rys. 25). Pozyskanie danych polarymetrycznych posłużyło dla uzyskania polarymetrycznej charakterystyki reflektorów, jak i obszaru badań.

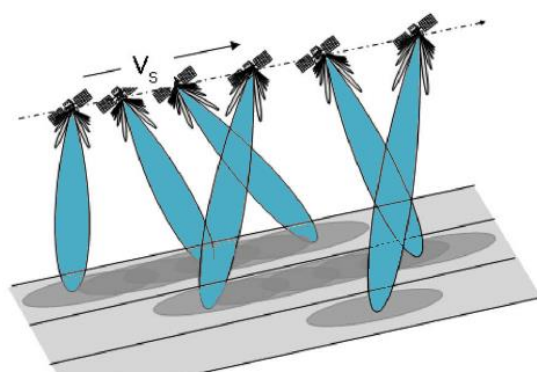


Rys. 25. Zasięgi scen TerraSAR-X rejestrowanych w trybie AP (czerwony) na tle zasięgu scen StripMap dla obszarów badań

6.1.4 Dane Sentinel-1

W momencie tworzenia wniosku projektowego misja Sentinel-1 była dopiero w trakcie tworzenia stąd pierwotnie dane Sentinel-1 nie były brane pod uwagę. Misja Sentinel-1 jest częścią europejskiego programu Copernicus i wszystkie dane są dostępne nieodpłatnie. Zakończone sukcesem wystrzelenie satelity Sentinel-1A (03 kwietnia 2014 r.) a następnie 1B (22 kwietnia 2016 r.) skłoniło wykonawców projektu do wykorzystania tych danych w niniejszym projekcie.

Dane Sentinel-1 dla obszarów lądowych są rejestrowane w typie *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. Rejestracja odbywa się impulsowo (*Bursts*) dla 3 pod-ścieżek (*sub-swath*) – IW1, IW2, IW3 (rys. 26).

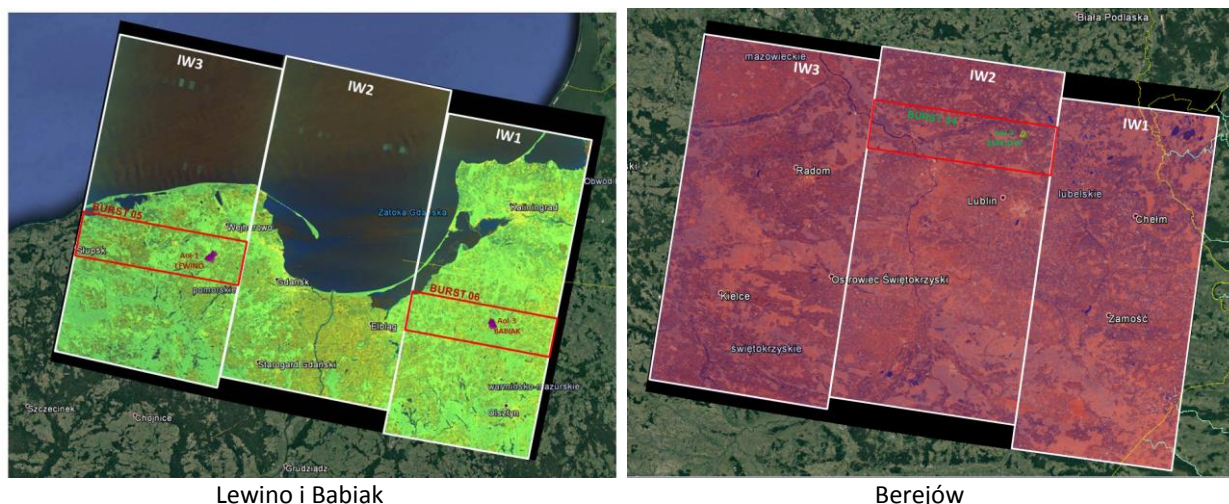


Rys. 26. Rejestracja danych SAR w trybie TOPS (De Zan and Guarnieri, 2006)

Rejestracja każdej pod-ścieżki odbywa się z jednoczesnym elektronicznym sterowaniem wiązką w kierunku azymutu (ruchu sensora – *azimuth direction*). Ruch wiązki – od tyłu do przodu. Zasięg scen użytych do przetwarzania poszczególnych obszarów przedstawia rys. 27 i tab. 7.

Tabela 7. Parametry techniczne rejestracji Sentinel-1

Rodzaj danych		SAR SLC
Satelita		Sentinel-1A, Sentinel-1B
Tryb obrazowania		Interferometric Wide (TOPS)
Pasma C dł. fali		5,4 cm
Rodzaj rejestracji		Descending, right-looking
Numer ścieżki (<i>relative orbit number</i>)		124 (Lewino, Babiak), 153 (Berejów)
Kąty obrazowania		20° - 45°
Liczba użytych scen	LEWINO + BABIAK	59
	BEREJÓW	64



Rys. 27. Zasięg scen Sentinel-1 ścieżek 124 i 153 użytych do opracowania. Lokalizację reflektorów w obrębie poligonu zaznaczono kolorem fioletowym lub żółtym

6.2 Kampanie pomiarowe w terenie

Kampanie pomiarowe GNSS i niwelacji precyzyjnej realizowano w odstępach półrocznych siłami pracowników PIG-PIB i Wydziału Geodezji UWM. Kampanie były prowadzone w następujących terminach (tab. 8):

Tabela 8: Daty przeprowadzenia pomiarów terenowych

Kampania pomiarowa	Poligon AOI-1 Lewino	Poligon AOI-2 Berejów	Poligon AOI-3 Babiak
I	19 – 20.08.2014	25 – 26.08.2014	22 – 23.08.2014
II	08 – 09.02.2015	02 – 03.02.2015	05 – 06.02.2015
III	11 – 12.09.2015	19 – 20.08.2015	08 – 09.09.2015
IV	07 – 08.03.2016	02 – 03.03.2016	05 – 06.03.2016
V	01 – 02.08.2016	26 – 27.07.2016	29 – 30.07.2016

W trakcie pomiarów wykorzystywano 12 odbiorników precyzyjnych GNSS różnych producentów (HiTarget V30, Trimble SPS881 oraz R8, Topcon Hiper+, Javad Alpha). Pomiaru na poszczególnych typach punktów przebiegały według następującego schematu:

- punkty referencyjne: (4 zewnętrzne + 4 wewnętrzne) – dwie 8-godzinne sesje pomiarowe
- reflektory: dwie 4 godzinne sesje pomiarowe

Pomiary prowadzono metodą statyczną z interwałem pomiarowym 10 s i minimalną wysokością satelity nad horyzontem 0° .

Z uwagi wymaganą dużą liczbę odbiorników GNSS, pomiary te wykonywano jedynie na wybranych, reprezentatywnych obiektach, używając dostępnego sprzętu. Były to następujące punkty (reflektory):

Lewino: 01, 02, 03, 05, 06, 07, 09, 10, 12, 13

Babiak: 06, 07, 09, 10, 11, 12, 6, 17

Berejów: 01, 05, 06, 08, 13, 15, 17, 18

Niwelacja precyzyjna była prowadzona przez zespół pracowników Wydziału Geodezji UWM w tym samym czasie co pomiary GNSS lub w tygodniach późniejszych. Niwelacja była prowadzona z zachowaniem procedur pomiarowych oraz dokładności niwelacji precyzyjnej II klasy wg wytycznych technicznych G-21. Do przeprowadzenia pomiarów w terenie wykorzystywano cyfrowy niwelator precyzyjny Leica DNA 03 z kompletem inwarowych łąt kodowych. Łaty ustawiano na klinach wbijanych w grunt. Ogólna długość pojedynczej kampanii pomiarowej na 3 poligonach wynosiła 72 km.

Metodą niwelacji precyzyjnej mierzona była cała sieć pomiarowa, wszystkie repery i reflektory (rys. 28).



Lewino

Berejów

Babiak

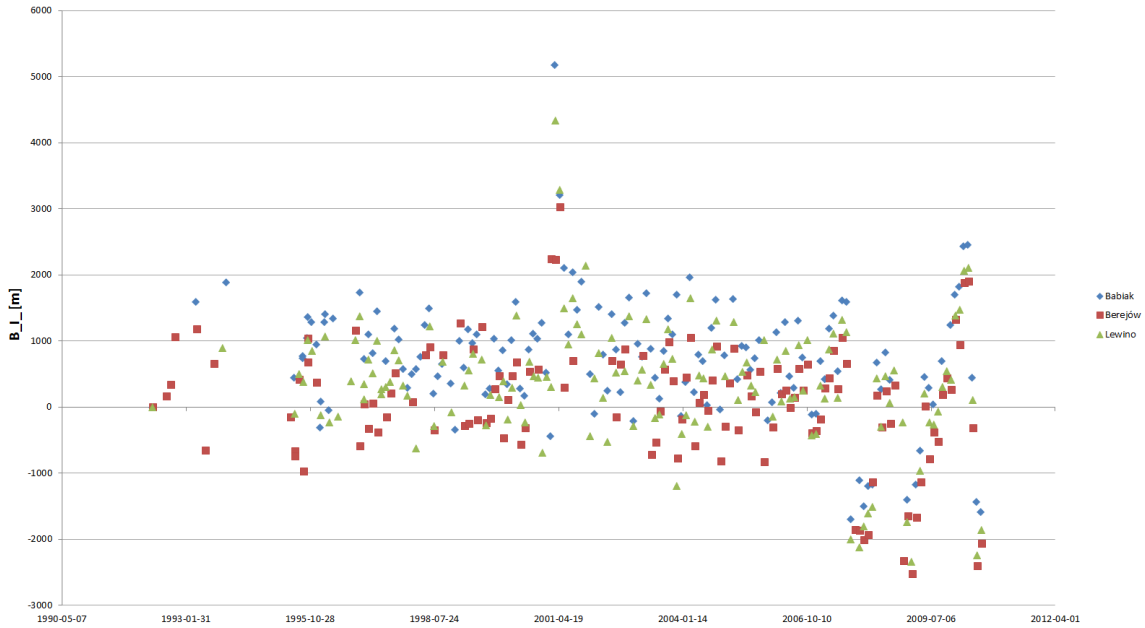
Rys. 29. Szkice ciągów niwelacji precyzyjnej

6.3 Przetwarzanie danych satelitarnych metodą InSAR

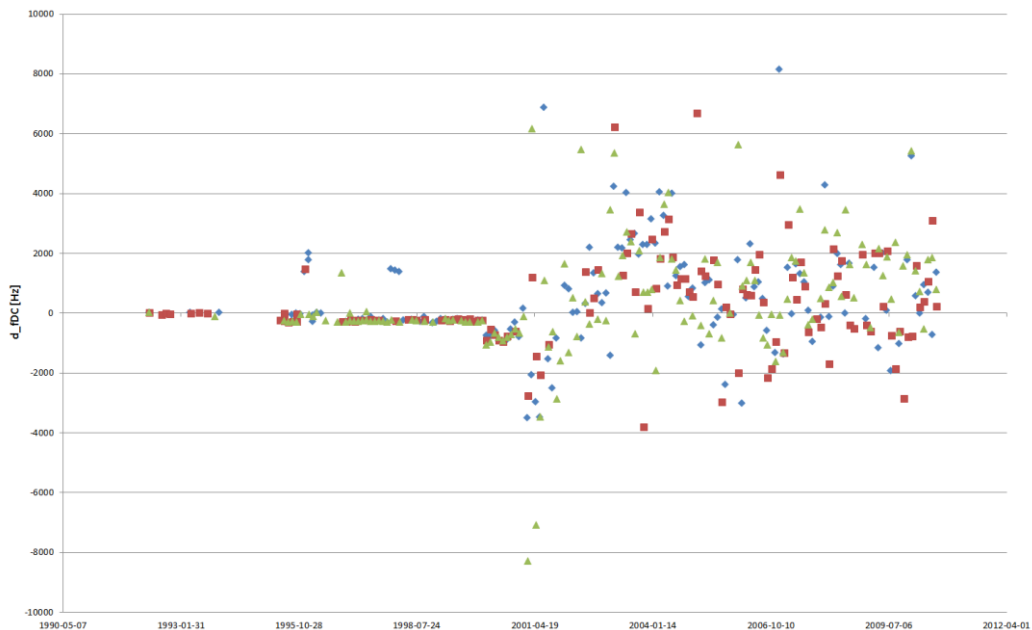
Dla każdego z obszarów przetworzono 4 serie danych: ERS-1/2, Envisat, TerraSAR-X oraz Sentinel1A/B. Dane archiwalne (ERS-1/2 i Envisat) przetwarzano metodami PSI i SBAS. Dane TerraSAR-X i Sentinel-1 rejestrowane były po posadowieniu reflektorów w związku z czym przetwarzano je trzema metodami: PSI, SBAS i CRInSAR (PTA). Daje to łącznie 10 przetworzeń serii dla każdego z obszarów badań. Z uwagi na bardzo różną jakość danych nie dla wszystkich przetworzeń udało się uzyskać ostateczne wyniki.

6.3.1 Przetwarzanie archiwalnych danych z satelitów ERS-1/2

Dane ERS-1/2 obejmują okres rejestracji od kwietnia 1992 r. (początek działania satelity ERS-1) do sierpnia 2010 r. (zakończenie misji ERS-2). Należy zauważyć, że w latach 1992 i 1993 zarejestrowano jedynie pojedyncze sceny a w 1994 żadnej, co było spowodowane przestawieniem anteny SAR w inny tryb i zmianą wysokości orbity (rys. 29). Bardziej regularne rejestracje następują dopiero od czerwca 1995. Warto również zwrócić uwagę na duże wartości średniej częstotliwości Dopplera występujące od stycznia 2001 roku (rys. 30). Spowodowane było to awarią żyroskopów, która uniemożliwiła prawidłowe (prostopadle do kierunku lotu) ustawienie anteny SAR (Miranda et al., 2003). Po tym okresie jedynie niewiele scen nadaje się do praktycznego wykorzystania (Marinkovic et al., 2006). Największą wadą archiwalnych danych ERS-1/2 jest ich nieregularne pokrycie czasowe. W owym czasie obszar Polski nie będącej członkiem UE ani NATO był skanowany bardzo nieregularnie z uwagi na niski priorytet. Powoduje to duże wartości baz czasowych dla poszczególnych interferogramów (rys. 29 i 30) i niskie wartości koherencji. Zważywszy na bardzo małe zurbanizowanie obszarów badań powoduje to praktyczny brak możliwości obserwacji serii czasowych deformacji.



Rys. 29. Interferometryczna charakterystyka wszystkich użytych w opracowaniu danych ERS-1/2 – odległości bazowe ($B_{||}$)



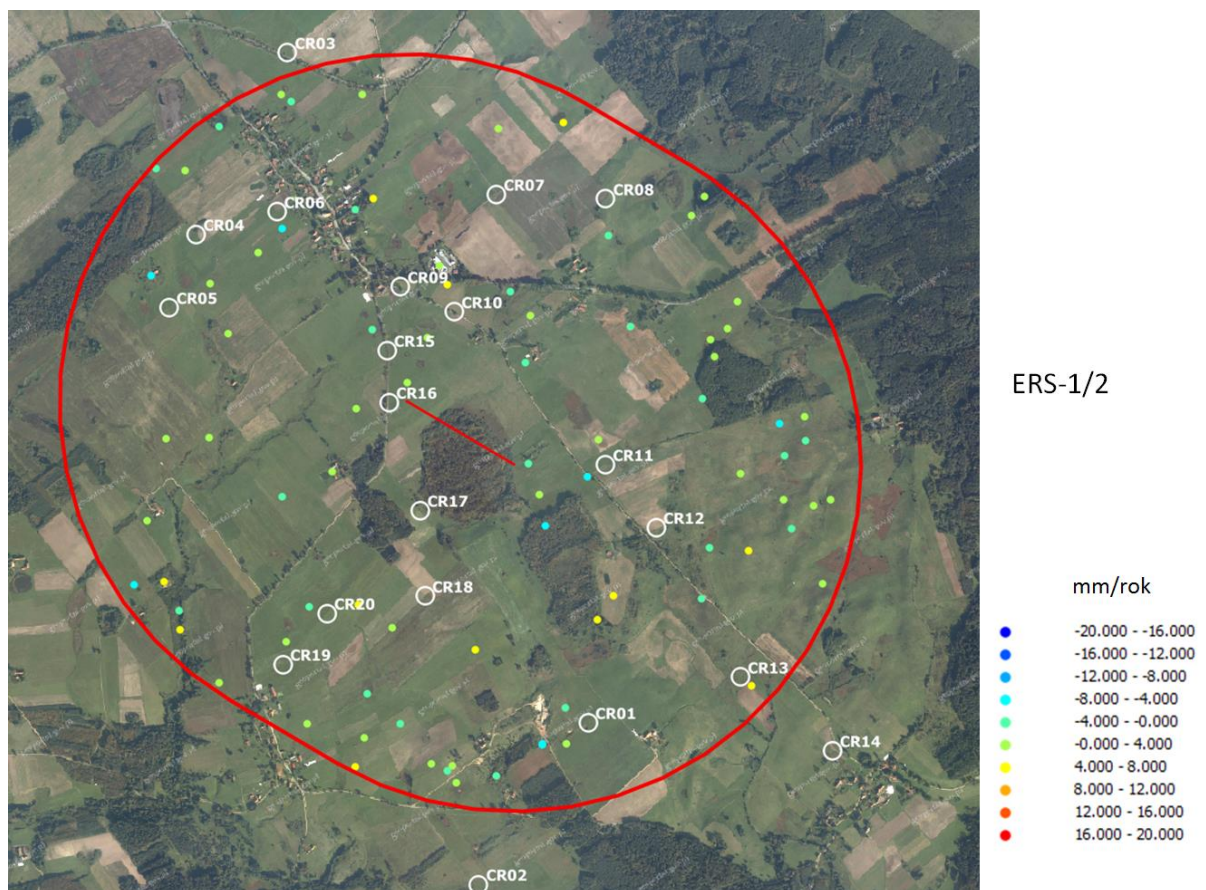
Rys. 30. Interferometryczna charakterystyka wszystkich użytych w opracowaniu danych ERS-1/2 – względna częstotliwość Dopplera (d_{fDC})

W trakcie przetwarzania poszczególnych obszarów okazało się, że część scen o dużych wartościach Delta f_{DC} i $B_{||}$ należało odrzucić (rys. 29, 30). Na dalszych etapach przetwarzania okazało się konieczne odrzucenie scen o niskiej jakości orbitach. Dalsze

przetwarzanie prowadzono na zredukowanych zbiorach (Lewino – 38 scen, Berejów – 32 sceny, Babiak – 22 sceny). Przetwarzaniu metodami PSI i SBAS poddano obszar ok. 15 x 20 km, w centrum którego znajdował się poligon badawczy. Przetwarzanie większego obszaru było konieczne z uwagi na współrejestrację danych. Dla obszaru poligonów uzyskano niewielką liczbę punktów dla obu metod (tab. 9, rys. 31). W niektórych przypadkach obliczenia zakończyły się niepowodzeniem z uwagi na zbyt duże bazy czasowe i geometryczne oraz dodatkowo brak koherencji spowodowany bardzo słabym zurbanizowaniem obszarów. Skutkowało to niemożliwością uzyskania odpowiedniej ilości PSC stabilnych w czasie dla prawidłowego skonstruowania sieci inicjalnej.

Tabela. 9. Liczba PS / DS otrzymanych w wyniku przetwarzania danych ERS-1/2 dla poszczególnych obszarów badań.

Obszar badań	PSI	SBAS
LEWINO	79	-
BEREJÓW	-	-
BABIAK	83	4



Rys. 31. Przykładowa charakterystyka punktów PS dla obszaru AOI1 – Babiak. Dane ERS-1/2

Dla obszarów Lewino i Babiak, otrzymane punkty charakteryzują się prędkościami deformacji w zakresie -4 do 4 mm/rok, które nie wykazują przestrzennego uporządkowania, które mogłoby wskazywać na powstawanie lokalnych niecek osiadań / podniesień. Otrzymane wyniki pozwalają scharakteryzować te obszary jako stabilne.

6.3.2 Przetwarzanie archiwalnych danych z satelity Envisat

Dane te obejmują okres od listopada 2002 roku do sierpnia 2009 roku. 9 maja 2012 roku Envisat uległ nieodwracalnej awarii. Dla obszarów badawczych zarejestrowanych zostało niewiele scen: Lewino – 18 scen, Berejów – 16 scen, Babiak – 6. Mała liczba zarejestrowanych danych wiąże się z niskim priorytetem obserwacji, jak również z innymi zastosowaniami anteny SAR na obszarach nadmorskich. Należy zauważyć, że obszary Lewino i Babiak leżą w bezpośrednim sąsiedztwie Bałtyku, którego obszar był skanowany w innym trybie, przeznaczonym do obserwacji sfalowania powierzchni wód (*Wave Mode*).

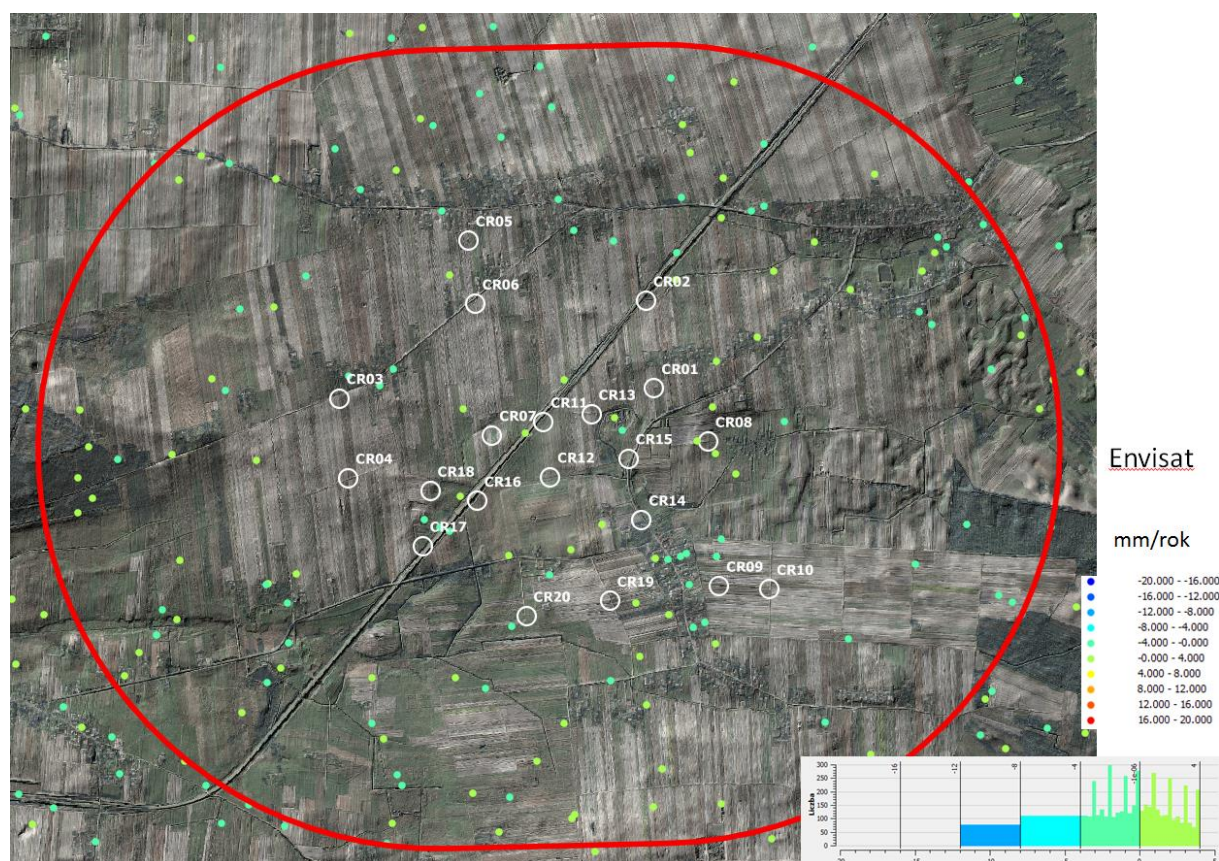
Konieczność przestawienia trybu rejestracji wymaga czasu co powoduje częsty brak danych dla obszarów przybrzeżnych. Mała liczba scen wpływa na duże wartości baz czasowych dla poszczególnych interferogramów i niskie wartości koherencji, co znacznie utrudnia konstrukcję interferogramów dla serii czasowych.

Podobnie jak w przypadku danych ERS-1/2 przetwarzaniu poddano obszar ok. 15 x 20 km, w którego centrum znajdował się poligon badawczy. Pomimo znacznie lepszych charakterystyk radiometrycznych i dokładniejszych orbit, przetwarzanie danych Envisat metodami PSI i SBAS dało w większości przypadków wynik negatywny. Z uwagi małą liczbę interferogramów oraz duże bazy czasowe i geometryczne nie udało się uzyskać odpowiedniej ilości PSC stabilnych w czasie dla prawidłowego skonstruowania sieci inicjalnej. Przetwarzanie danych Envisat zakończyło się powodzeniem jedynie dla obszarów Lewino i Berejów (tab. 10).

Tabela. 10: Liczba PS / DS otrzymanych w wyniku przetwarzania danych Envisat dla poszczególnych obszarów badań.

Obszar badań	PSI	SBAS
LEWINO	-	17
BEREJÓW	139	-
BABIAK	-	-

Dla obszaru Berejów otrzymany zbiór PS charakteryzuje się prędkościami deformacji w przedziale -20 do 20 mm/rok, przy czym zdecydowana większość i wszystkie punkty z obszaru poligonu badawczego mieszczą się w zakresie -4 do 4 mm/rok (rys. 32). Rozmieszczenie przestrzenne różnych wartości deformacji nie wykazuje uporządkowania, co świadczy o braku występowania obszarów osiadania/podnoszenia.

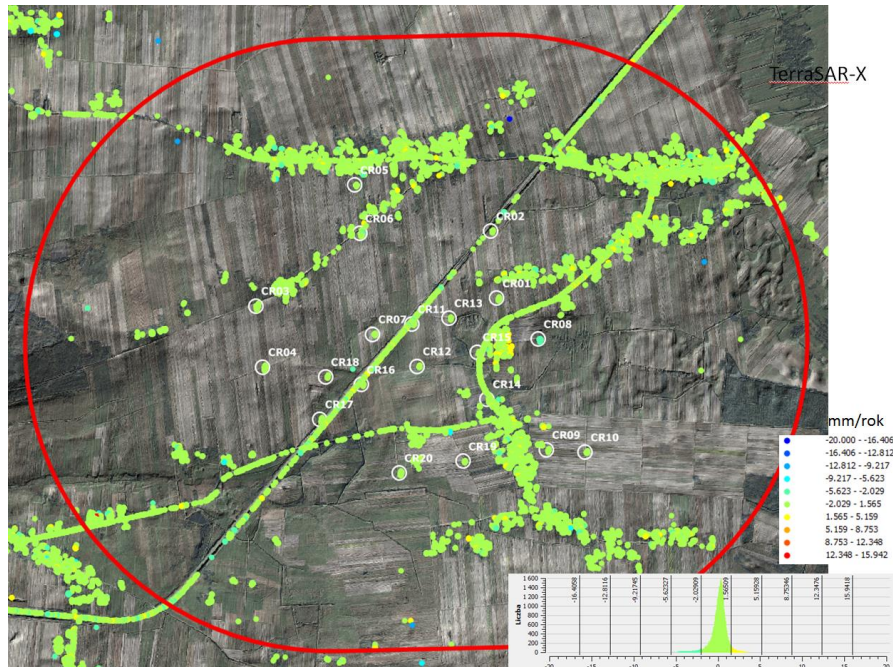


Rys. 32. Przykładowe wyniki obliczeń Envisat PSI dla poligonu Berejów

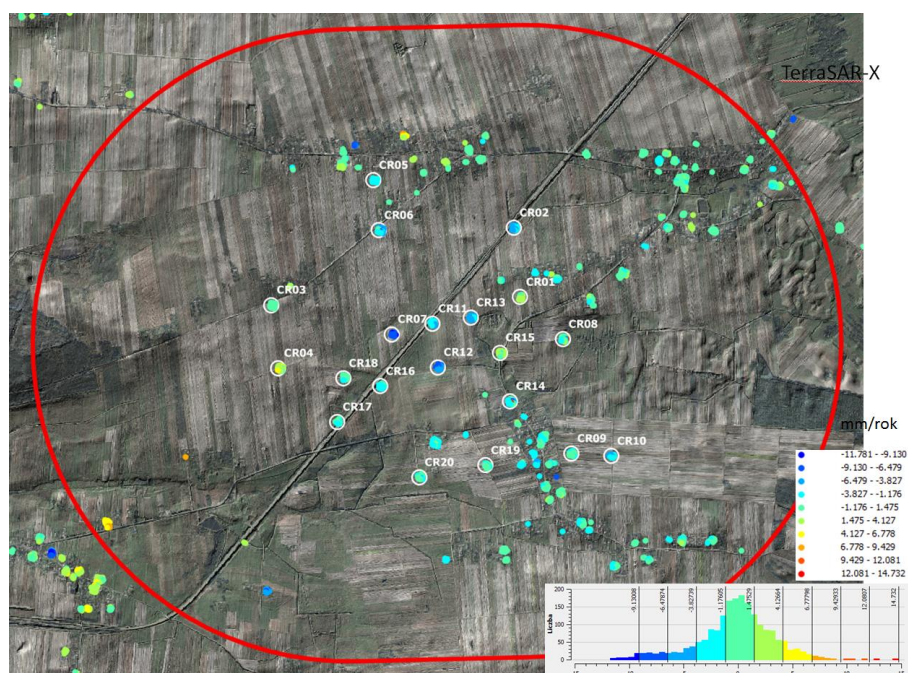
6.3.3 Przetwarzanie danych z satelity TerraSAR-X

Przetwarzanie danych TerraSAR-X prowadzono trzema metodami: PSI, SBAS i PTA dla obszaru ok. 8 x 8 km, w którego środku znajdował się teren badań. Dobre charakterystyki radiometryczne, małe odległości bazowe, jak i stałe wartości baz czasowych umożliwiły otrzymanie bardzo dobrych wyników przetworzeń interferometrycznych dla wszystkich obszarów i metod. Otrzymano bardzo dużą liczbę PS / DS dla każdego z obszarów i średnią gęstość powyżej 1000 PS(DS)/km². Punkty PS są związane przede wszystkim z terenami zabudowanymi, budynkami i ciągami komunikacyjnymi utwardzonymi. W zbiorze PS znalazły się również wszystkie reflektory radarowe. Dla całego zbioru wartości średniej prędkości deformacji wahają się w granicach -20 do 20 mm/rok, przy czym ekstremalne wartości przyjmują jedynie pojedyncze punkty PS. Można je interpretować jako błędy obliczeniowe lub pojedyncze obiekty infrastruktury wykazujące dynamikę niezależną od powierzchni terenu. Zdecydowana większość punktów charakteryzuje się deformacjami w przedziale -2 / 2 mm rok przy czym wartości te nie wykazują uporządkowanego charakteru przestrzennego mogącego świadczyć o występowaniu niecki obniżen / podniesien (rys. 33).

Dla metody SBAS wielkości średniej prędkości deformacji wahają się w zakresie -30 do 30 mm/rok, przy czym wartości dla większości punktów grupują się w przedziale -6 do 6 mm/rok. Wyższe aniżeli w przypadku PS wartości średniej prędkości deformacji związane są z fizyczną naturą DS: są to uśrednione odbicia od obiektów o złożonej charakterystyce przez co są bardziej wrażliwe na zmiany środowiskowe (wilgotność, temperatura). Punkty DS również występują w obszarach zabudowanych, jednak spora ich część zlokalizowana jest również na obszarach pól uprawnych (rys. 34). Stanowią one doskonałe uzupełnienie danych ze zbioru PSI. Również i w tym przypadku nie obserwuje się uporządkowanego, przestrzennego charakteru, który można by wiązać z nieką osiadań / podniesień. Także w tej metodzie reflektory radarowe zostały zaklasyfikowane jako punkty DS.



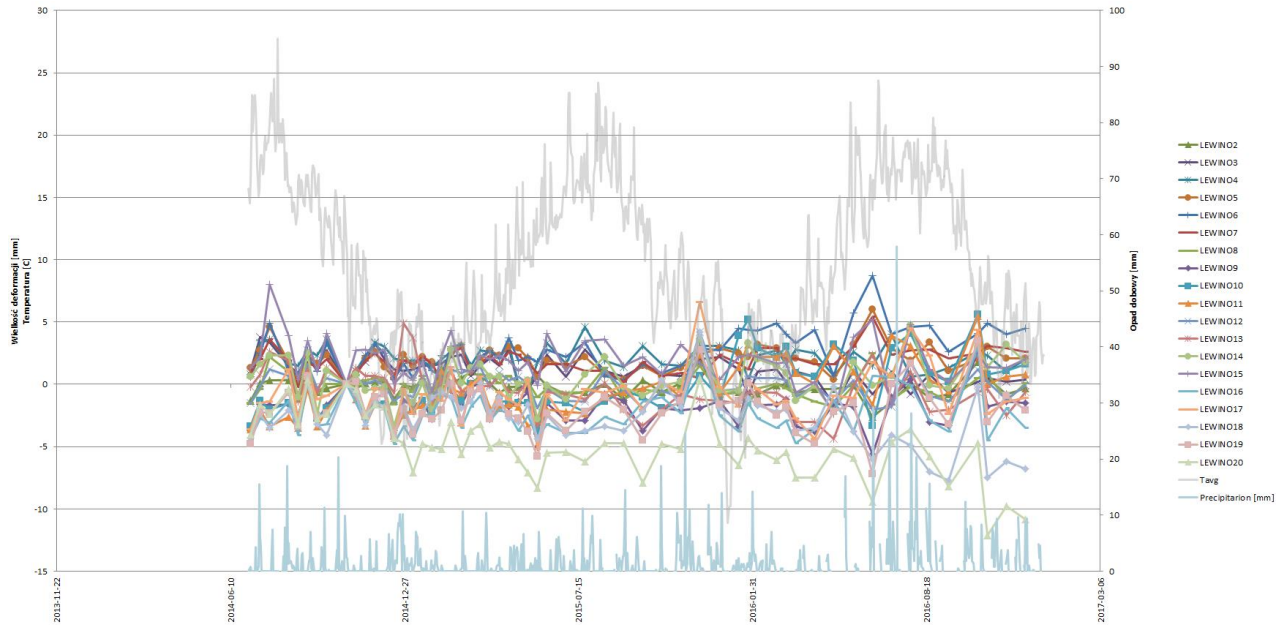
Rys. 33. Przykładowe wyniki obliczeń TerraSAR-X PSI dla poligonu Berejów



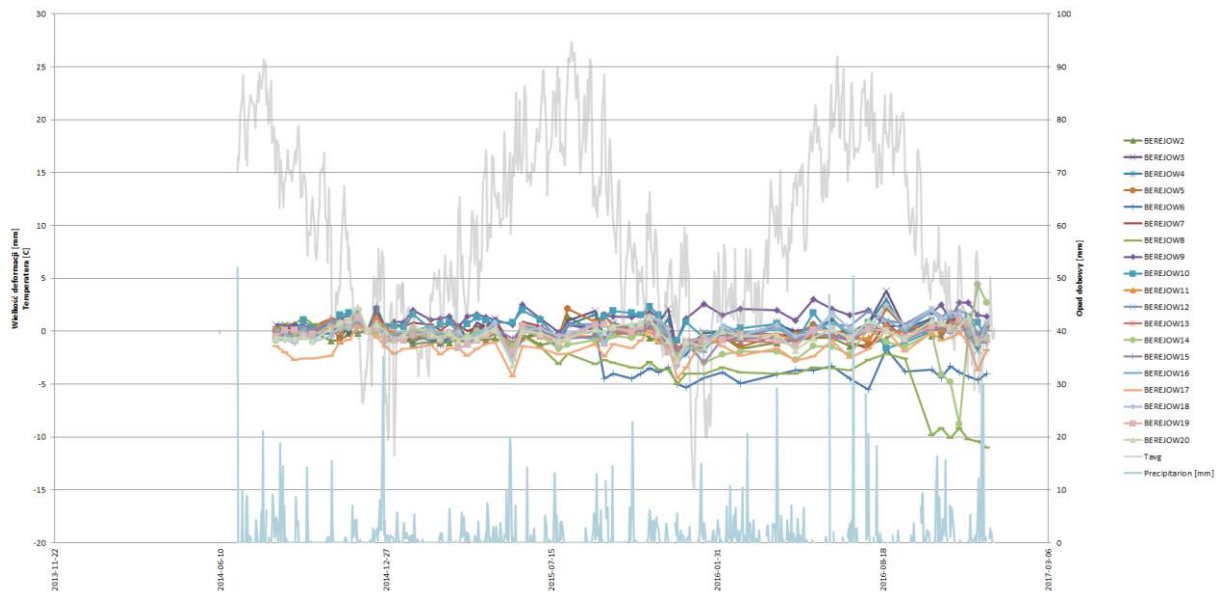
Rys. 34. Przykładowe wyniki obliczeń TerraSAR-X SBAS dla poligonu Berezów

6.3.4 Przetwarzanie danych z satelity TerraSAR-X metodą CRInSAR

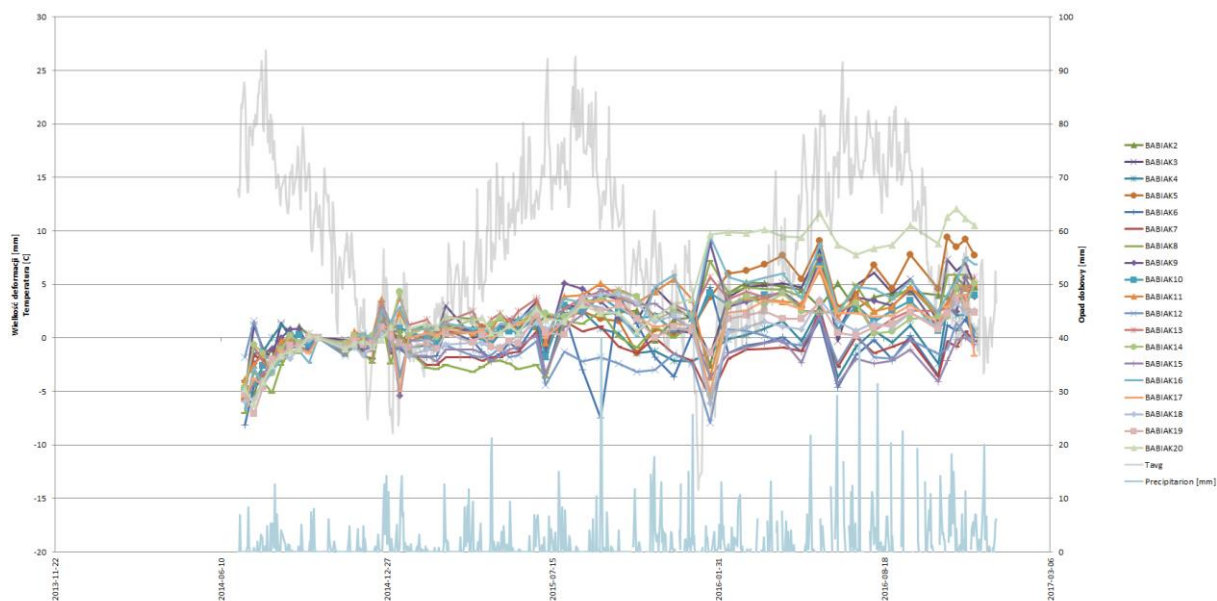
W metodzie tej wykorzystuje się jedynie fazę reflektorów radarowych. Ekstrakcji wartości fazowych dokonuje się w oparciu o znane współrzędne reflektorów. Obliczeń dokonuje się względem sceny referencyjnej (dla obszaru Lewino: 21.10.2014 r., Berezów: 05.12.2014 r., Babiak: 05.10.2014 r.) i jednego z reflektorów (zawsze był to CR01). Otrzymane w ten sposób wielkości podwójnych różnic (*double differences*) charakteryzują względne przemieszczenia w czasie (rys. 35 – 37). Dla obszarów Lewino i Babiak reflektory nie podlegały istotnym przemieszczeniom. Zarejestrowane ruchy o średniej amplitudach -4 do 4 mm (Lewino) oraz -5 do 5 mm (Babiak) spowodowane są zmianami sezonowymi i termicznymi. Z zestawienia (rys. 36) wynika, że dla obszaru Berezów reflektory również nie podlegały istotnym przemieszczeniom. Zarejestrowane ruchy o średniej amplitudzie -5 do 5 mm spowodowane są zmianami sezonowymi i termicznymi. Zaobserwowano anomalie dla CR 08 i CR14. Oba reflektory wykazały gwałtowne zwiększenie deformacji w październiku 2016 r.



Rys. 35. Zestawienie podwójnych różnic dla reflektorów radarowych poligonu Lewino. Obliczenia względem CR01 i sceny TerraSAR-X zarejestrowanej 21.10.2014 r. Dane meteorologiczne ze stacji Łeba na podstawie Global Historical Climatology Network (GHCN)



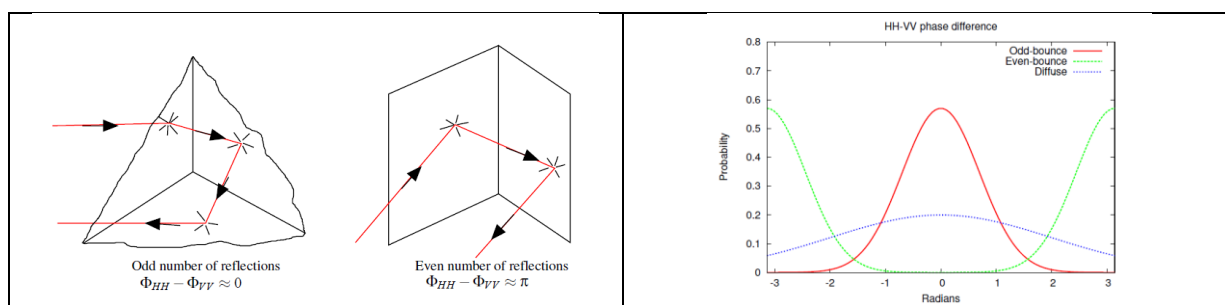
Rys. 36. Zestawienie podwójnych różnic dla reflektorów radarowych poligonu Berejów. Obliczenia względem CR01 i sceny terraSAR-X zarejestrowanej 05.12.2014 r. Dane meteorologiczne ze stacji Włodawa na podstawie Global Historical Climatology Network (GHCN)



Rys. 37. Zestawienie podwójnych różnic dla reflektorów radarowych poligonu Babiak. Obliczenia względem CR01 i sceny TerraSAR-X zarejestrowanej 05.10.2014 r. Dane meteorologiczne ze stacji Elbląg na podstawie Global Historical Climatology Network (GHCN)

6.3.5 Analiza danych polarymetrycznych TerraSAR-X

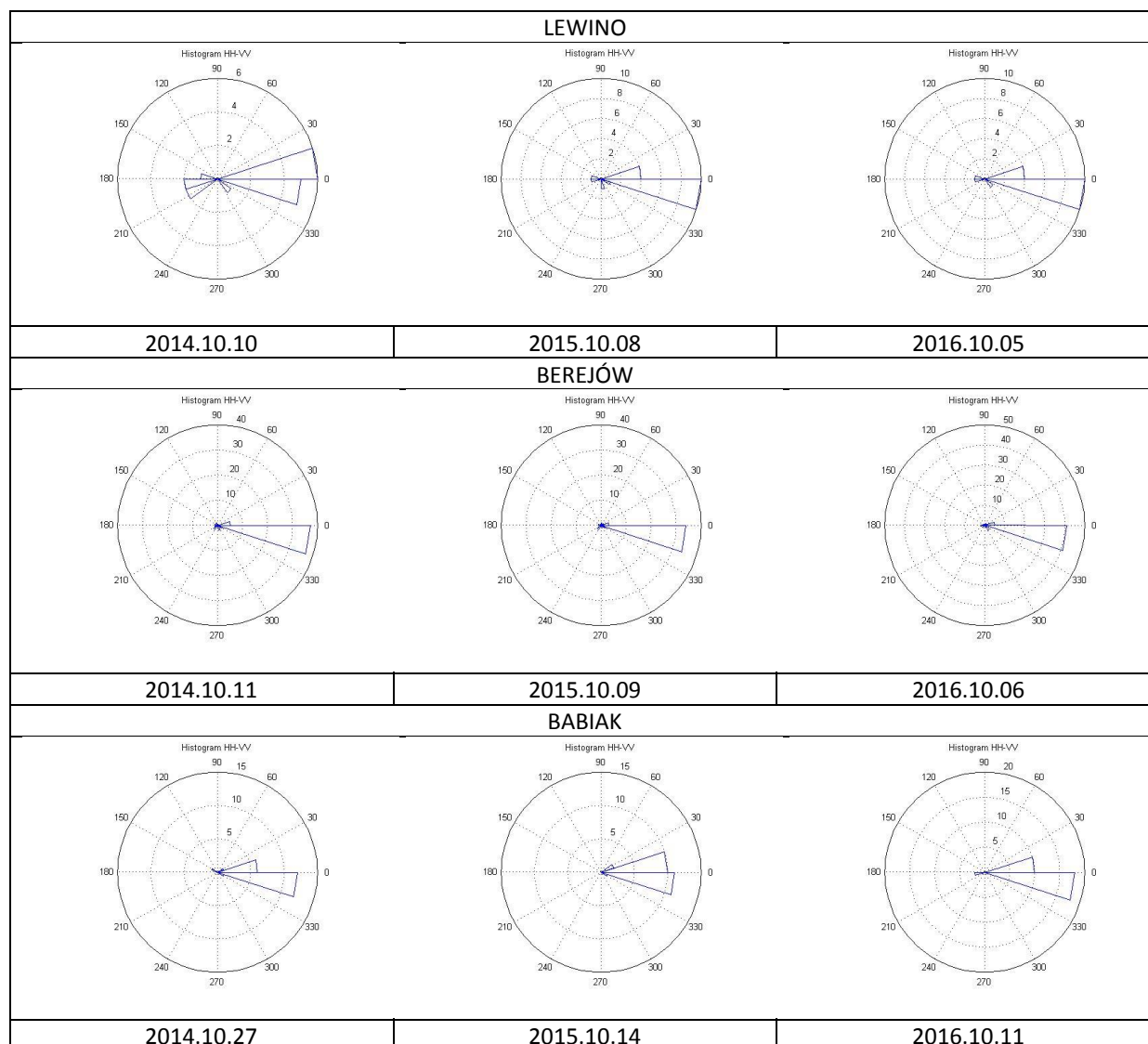
W przypadku zobrażeń polarymetrycznych występuje zjawisko zmiany kąta fazy pomiędzy komponentami VV i HH. Polega ono na wzajemnym przesunięciu o wielkość π (180 stopni) fazy pomiędzy HH i VV (Cloude, Pottier, 1996). Zjawisko to ma miejsce dla reflektorów dwuściennych (lub ogólniej dla parzystej liczby odbić) przy kątach padania wiązki w zakresie $20 \div 70^\circ$ (rys. 38).



Rys.38. Wpływ mechanizmu odbicia na polaryzację (Inglada et al., 2004)

Dla danych TerraSAR-X zarejestrowanych w trybie ko-polaryzacyjnym VV/HH przeprowadzono obliczenia różnicy fazy komponentów metodą zaproponowaną przez Ingladę (Inglada et al., 2004). Obliczono parametry tzw. autointerferogramu: $\Phi_{hh} - \Phi_{vv}$ oraz $\Phi_{hh} + \Phi_{vv}$ dla pikseli o największych wartościach amplitudy (wartość progowa amplitudy = 1500). Na rysunku 39 przedstawiono wykresy kąta fazy $\Phi_{hh} - \Phi_{vv}$ dla trzech obrazów VV/HH dla

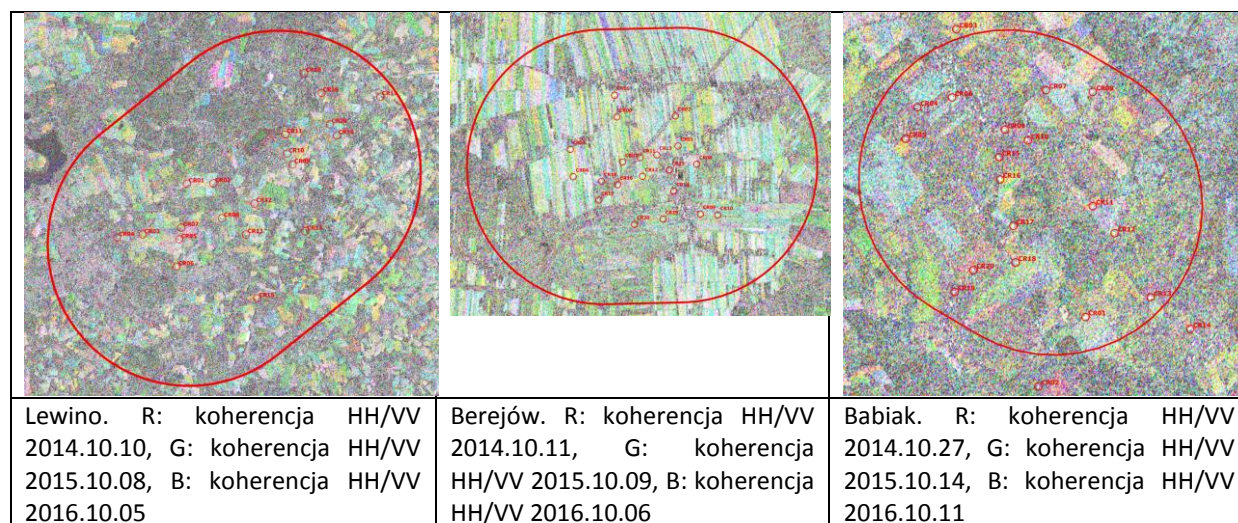
obszarów badań. Dla wszystkich rejestracji uzyskano tylko jedno maksimum, co świadczy o niezmiennym, trójściennym charakterze odbić.



Rys. 39. Histogramy fazy interferometrycznej autointerferogramów dla obszarów badawczych

Analiza wieloczasowa koherencji autointerferogramu (rys. 40). Utrata koherencji pomiędzy komponentami HH i VV jest rezultatem rozpraszania objętościowego. Oba komponenty będąc wrażliwe na odbicia od poziomo zorientowanych fragmentów roślin sprawiają, że centra fazowe dla komponentu HH i VV nie są tożsame, generując tym samym różnice fazy. Kompozycja RGB obrazów koherencji autointerferogramów wykazuje dużą zmienność czasową dla obszarów upraw. Spowodowane jest to zmiennością typów upraw w poszczególnych latach lub / i różną dojrzałością czy prowadzeniem prac polowych w różnym czasie. Obszary leśne, nieużytków, zadrzewień, ogrodów będąc słabo zmiennymi w czasie wykazują ogólnie niską koherencję (rozpraszanie objętościowe za każdym razem). Reflektory

wykazują niezmienną w czasie i bardzo wysoką koherencję, co potwierdza ich stabilność w czasie i niezmiennosc ich orientacji.



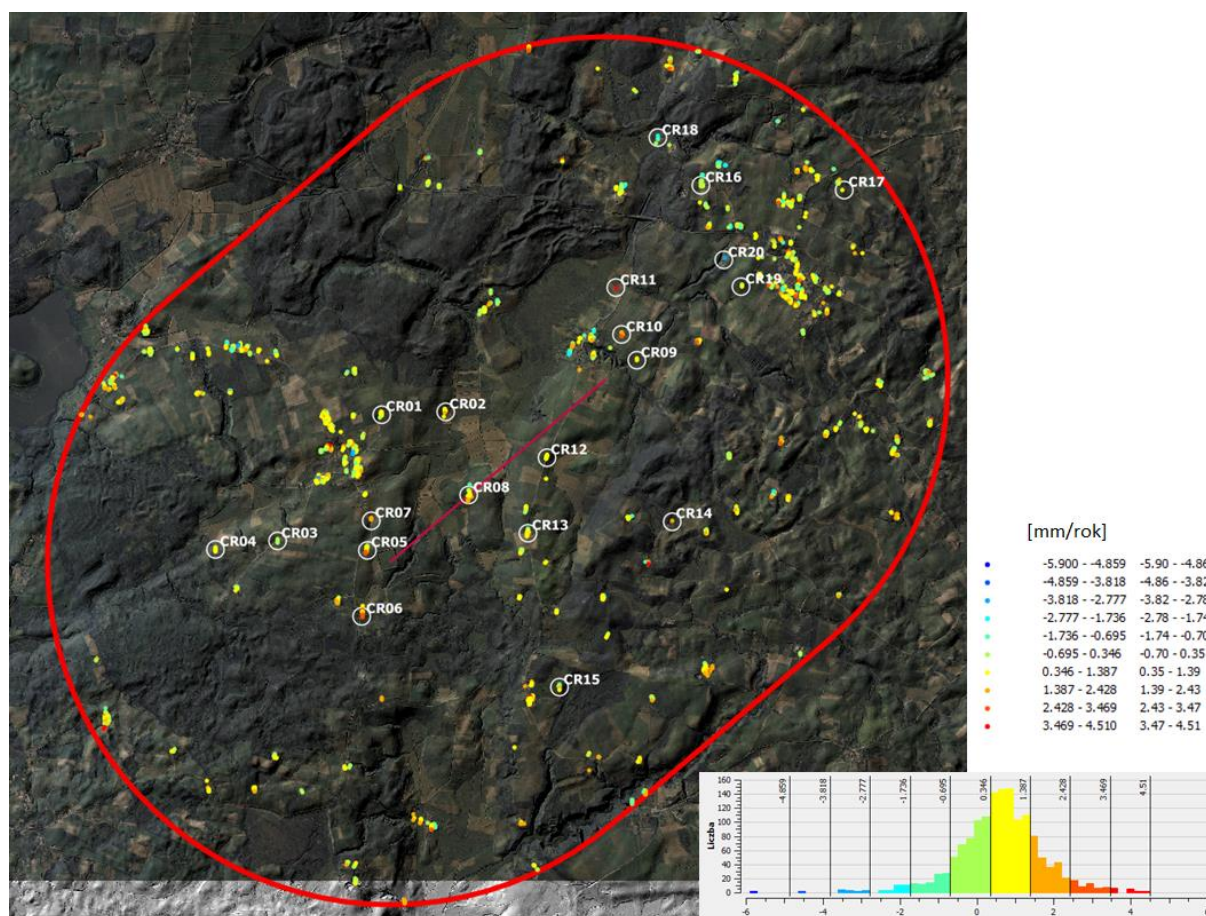
Rys. 40. Analiza wieloczasowa koherencji autointerferogramów

6.3.6 Przetwarzanie danych z satelity Sentinel-1

Dane Sentinel-1 przetwarzano dla całego obszaru odpowiedniego impulsowi (*Burst*) i pod-ścieżki metodami PSI oraz CRInSAR. Dane Sentinel-1 charakteryzują się scenami o rozległym zasięgu przestrzennym, bardzo małymi wartościami baz geometrycznych jak i bardzo dużą rozdzielczością czasową (6 dni). Gwarantuje to dużą liczbę kombinacji interferometrycznych i bardzo wysoką koherencję interferogramów. Jednocześnie komplikuje przetwarzanie danych od strony technicznej, które poza dodatkowymi operacjami koniecznymi do przetwarzania danych w trybie TOPS wymaga ogromnych ilości pamięci operacyjnej i dyskowej. Te właśnie powody techniczne zadecydowały, że musiano zrezygnować z przetwarzania danych Sentinel-1 metodą SBAS. Przeprowadzone wstępne testy zakończyły się niepowodzeniem z uwagi na zbyt skromne zasoby sprzętowe.

W wyniku obliczeń otrzymano zbiory PS dla obszarów poligonu (tj. wewnątrz obszaru potencjalnych wpływów). Gęstość występowania PS wynosi odpowiednio 51 PS/km² (Lewino), 161 PS/km² (Berejów) oraz 37 PS/km² (Babiak). Wielkości deformacji określone na podstawie danych Sentinel-1 mieszczą się w zakresie -5 do 5 mm/rok, przy czym dla zdecydowanej większości punktów wartości te mieszczą się w granicach -0.7 do 1.4 mm/rok. Punkty PS występują w obrębie terenów zabudowanych jak i dla indywidualnych budynków. Wszystkie reflektory radarowe zostały rozpoznane jako PS. Nie zidentyfikowano

uporządkowanego, przestrzennego charakteru deformacji, który można by wiązać z niecką osiadań / podniesień (rys. 41).

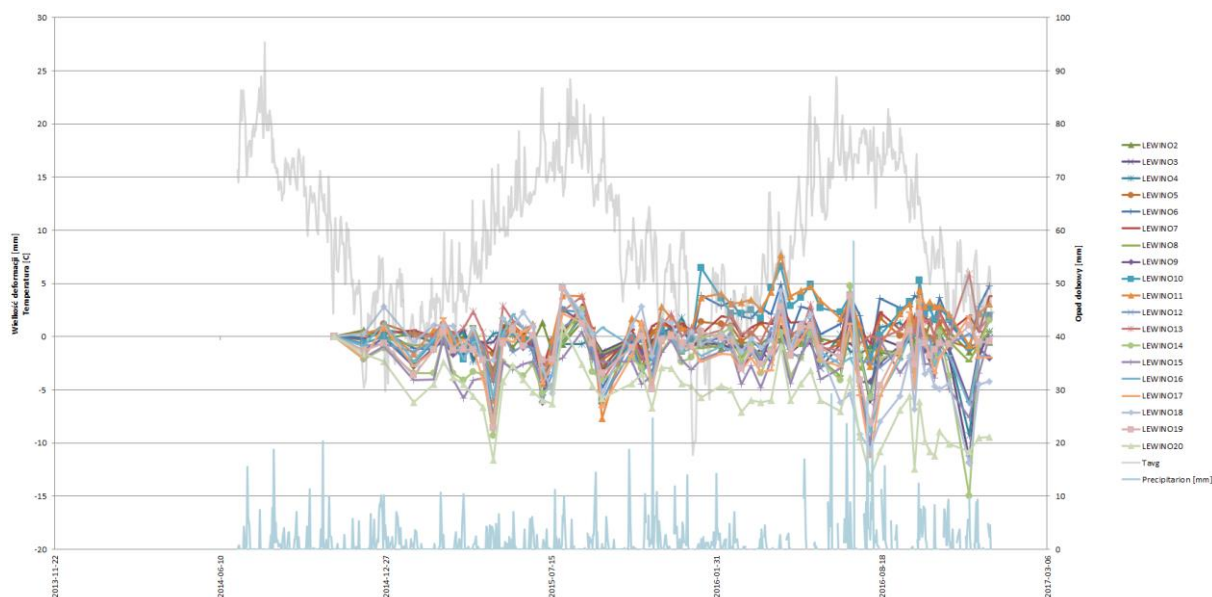


Rys. 41. Przykładowa charakterystyka punktów PS dla obszaru AOI1 – Lewino. Dane Sentinel-1

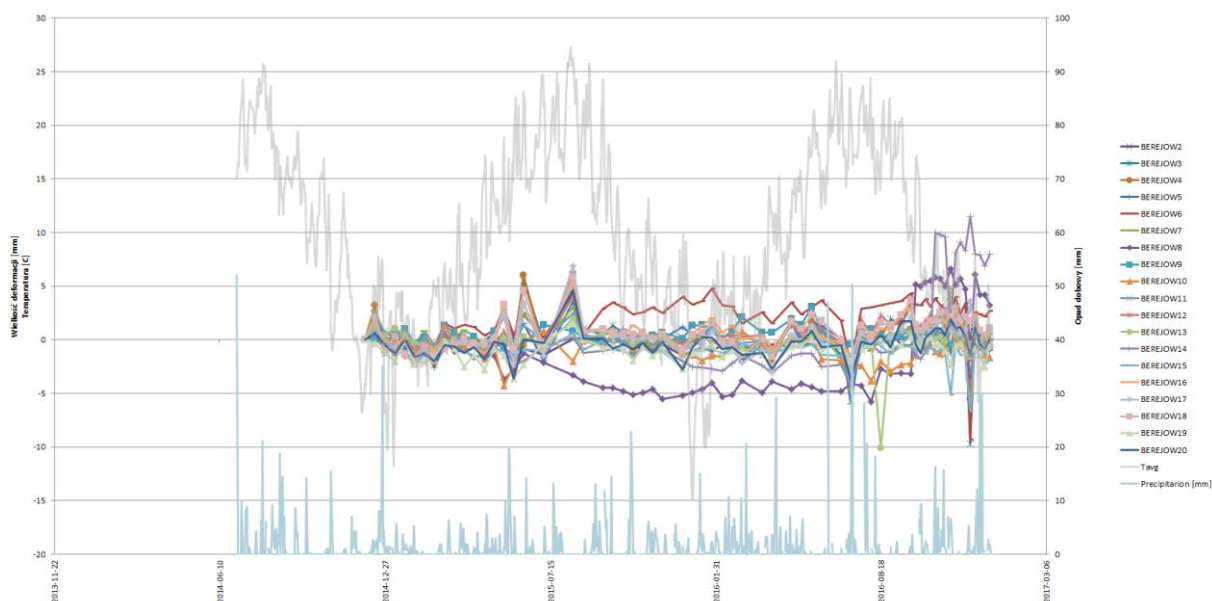
6.3.7 Przetwarzanie danych z satelity Sentinel-1 metodą CRInSAR

Podobnie jak w przypadku danych TerraSAR-X wykorzystano wyseparowane w oparciu o znane współrzędne reflektorów wartości fazy reflektorów radarowych. Obliczeń dokonano względem sceny referencyjnej (w przypadku obszarów Lewino I Babiak: 26.10.2014 r. oraz 03.12.2014 r. dla obszaru Berejów) i za każdym razem dla reflektora CR01. Otrzymane w ten sposób wielkości podwójnych różnic (*double differences*) charakteryzują względne przemieszczenia w czasie. Z zestawienia (rys. 42 – 44) wynika, że dla obszaru Lewino reflektory nie podlegały istotnym przemieszczeniom. Dla reflektora 13 dane fazowe z danych zarejestrowanych 26.10 i 01.12 2014 r. musiały zostać odrzucone z powodu błędów o nieznanym przyczynie. Zarejestrowane ruchy o średniej amplitudzie -5 do 5 mm spowodowane są zmianami sezonowymi i termicznymi. Dla obszaru Berejów reflektory nie

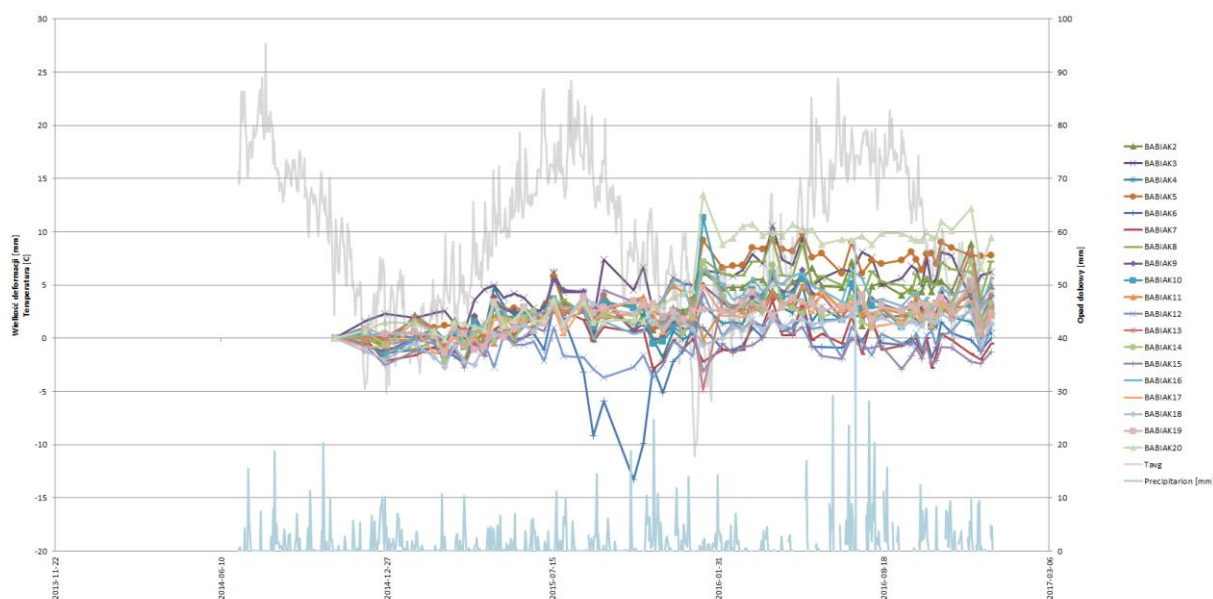
podlegały istotnym przemieszczeniom. Zarejestrowane ruchy o średniej amplitudzie -5 do 5 mm spowodowane są zmianami sezonowymi i termicznymi. Na podstawie danych Sentinel-1 potwierdzono ruch reflektorów CR08 i CR14, który wystąpił w październiku 2016 r. Dla obszaru Babiak zarejestrowano ruchy o średniej amplitudzie -2 do 8 mm spowodowane zmianami sezonowymi i termicznymi. Niewielki trend wskazujący na nieznaczne podnoszenie wszystkich reflektorów również jest związany z czynnikami obliczeniowymi.



Rys. 42. Zestawienie podwójnych różnic dla reflektorów radarowych poligonu Lewino. Obliczenia względem CR01 i sceny Sentinel-1 zarejestrowanej 26.10.2014 r. Dane meteorologiczne ze stacji Łeba na podstawie Global Historical Climatology Network (GHCN).



Rys. 43. Zestawienie podwójnych różnic dla reflektorów radarowych poligonu Borejów. Obliczenia względem CR01 i sceny Sentinel-1 zarejestrowanej 03.12.2014 r. Dane meteorologiczne ze stacji Włodawa na podstawie Global Historical Climatology Network (GHCN).



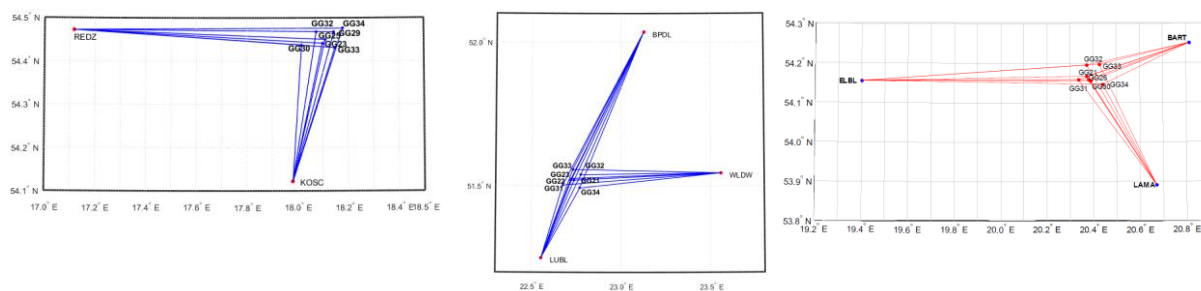
Rys. 44. Zestawienie podwójnych różnic dla reflektorów radarowych poligonu Babiak. Obliczenia względem CR01 i sceny Sentinel-1 zarejestrowanej 26.10.2014 r. Dane meteorologiczne ze stacji Elbląg na podstawie Global Historical Climatology Network (GHCN).

6.4 Przetwarzanie danych GNSS

6.4.1 Nawiązanie do sieci ASG-EUPOS

Pierwszy etap opracowania obserwacji GNSS zgromadzonych na punktach pomiarowych poszczególnych poligonów związany był ze zbadaniem stałości sieci punktów referencyjnych. W tym celu sprawdzano, czy współrzędne punktów referencyjnych określone na podstawie pomiarów danej kampanii nie zmieniły się w porównaniu do współrzędnych tych punktów otrzymanych podczas opracowania drugiej kampanii pomiarowej (luty 2015 r.), uznanej za referencyjną. Nawiązanie punktów referencyjnych sieci kontrolnych na poszczególnych poligonach przeprowadzono w oparciu o punkty ogólnopolskiej sieci stacji permanentnych ASG-EUPOS. Wybrano najbliższe dostępne stacje położone w pobliżu danego obszaru objętego siecią: KOSC i REDZ dla poligonu Lewino, BART, ELBL i LAMA dla poligonu Babiak, BPDF, LUBL i WLDW dla poligonu Berejów (rys. 45). W celu poprawy estymacji parametrów troposfery, niezbędnych do precyzyjnego wyznaczenia współrzędnych punktów pomiarowych w opracowaniu uwzględniono również odległą stację WROC, która również należy do sieci ASG-EUPOS. W systemie ASG-EUPOS współrzędne stacji określone są w układzie PL-ETRF2000 (epoka odniesienia 2011.0). Przed przystąpieniem do opracowania konieczne było przeprowadzenie transformacji współrzędnych stacji ASG-EUPOS do układu

ITRF2008 na epokę drugiej kampanii pomiarowej według odpowiedniego algorytmu (Boucher, Altamimi, 2011).



Lewino

Berejów

Babiak

Rys. 45. Nawiązanie punktów referencyjnych poligonów do sieci ASG-EUPOS

Strategia opracowania obserwacji GPS do wyznaczenia współrzędnych punktów referencyjnych zakłada dowiązania do stacji ASG-EUPOS przy wstępnym założeniu ich błędów *a priori* na poziomie 1 mm dla każdej składowej. Długości wektorów łączących punkty referencyjne lokalnej sieci kontrolnej oraz stacje ASG-EUPOS wykorzystane w opracowaniu wynosiły od 35 km do 375 km (wektor do stacji WROC).

Opracowanie wykonano w oprogramowaniu Bernese GNSS Software v. 5.2, współrzędne punktów referencyjnych w układzie ITRF2008 otrzymano z wyrównania łącznego równań normalnych z dwóch dni pomiarowych. Nawiązanie do sieci ASG-EUPOS zrealizowane zostało metodą *minimum constraint*. Po wykonaniu opracowania potwierdzono stałość współrzędnych punktów referencyjnych, po czym przystąpiono do wyznaczenia współrzędnych punktów kontrolowanych (reflektorów) w oparciu o punkty referencyjne.

6.4.2 Wyznaczenie współrzędnych reflektorów

Współrzędne reflektorów zostały wyznaczone poprzez rozwiązanie sieci wektorów łączącej każdy punkt wyznaczany z punktami referencyjnymi, bez wektorów pomiędzy punktami wyznaczanymi ani pomiędzy punktami referencyjnymi. Strategia przetwarzania obserwacji GPS w celu uzyskania ostatecznych współrzędnych punktów kontrolowanych została opracowana podczas prac po drugiej kampanii pomiarowej i opiera się na rozwiązaniu wektorów o długości nieprzekraczającej 10 km. Ze względu na niewielką długość wektorów wyznaczanych, do opracowania wykorzystano obserwacje kodowe i fazowe na częstotliwości L1. Na tak krótkich wektorach wpływ opóźniania troposferycznego oraz jonosferycznego jest eliminowany poprzez tworzenie podwójnych różnic obserwacji, zatem nie ma potrzeby stosowania kombinacji liniowej L3 do eliminacji wpływu jonosfery. Ponadto kombinacja

liniowa L3 charakteryzuje się trzykrotnie większym szumem, co ogranicza precyzję uzyskiwanych wyników.

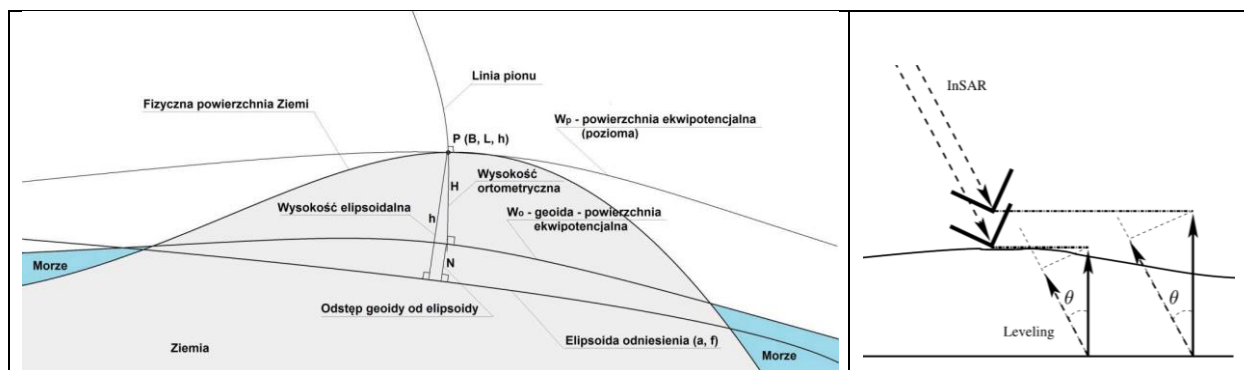
Błędy średnie finalnych współrzędnych mieszczą się w przyjętych dla metody GNSS wymaganiach dokładnościowych. Dla reflektorów na poligonie Lewino dokładność uzyskanej wysokości (na podstawie powtarzalności wyznaczeń) mieści się w granicach od 2,4 mm do 4,6 mm. Na poligonie Babiak, powtarzalność wyznaczeń wysokości punktów CR06, CR12, CR17 jest lepsza niż 3,0 mm, dla punktów CR09, CR10 oraz CR11 jest niższa niż 9,9 mm, dla punktu CR07 wynosi 5,9 mm, natomiast dla punktu CR16 wynosi 9,2 mm. Na poligonie Berejów maksymalna wartość powtarzalności wysokości dla punktów kontrolowanych wynosi 7,2 mm dla punktu CR05, dla pozostałych punktów mieści się w granicach do 6 mm.

6.5 Analiza wyników dla reflektorów

Chcąc wspólnie analizować dane zebrane za pomocą 3 niezależnych metod pomiarowych należy zdać sobie sprawę, z różnicy zasady pomiaru wysokości jak i sposobu jego odniesienia. I tak:

- Dane niwelacyjne – wysokość ortometryczna mierzona wzdłuż rzeczywistej linii pionu w stosunku do powierzchni geoidy odniesienia;
- Dane GNSS - wysokość elipsoidalna mierzona wzdłuż normalnej do elipsoidy odniesienia;
- Dane InSAR – wysokość elipsoidalna mierzona w kierunku padania wiązki radarowej (LoS);

Zależności te przedstawia rys. 46.

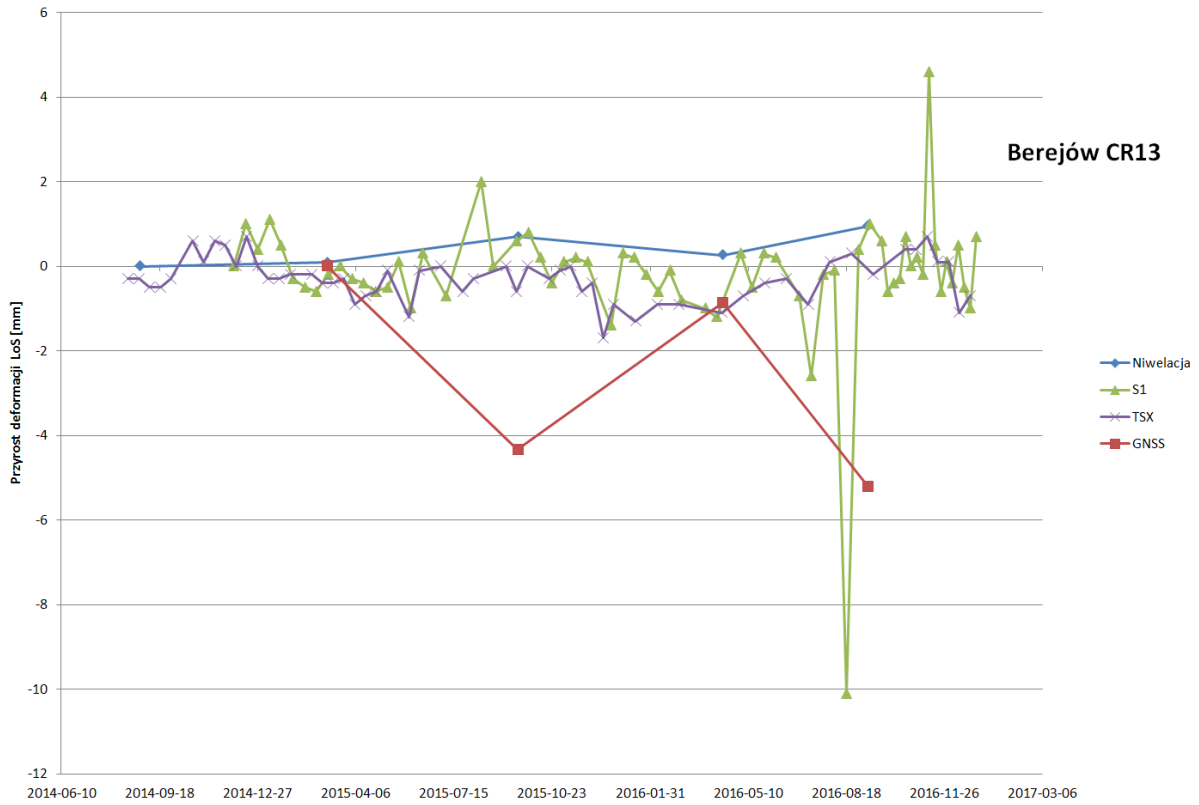


Rys. 46. Wysokość punktu względem powierzchni odniesienia: geoidy i elipsoidy (Wielgosz, 2014) oraz przypadek pomiarów InSAR (Ketelaar, 2008)

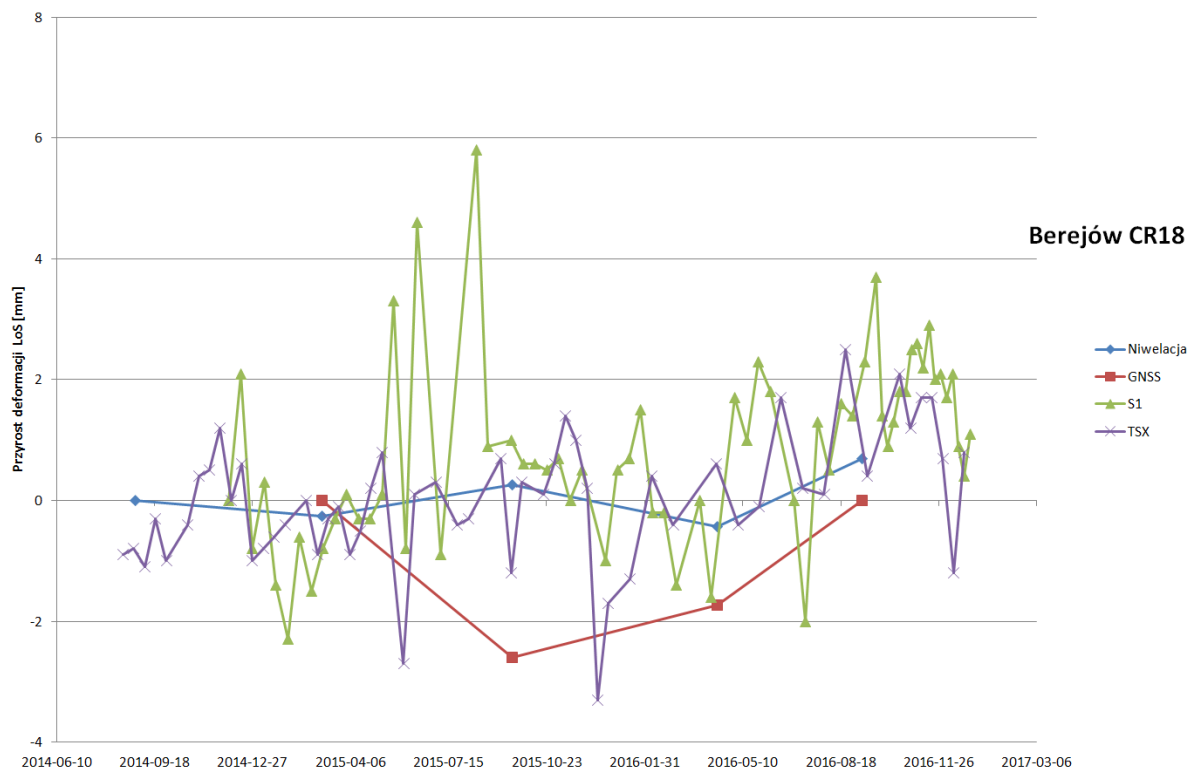
Zakładając, że wysokość geoidy i elipsoidy nie uległy zmianie w czasie jaki upłynął pomiędzy kolejnymi pomiarami można obliczyć tzw. podwójne różnice. Podwójne różnice to różnice wysokości pomiędzy danym punktem a punktem przyjętym za referencyjny oraz danym pomiarem a pomiarem przyjętym za referencyjny. Obliczenie podwójnych różnic redukuje problem rozbieżności pomiędzy układami odniesienia (elipsoida / geoida). Metodę podwójnych różnic stosuje się w obliczeniach GNSS do wyeliminowania błędów zegarów odbiorników i satelitów a także wpływu jonosfery, troposfery i błędów orbity. W obliczeniach InSAR podwójne różnice wykorzystywane są do obliczeń punktów PS, których nie możemy dowiązać do bezwzględnego układu współrzędnych.

Kolejną sprawą jest uwzględnienie faktu, że dane InSAR nie reprezentują kierunku prostopadłego do elipsoidy a kierunek w stosunku do niej ukośny (LoS). Dla celów porównawczych można obliczyć składową ukośną wektora pionowych przemieszczeń GNSS i niwelacji lub składową pionową wektora obserwacji InSAR. W drugim przypadku powinno się najpierw dokonać pełnej dekompozycji sygnału na składowe XYZ a następnie obliczyć składową LoS na podstawie składowej Z. Obliczenie takie nie jest możliwe, gdyż dysponujemy pojedynczym kierunkiem obserwacji InSAR (orbity *descending*). Ostatecznie analizę porównawczą wyników prowadzono dla składowej LoS.

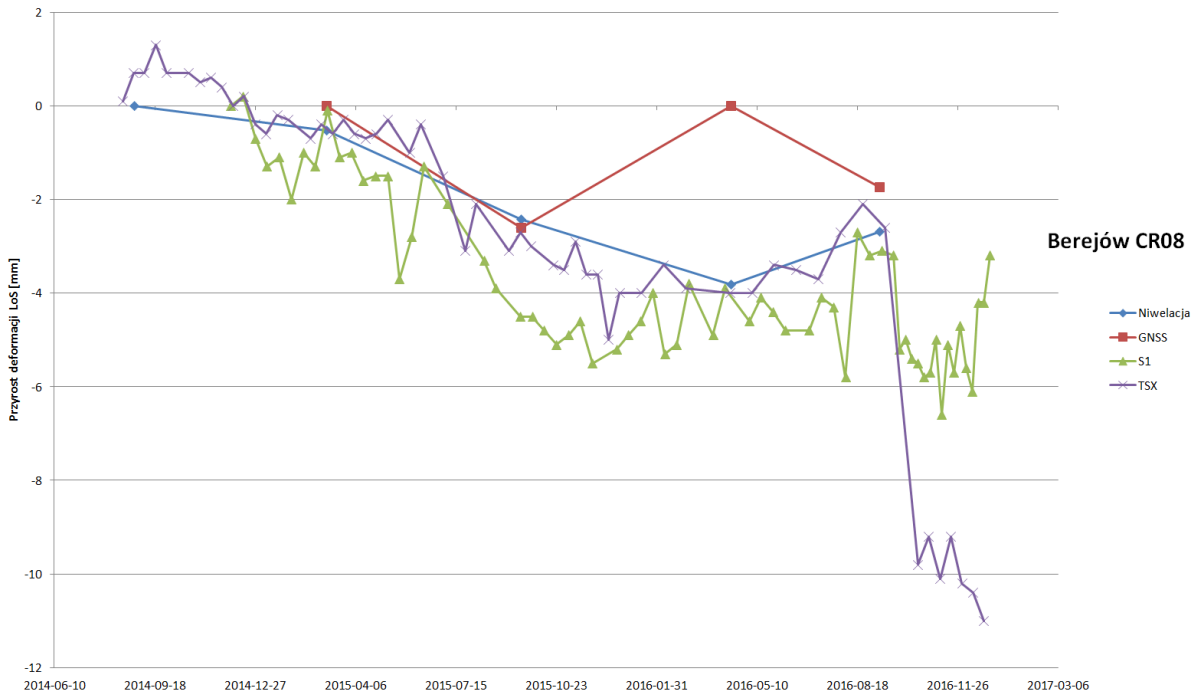
Użyte metody pomiarowe wykazały swoją generalną kompatybilność i porównywalność wyników. Pewną trudność sprawia tutaj duża różnica w bazach czasowych pomiarów – półroczny dla niwelacji i GNSS oraz 11-, 12- i 6-dniowy dla pomiarów InSAR.



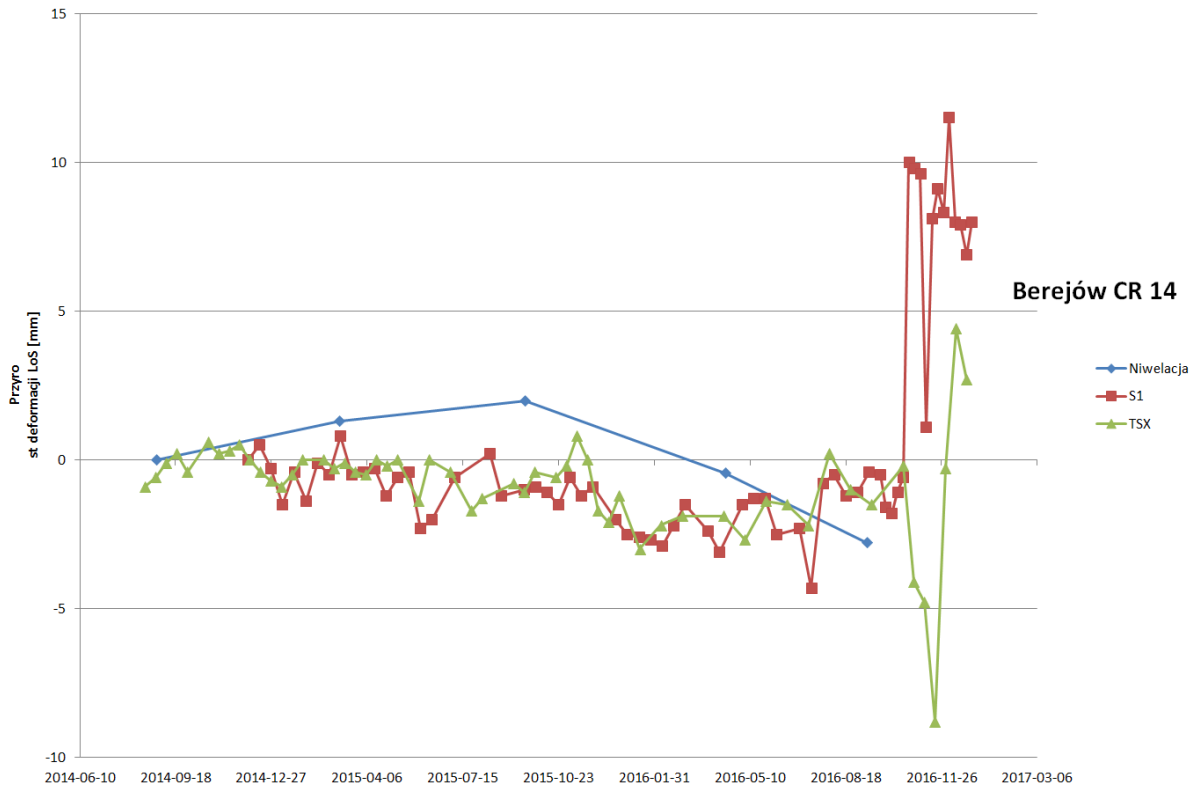
Rys. 47. Porównanie wyników dla reflektora 13, obszar Berejów



Rys. 48. Porównanie wyników dla reflektora 18, obszar Berejów



Rys. 49. Porównanie wyników dla reflektora 08, obszar Berejów



Rys. 50. Porównanie wyników dla reflektora 14v obszar Berejów

Na rysunkach 47 – 50 przedstawiono przykładowe zestawienia wyników dla wybranych reflektorów dla poligonu Berejów. Serie czasowe TerraSAR-X oraz Sentinel-1 wykazują bardzo dużą zgodność. Wyniki dla niwelacji precyzyjnej również są bardzo zbliżone. Większe odstępstwa wykazują pomiary GNSS, choć i one pokazują generalny trend deformacji.

Na rysunkach 49 i 50 pokazano serie czasowe dla reflektorów 08 i 14, które wykazały największe zmiany. Z analizy serii czasowych wynika, że gwałtowny przyrost deformacji nastąpił po 23 września 2016 r. (CR 08) i po 14 października 2016 (CR 14). Obserwowane zjawisko wystąpiło po zakończeniu pomiarów GNSS i niwelacyjnych w związku z czym jest trudne do zweryfikowania. Dla reflektora 14 wyniki interferometryczne wykazują inny charakter deformacji. Jest to prawdopodobnie podyktowane błędem rozwijania fazy z uwagi na duże przyrosty deformacji. Oba reflektory są położone w pobliżu odwiertu Berejów-OU2K. PGNiG nie prowadziło od 2014 r. żadnych dodatkowych prac na otworze Berejów. Inne reflektory znajdujące się w pobliżu nie wykazują podobnych deformacji. Obserwowana deformacja może być wynikiem przesuszenia gleby w wyniku suchego i upalnego lata 2016 r. Oba reflektory położone są w podmokłych zazwyczaj obniżeniach terenu wypełnionych namułami. Obserwowana deformacja związana jest najprawdopodobniej z kompaktacją gruntu w wyniku wysychania.

7 Podsumowanie i wnioski

Prace poszukiwawczo-eksploatacyjne gazu w formacjach łupkowych w trzech wybranych lokalizacjach miały znacznie skromniejszy charakter aniżeli zakładano. Wynikało to ze zmiany koniunktury gospodarczej, spadku cen ropy i gazu jaki rozpoczął się w 2013 r. Spowodowało to stopniowe wycofywanie się inwestorów i wygaszanie koncesji. Tym samym deformacje terenu na badanych obiektach nie wystąpiły co potwierdzono trzema niezależnymi metodami pomiarowymi. Wyniki te, potwierdzające brak deformacji, nadal są niezmiernie cenną informacją i ważnym argumentem w debacie społecznej dotyczącej wpływu poszukiwań i eksploatacji węglowodorów ze złóż niekonwencjonalnych na środowisko i infrastrukturę. W trakcie trwania projektu zespół PIG-PIB opracował, przetestował i wdrożył unikalną technologię wysoko dokładnego monitoringu deformacji z wykorzystaniem reflektorów radarowych i satelitarnej interferometrii radarowej. Zastosowana technologia należy do najnowocześniejszych na świecie i jest unikatowa w swoim rodzaju. Unikalne

doświadczenie zostało docenione przez Europejską Agencję Kosmiczną, która w 2015 roku zaprosiła zespół PIG-PIB do wzięcia udziału w kampanii walidacyjnej nowych satelitów radarowych Sentinel-1A i Sentinel-1B. Prace te są nadal kontynuowane. Zdobyte w projekcie doświadczenie jest wykorzystywane w kolejnych trzech zadaniach służby geologicznej:

1. Od 2015 r. jest realizowany temat „*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*”, w którym sieć monitoringu interferometrycznego składającego się z 7 reflektorów założono na terenie pogórnym w miejscowości Wapno.
2. W 2017 r. zainstalowano sieć 12 reflektorów radarowych na osuwiskach Zapadle i Huciska w miejscowości Szymbark. Sieć ta weszła w skład systemu monitorowania osuwisk w ramach programu SOPO.
3. W styczniu 2018 rozpoczęto prace nad zadaniem p.t. „*Interferometryczny Monitoring Powierzchni Terenu Polski (InMPTP) – etap I*”. Celem tego projektu jest zbudowanie serwisu zapewniającego dane o deformacjach powierzchni terenu Polski, które pozyskiwane będą z interferometrycznego przetwarzania obrazów Sentinel-1. W zadaniu wykorzystane i rozbudowane zostanie oprogramowanie InTOP a istniejąca infrastruktura pomiarowa w postaci poligonów badawczych z reflektorami posłuży w następnych latach do walidacji i kalibracji danych.

Zdobyte doświadczenia pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków dotyczących zagadnień technicznych:

1. Wokół badanych lokalizacji poszukiwań gazu w formacjach łupkowych nie stwierdzono deformacji powierzchni terenu, które związane byłyby z pracami w odwiertach. Stwierdzenie to oparto na danych pomiarowych z sieci obserwacyjnej mierzonej za pomocą niwelacji precyzyjnej, satelitarnej interferometrii radarowej (2 niezależne źródła danych) i GNSS.

2. Zaprojektowana sieć reflektorów spełniła swoje zadanie. Oba typy reflektorów sprawdziły się dla obu systemów satelitarnych. Również reflektory zaprojektowane dla pasma X (TerraSAR-X) świetnie odbijały sygnał pasma C (Sentinel-1) i odwrotnie
3. Reflektory i sposób ich fundamentowania wykazały bardzo dużą stabilność w czasie i niewrażliwość na wpływ atmosfery.
4. Stwierdzony ruch reflektorów w zakresie kilku mm/rok jest odpowiedzią na sezonowe zmiany temperatury i wilgotności gruntu. Określenie dokładnego modelu tych deformacji będzie możliwe po zebraniu danych z okresu dłuższego aniżeli 3 lata (jak w projekcie).
5. Pomiar niwelacji precyzyjnej, jak i interferometryczne, pokazały bardzo dużą zgodność. Dokładności uzyskane metodami interferometrycznymi są porównywalne do niwelacji precyzyjnej.
6. Wyniki pomiarów interferometrycznych na podstawie niezależnych danych z satelitów TerraSAR-X i Sentinel-1 wykazały bardzo dużą zgodność i zbliżony zakres dokładnościowy.
7. Wyniki pomiarów GNSS, pomimo iż mieszczą się w normach dokładnościowych dla tego typu pomiarów, odbiegają nieco od niwelacji precyzyjnej i interferometrii. Przyczyną takiego stanu mogą być zbyt krótkie sesje pomiarowe na reflektorach (4 godziny). Być może należałoby je wydłużyć do 8 godzin lub poprawić precyzję mocowania anten GNSS.
8. Opracowane oprogramowanie InTOP umożliwiło przetworzenie danych radarowych na potrzeby projektu. Problem stanowiła objętość danych, szczególnie jeśli chodzi o dane Sentinel. Dla przyszłych opracowań należy znacznie rozbudować serwer obliczeniowy w zakresie liczby rdzeni, pamięci RAM oraz pamięci dyskowej.
9. Oprogramowanie InTOP będzie nadal rozwijane na potrzeby kolejnych projektów.
10. Infrastruktura na poligonach badawczych w Lewinie, Berejowie i Babiaku nie będzie likwidowana. Będzie ona nadal utrzymywana na potrzeby przyszłych projektów.
11. W przypadku instalowania nowych reflektorów należy stosować reflektory podwójne, na dwa kierunki (orbity *ascending* i *descending*). Umożliwia to uzyskanie 2 serii danych i późniejszą dekompozycję deformacji na składowe horyzontalne.

8 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.
- Boucher, C., Altamimi, Z., 2011. Memo: Specifications for reference frame fixing in the analysis of a EUREF GPS campaign”2011. etrs89.ensg.ign.fr/memo-V8.pdf.
- 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.
- Chen, Z., 2012. Finite element modelling of viscosity-dominated hydraulic fractures. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 88-89, 136-144.
- Choi, D., S., Dahl, H., D. 1981. Measurement and prediction of mine subsidence over room and pillar workings In three dimensions. *Workshop On Surface Subsidence Due to Underground Mining – Proceedings Morgatown, West Virginia USA*.
- Cloude, S.R., Pottier, E., 1996. A review of target decomposition theorems in radar polarimetry. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 34, 498–518. <https://doi.org/10.1109/36.485127>.
- De Zan, F., Guarnieri, A.M., 2006. TOPSAR: Terrain observation by progressive scans. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 44, 2352–2360. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.873853>
- Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F., 1999. Permanent Scatterers in SAR Interferometry. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1999. IGARSS '99*, 1–3.
- Ferretti, A., Savio, G., Barzaghi, R., Borghi, A., Musazzi, S., Novali, F., Prati, C., Rocca, F., 2007. Sub-millimeter accuracy of InSAR time series: Experimental validation. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 45, 1142–1153.
- Franceschetti, G., Iodice, A., Ricco, D., 2002. A canonical problem in electromagnetic backscattering from buildings. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 40, 1787-1801.
- Garthwaite, M. C., Nancarrow, S., Hislop, A., Thankappan, M., Dawson, J. H., Lawrie, S., 2015. *The Design of Radar Corner Reflectors for the Australian Geophysical Observing System. GEOSCIENCE AUSTRALIA RECORD 2015/03*. Canberra.
- Guang, L., Huadong, G., Perski, Z., Fan, J; Bai, S., Yan, S., ; Song R., 2016. Monitoring the slope movement of the Shuping landslide in the Three Gorges Reservoir of China, using

- X-band time series SAR interferometry. *Advances in Space Research*, Volume 57, Issue 12, 2487-2495
- 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.
- Hejmanowski, R., (red.) 2001. *Prognozowanie deformacji górotworu i powierzchni terenu na bazie uogólnionej teorii Knothego dla złóż surowców stałych, ciekłych i gazowych*. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków 1-214
- 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., 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. *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 scatterers interferometry. *Proceedings of the ENVISAT & ERS Symposium*, 6-10 September 2004, Salzburg (Austria).
- Kasza, P., 2011. Zabiegi hydraulicznego szczelinowania w formacjach łupkowych. *Nafta-Gaz*, 12, 874 – 883.
- Ketelaar, G., 2008. *Monitoring surface deformation induced by hydrocarbon production using satellite radar interferometry*. Delft Institute of Earth Observation and Space Systems, 2008. 256.
- Knothe, S., 1984. *Prognozowanie wpływów eksploatacji górniczej*. Wyd. Śląsk.
- Konieczńska, M., Woźnicka M., Antolak O., Janica R., Lichtarski G., Nidental M., Otwinowski J., Starzycka A., Stec B., Wróbel G., Potrykus R., Gdaniec Rohde B., Włodarski T., 2011. *Badania aspektów środowiskowych procesu szczelinowania hydraulicznego wykonanego w otworze Łebień LE- 2H. Raport końcowy*, PIG- PIB, Warszawa.
- Marinkovic, P.S., Ketelaar, V.B.H., Hanssen, R.F., 2006. Utilization of high-Doppler ERS acquisitions in interferometric time series. in: *European Conference on Synthetic Aperture Radar*, Dresden, Germany, 16–18 May 2006, 6.

- 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.
- Miranda, N., Rosich, B., Santella, C., Grion, M., 2003. Review of the impact of ERS-2 piloting modes on the SAR doppler stability. Proceedings of the 2004 Envisat & ERS Symposium (ESA SP-572), 1-9.
- Mogi, K. 1958. Relations between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surfaces around them. *Bulletin of The Earthquake Research Institute*, Vol. 36: 99-134.
- Nagel, N. B., Sanchez-Nagel M.A., Zhang F., Garcia X., Lee B. 2013. Coupled numerical evaluations of the geomechanical interactions between a hydraulic fracture stimulation and a natural fracture system in shale formations. *Rock Mech. Rock Eng*, 46: 581-609.
- 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., 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.
- PIG-PIB. 2012. Ocena zasobów wydobywanych gazu ziemnego i ropy naftowej w formacjach łupkowych dolnego paleozoiku w Polsce (Basen bałtycko- podlasko- lubelski). Raport pierwszy, Warszawa.
- Poprawa, P., 2010. Potencjał występowania złóż gazu ziemnego w łupkach dolnego paleozoiku w basenie bałtyckim i lubelsko-podlaskim. *Przegląd Geologiczny*, vol 58 nr. 3., 226 – 249.
- Prati, C., Rocca, F., Monti Guarnieri, A., 1993. SAR interferometry experiments with ERS-1, in: ESA SP-359. pp. 991–993.
- Prugar, W., 2013. Środowisko depozycji a rozwój procesów naftowych w utworach dolnego paleozoiku centralnej i południowej części rowu lubelskiego (rozprawa doktorska). 244s.
- 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* Vol. 2013 (2013), Article ID 191685, 8.

- Stępnia, K., Baryła, R., Wielgosz, P., Kurpiński, G., 2013. Optimal data processing strategy in precise GPS leveling networks. *Acta Geodyn. Geomater.*, Vol 10, No. 4 (172), 443 – 452.
- Stopa, J., Rychlicki, S., Wojnarowski, P., Kosowski, P., 2007- Zastosowanie odwiertów rozgałęzionych w eksploatacji złóż ropy i gazu. *Wiertnictwo Nafta Gaz*, 24: 869-878.
- Sun, R. J. 1969. Theoretical size of hydraulically induced horizontal fractures and corresponding surface uplift in an idealized medium. *Journal of Geophysical Science*, Vol. 74, No. 25: 5995-6011
- Timmen, L., Xia, Y., Reigber, C., Hartmann, R., Fiksel, T., Winzer, W., Knoch-Weber, J., 1996. Monitoring of small motions in mining areas by SAR interferometry, *Proc. ESA Workshop on Applications of ERS SAR Interferometry (Zürich, Switzerland)*.
- Tomczyk, H., 1976. Rozwój litofacji syluru w zachodniej części syneklizy perybałtyckiej. *Biul. Inst. Geol.*, 270.
- Wielgosz P. (red) 2014. Przeprowadzenie analiz deformacji terenu z wykorzystaniem zintegrowanej technologii precyzyjnej niwelacji geometrycznej i satelitarnej. Raport z realizacji pierwszej kampanii pomiarowej. Olsztyn (niepublikowane).
- Yu W., Luo Z., Javadpour F., Varavei A., Sepehrnoori K. 2014. Sensitivity analysis of hydraulic fracture geometry in shale gas reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 113: 1-7.
- Zebker, H.A., Villasenor, J., 1992. Decorrelation in interferometric radar echoes. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 30, 950–959.
- Zienkiewicz, O.C., 1977- *The finite element method in engineering science*, 3rd edn, McGraw-Hill, London.