



You have downloaded a document from
RE-BUŚ
repository of the University of Silesia in Katowice

Title: Satelitarna interferometria radarowa InSAR i PSInSAR

Author: Zbigniew Perski

Citation style: Perski Zbigniew. (2010). Satelitarna interferometria radarowa InSAR i PSInSAR. W: W. M. Zuberek, K. Jochymczyk (red.), "Geneza i charakterystyka zagrożenia sejsmicznego w Górnos Śląskim Zagłębiu Węglowym" (S. 35-41). Katowice : Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego



Uznanie autorstwa - Użycie niekomercyjne - Bez utworów zależnych Polska - Licencja ta zezwala na rozpowszechnianie, przedstawianie i wykonywanie utworu jedynie w celach niekomercyjnych oraz pod warunkiem zachowania go w oryginalnej postaci (nie tworzenia utworów zależnych).



UNIWERSYTET ŚLĄSKI
W KATOWICACH



Biblioteka
Uniwersytetu Śląskiego



Ministerstwo Nauki
i Szkolnictwa Wyższego

3.2. Satelitarna interferometria radarowa InSAR i PSInSAR

Metody satelitarnej interferometrii radarowej korzystają z danych z satelitarnych radiolokatorów boczno wybiegających z aperturą syntetyczną SAR (Synthetic Aperture Radar). Dane satelitarne typu SAR dla zastosowań interferometrycznych aktualnie pozyskuje wiele satelitów. Najczęściej korzysta się z satelitów Europejskiej Agencji Kosmicznej (ESA): ENVISAT oraz ERS-2. Często sięga się także do danych archiwalnych z ich poprzednika — satelity ERS-1. Urządzenia SAR tych satelitów rejestrują dane w paśmie C (5,7 cm). Satelita ERS-2 wykonuje zobrazowania satelitarne już 13 lat; w tak długim czasie powstała bardzo obszerna baza danych radarowych. Niestety, dane zarejestrowane po 2001 r. (ERS-2), z uwagi na awarię stabilizatorów żyroskopowych satelity, nie nadają się do interferometrii.

Satelita ENVISAT został wystrzelony na orbitę w 2002 r. Pierwsze dostępne zobrazowania SAR zostały opublikowane 17 października 2002 r. Satelita ENVISAT wyposażony został w urządzenie ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar). Funkcjonuje ono w paśmie C, podobnie jak radary satelitów ERS-1 i ERS-2. Nowością jest możliwość wyboru kąta obrazowania oraz wykonywania rejestracji w trybie tzw. polaryzacji alternatywnej (do wyboru: H-H, V-V, H-V, V-H). Ponieważ długość fali wykorzystywanej przez urządzenie SAR satelity nieznacznie różni się od długości fali stosowanej przez ERS-1 i ERS-2, oba systemy nie są w pełni zgodne z sobą, nie można więc danych z obu systemów wspólnie procesować interferometrycznie (poza szczególnymi przypadkami).

Aby zapewnić jak największą porównywalność wyników, w projekcie korzystano jedynie z tych danych ENVISAT ASAR, których kąt obrazowania i polaryzacja były podobne do stosowanych w przypadku satelitów ERS-1 i ERS-2.

3.2.1. Opis technologii InSAR i PSInSAR

Technologia PSInSAR jest rozwinięciem pozwalającym ominąć ograniczenia techniki InSAR w zakresie obserwacji długookresowych deformacji. Na poziomie przetwarzania danych metoda InSAR jest wstępnym etapem analizy PSInSAR. Obie metody są w tym sensie komplementarne, choć analiza samych interferogramów InSAR może być prowadzona odrębnie.

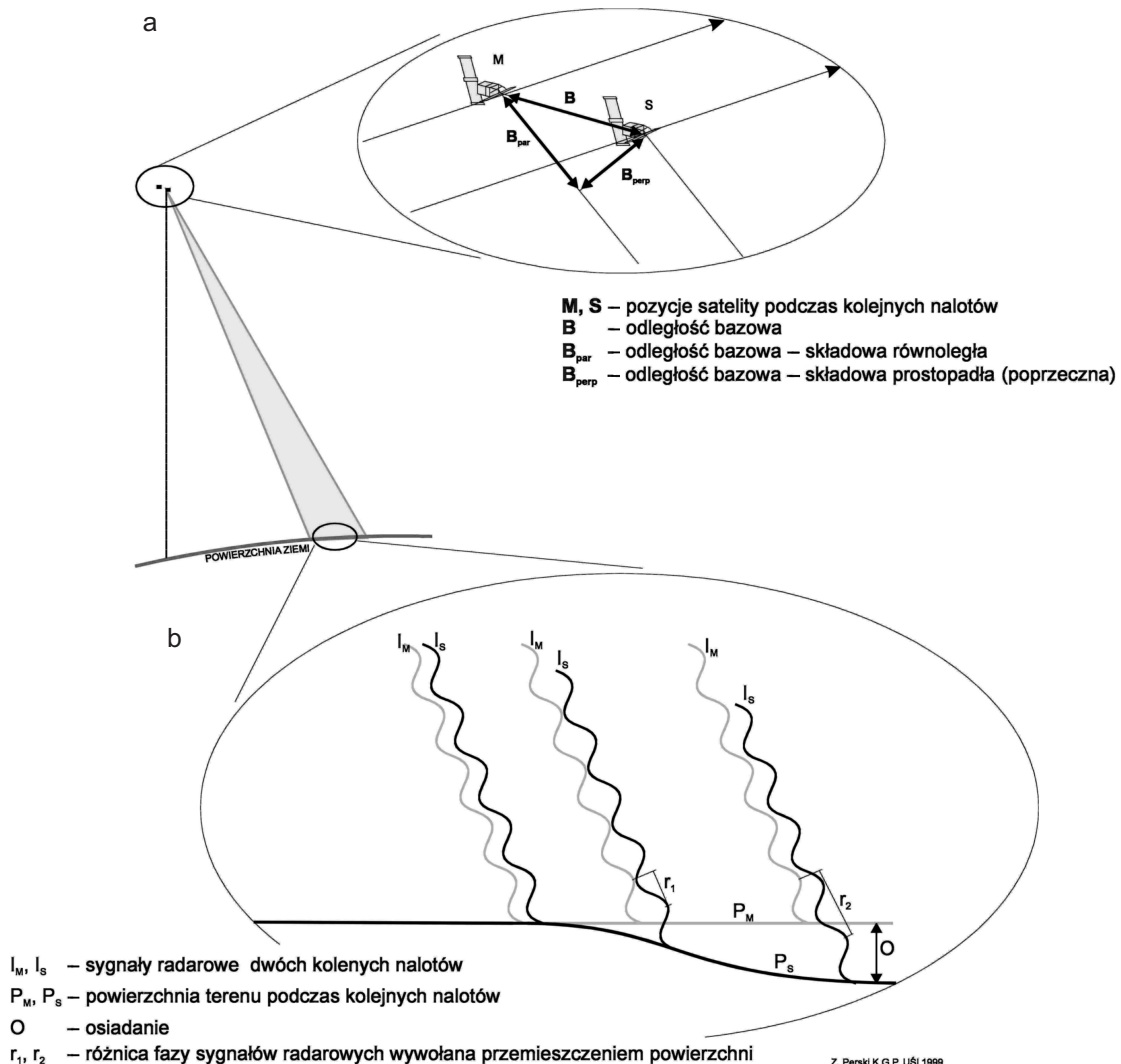
3.2.1.1. Satelitarna interferometria radarowa (InSAR)

Tradycyjna technika InSAR (SAR Interferometry) opiera się na stosowaniu interferogramów, tj. rastrowych zbiorów przedstawiających różnice fazy między dwoma rejestracjami SAR. InSAR wykorzystuje rejestracje SAR, wykonywane sekwencyjnie za pomocą jednej anteny SAR w czasie kolejnych przelotów satelity nad tym samym obszarem (tzw. Differential InSAR, D-InSAR). Na podstawie różnic fazy odpowiadających sobie sygnałów radarowych z kolejnych zobrazowań SAR uzyskuje się informację o wartościach względnych rzędnej powierzchni terenu lub jej zmianach w czasie (PRATI, ROCCA, 1994; ZEBKER, GOLDSTEIN, 1986).

Odbity od powierzchni Ziemi sygnał jest rejestrowany w postaci zespolonej, zachowuje swą fazę i amplitudę. Przetwarzanie interferometryczne danych SAR polega na obliczeniu różnic fazy dwóch obrazów SAR. Rezultatem tego przetwarzania jest obraz różnic fazy, zwany interferogramem. Interferogramy można wizualizować w postaci sekwencji barw odpowiadających różnicom fazy, zwanymi prążkami interferometrycznymi.

Różnice fazowe reprezentowane na interferogramach są sumą wielu czynników o różnej genezie. Najważniejsze z nich to:

- Składowa geometryczna (topograficzna) — powstaje w wyniku kombinacji deniwelacji względnych terenu i odległości bazowej (bazy geometrycznej) użytych rejestracji SAR. Wielkość odległości bazowej zależy od tzw. dryfu satelity i warunkuje stosowalność poszczególnych obrazów SAR dla interferometrii. Obliczenia odległości bazowej wykonuje się na podstawie danych o parametrach orbit. Wpływ składowej geometrycznej na interferogramach widoczny jest w postaci sekwencji prążków interferometrycznych nawiązujących do ukształtowania terenu. Składową tę można usunąć z interferogramu, stosując Numeryczny Model Terenu.
- Składowa deformacyjna — powstaje wskutek wystąpienia deformacji terenu (obniżenie, podnoszenie) między kolejnymi rejestracjami SAR (baza czasowa interferogramu). Zazwyczaj jest wielkością szukaną — sygnałem (rys. 3.21).
- Składowa atmosferyczna — powstaje w wyniku zmian prędkości propagacji fali w atmosferze. Jej źródłem może być jonosfera lub zwiększona obecność pary wodnej. Składowa ta może być mylnie interpretowana jako wielkoobszarowa deformacja o małej amplitudzie. W przypadku dużych przyrostów deformacji w czasie wystę-



Rys. 3.21. Geometria InSAR (PERSKI, 2000) Odległość bazowa B to geometryczna różnica pozycji anteny SAR w trakcie kolejnych rejestracji. Wyróżnia się składową podłużną (równoległą) B_{par} ($B_{||}$) oraz poprzeczną (prostopadłą) B_{perp} (B_{\perp})

pujących na małych obszarach, jak deformacje górnicze w GZW, składowa atmosferyczna może być łatwo zidentyfikowana. W przypadku małych przyrostów deformacji dla pojedynczych interferogramów składowej atmosferycznej nie można usunąć i wpływa ona na znaczne obniżenie dokładności pomiarów.

- Inne składowe — ich źródłem mogą być szумы aparatury SAR, błędy przetwarzania danych, błędy danych o orbitach, błędy powstałe na etapie formowania produktu SLC (Single Look Complex) z surowych danych. Błędów tych zwykle nie można wydzielić, dlatego są traktowane łącznie ze składową atmosferyczną.

Na degradację jakości interferogramu wpływa również tzw. koherencja. Jest to wielkość współczynnika korelacji zespolonych wartości sygnału SAR. Największy problem stanowi tzw. dekoherencja czasowa, która związana jest ze zmianami właściwości elektromagnetycznych lub/i pozycją obiektów odbijających fale wewnątrz komórki rozdzielczości. Koherencja określa bezpośrednio sto-

pień zgodności fazy sygnałów SAR. Jej wielkość zależy wprost od zakłóceń fazy interferogramu (CATTABENI i in., 1994; ZEBKER, VILLASENOR, 1992).

Wartość koherencji warunkuje bezpośrednio czytelność generowanego interferogramu. I tak dla obszarów o wysokiej koherencji możliwa jest interpretacja zmian fazy interferogramu (np. jako efektu deformacji, różnic topografii itp.). W przypadku obszarów o niskiej lub zerowej koherencji interpretacja interferogramu jest utrudniona bądź często niemożliwa, gdyż pierwotna faza sygnału uległa degradacji przez czynniki techniczne lub środowiskowe. Graficznym przedstawieniem lateralnej zmienności koherencji jest tzw. mapa koherencji — obraz przedstawiający w odcieniach szarości wartości koherencji poszczególnych pikseli: 0 — brak koherencji, 1 (lub 255 w zapisie 8-bitowym) — pełna koherencja.

Graficznie różnice faz na interferogramach obrazuje się za pomocą skali barw; pełna sekwencja kolorów odpowiada zmianie fazy sygnału radarowego

o 2π , czyli 360° . Obszary osiadania terenu widoczne są na interferogramach w postaci sekwencji barwnych prążków interferometrycznych odpowiadających różnicom fazy. Występowanie pełnej sekwencji zmiany barw oznacza zmianę fazy o wartość 2π . Jeśli sekwencja barw się powtarza, to oznacza to, że osiadania są równe wielokrotności wartości 2π . Faza interferogramu w miejscach, gdzie nie występują osiadania, powinna wynosić zero. W większości przypadków obszary te jednak charakteryzują się występowaniem pewnej nieznaczącej fazy resztkowej.

3.2.1.2. Metoda PSInSAR

Największe ograniczenia metody InSAR wiążą się z tzw. dekoherencją czasową i występowaniem składowej atmosferycznej fazy; stąd uzyskiwane dokładności pomiarowe są często dużo niższe od oczekiwanych. Z powodu wymienionych ograniczeń praktyczne użycie metody D-InSAR jest w większości przypadków zredukowane do: danych o małych bazach czasowych, przypadków badania zjawisk o silnych deformacjach zachodzących między kolejnymi rejestracjami, badania obszarów pozbawionych roślinności, przypadków, gdy oba obrazy użyte do konstrukcji interferogramu zostały zarejestrowane w tych samych bądź bardzo podobnych warunkach atmosferycznych.

Ominięcie podstawowych ograniczeń metody D-InSAR okazało się możliwe dzięki zastosowaniu metod punktowych, opartych na selekcji tzw. rozpraszaczy stabilnych (Permanent Scatterers, Persistent Scatterers, Coherent Targets). Pierwsza tego typu metoda została opracowana w końcu lat dziewięćdziesiątych XX w. przez zespół POLIMI z Politechniki w Mediolanie (FERRETTI i in., 2001). Metoda ta wykorzystuje właściwości naturalnych reflektorów radarowych, zwanych rozpraszaczami stabilnymi, stąd jej nazwa: PSInSAR (Persistent Scatterers InSAR). Rozpraszacze tego typu (PERSKI i in., 2007) charakteryzują się bardzo stabilną fazą sygnału radarowego, praktycznie niewrażliwą na zmiany geometrii obrazowania oraz warunki atmosferyczne. Właściwość ta wynika z faktu, że dominujące dla piksela rozpraszacza PS jest odbicie od pojedynczego, punktowego obiektu o rozmiarach podpikselowych. Obiektami tymi mogą być: dachy i narożniki budynków, fragmenty różnego rodzaju konstrukcji (mostów, ogrodzeń itp.) czy też wysokie słupy telegraficzne bądź latarnie. Na terenach pozbawionych obiektów infrastruktury rozpraszacze stabilne stanowią wychodnie skał.

Główną ideą metod PSInSAR jest dekompozycja serii interferometrycznych obserwacji fazowych na trzy podstawowe składowe: deformacji, wysokości względnej i APS. Zasadniczym warunkiem prawidłowej dekompozycji jest duża liczba obserwacji, stąd wymagane co najmniej 20 interferogramów. Należy podkreślić, że w metodzie PSInSAR, podobnie jak w przypadku D-InSAR, mamy do czynienia z wyznaczeniem wartości deformacji o charakterze względnym zarówno w czasie, jak i przestrzeni. Podstawy metodyczne i teoretyczne szczegółowo zaprezentowali A. FERRETTI i in. (2001).

Pierwszym etapem przetwarzania danych było wygenerowanie serii interferogramów dla tej samej sceny referencyjnej za pomocą metod stosowanych w D-InSAR. Następnym etapem jest wykrycie rozpraszaczy stabilnych (PS), a dalej — wyodrębnienie informacji fazowej dla tych właśnie punktów. Detekcja ta jest oparta na wieloczasowej analizie amplitudy metodą dyspersji amplitudowej (FERRETTI i in., 2001; PRATI i in., 2001) z zastosowaniem ważnej właściwości, jaką jest ścisły związek stabilności amplitudy ze stabilnością fazy interferometrycznej. Z kolei dokonuje się weryfikacji punktów i dekompozycji sygnału na podstawie metod geodezyjnych wyrównania sieci trójkątów.

Krótki opis wybranych procedur implementacji algorytmu PSInSAR, stworzonej i stosowanej przez Radar Remote Sensing Group w Delft University of Technology w Delft (Holandia), przedstawili Z. PERSKI i M. MRÓZ (2008).

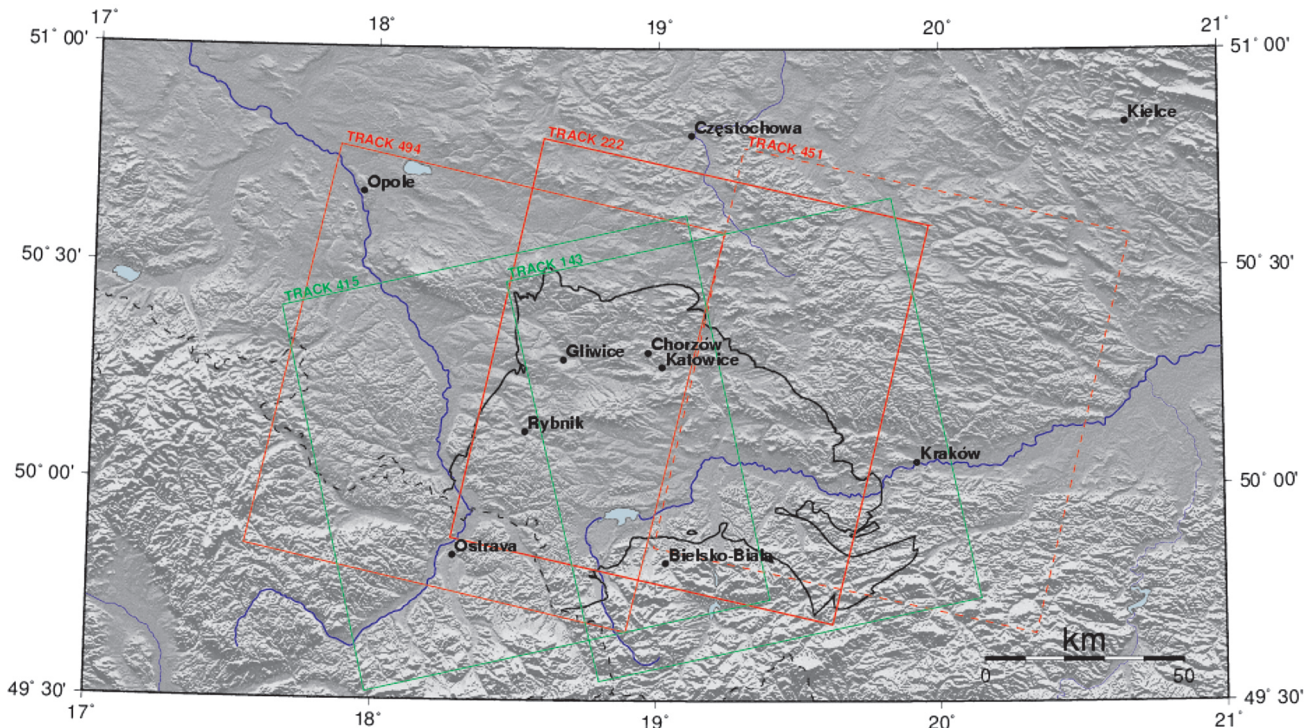
3.2.2. Zastosowane dane

Satelity wyposażone w urządzenia SAR poruszają się po orbitach okołobiegunowych, dlatego też SAR odbywa się pasami w postaci tzw. ścieżek (*tracks*) o szerokości 100 km. Pasy te są następnie dzielone na sceny (*frames*) o rozmiarach 100 km × 100 km. Sceny sąsiadujących ścieżek wykonywanych „na zakładkę” w ok. 50% pokrywają ten sam teren.

W ramach opracowania przyjęto następujące kryteria wyboru scen:

- położenie terenu badań — geologiczne granice polskiej części Górnośląskiego Zagłębia Węglowego,
- zasięg granic obszarów górniczych kopalń GZW,
- zasięg występowania wstrząsów w GZW.

W zdefiniowanym w ten sposób obszarze zainteresowania wytypowano łącznie sześć scen z czterech ścieżek, które obejmują swym zasięgiem teren



Rys. 3.22. Zasięgi scen ERS SAR i ENVISAT ASAR dla obszaru GZW

badan (rys. 3.22). Są to następujące sceny: dla orbit wschodzących (*ascending*) — ścieżka 415 (scena 999), ścieżka 143 (scena 999), a w przypadku orbit zachodzących (*descending*) — ścieżka 494 (scena 2583), ścieżka 222 (scena 2583) i ścieżka 451. Usytuowanie obszaru badawczego w centrum sceny 2583 ścieżki 222 jest najkorzystniejsze z punktu widzenia realizacji celów opracowania. Scena 2583 ze ścieżki 494 obejmuje wyłącznie zachodnią część obszaru. Zasięg ścieżki 451 obejmuje jedynie skrajnie wschodnią część GZW, gdzie obecnie nie prowadzi się eksploatacji górniczej (rys. 3.22). W przypadku satelitów ERS-1 i ERS-2 najwięcej danych archiwalnych występuje dla orbit zachodzących. Z tego powodu w niniejszym opracowaniu korzystano z danych ze ścieżek 222 i 494.

Pokrycie terenu badań danymi ASAR z satelity ENVISAT nie jest jeszcze zbyt duże w sensie czasowym. Dotychczas najwięcej danych zarejestrowano dla orbit wschodzących, jednak w projekcie wykorzystano wszystkie dostępne archiwalne rejestracje ASAR.

3.2.3. Przetwarzanie danych InSAR

Selekcjonowanie obrazów SAR do konstrukcji interferogramów D-InSAR przeprowadza się tak, by poszczególne pary obrazów SAR zapewniały możliwie najlepszą koherencję interferogramów.

Z tego względu podczas selekcji uwzględnia się — w miarę możliwości — wpływ takich czynników powodujących dekoherencję, jak:

- Krótka baza czasowa zapewniająca stabilną charakterystykę odbicia sygnału radarowego. W przypadku osiadań górniczych zastosowano bazy czasowe wynoszące między obrazami odpowiednio 35 i 70 dni.
- Podobny okres wegetacyjny roślin podczas wykonywania kolejnych zobrażeń: wyselekcjonowano obrazy sporządzone w okresach powolnego wzrostu roślinności i małych opadów (późne lato—wczesna jesień, późna jesień, bezśnieżna zima).
- Zbliżone warunki atmosferyczne podczas wykonywania kolejnych zobrażeń SAR: do kontroli warunków atmosferycznych wykorzystano dane meteorologiczne (opady, zachmurzenie, wilgotność gruntu). Dodatkowo posłużono się satelitarnymi obrazami meteorologicznymi z satelitów NOAA (archiwum stacji odbiorczej Wydziału Nauk o Ziemi Uniwersytetu Śląskiego).
- Stabilna geometria wykonania obrazów: najczęściej stosuje się pary zobrażeń SAR, których odległość bazowa była mniejsza niż 200 m.

Przetwarzanie danych przeprowadza się wieloetapowo (PERSKI, 2000), dostosowując poszczególne etapy do metody i celu przetwarzania. Do wygenerowania interferogramów używa się specjalistycznego oprogramowania, np. w omawianym projekcie zastosowano oprogramowanie akademickie DORIS: Delft Object-oriented Radar Interfero-

metry Software (KAMPES i in., 2003) pracujące w środowisku Linux, ogólnie dostępne na zasadach tzw. wolnego oprogramowania.

Dzięki dużemu pokryciu obszaru GZW opracowaniem InSAR (rys. 3.22) możliwe było przeprowadzenie unikalnej, regionalnej analizy deformacji terenu dla całego obszaru GZW jednocześnie. Na podstawie interferogramów wykonano zestawienie rozmieszczenia i zasięgu obszarów obniżających się w okresach objętych interferogramami — zwykle 35 dni. Analiza opierała się na identyfikacji oraz interpretacji obszaru występowania prążków interferometrycznych wywołanych osiadaniami.

Regionalny obraz osiadań w latach 1992—1999 uzyskano, generalizując zasięgi występowania osiadań interpretowane na podstawie interferogramów z tych samych lat. Ponieważ dużą część interferogramów cechuje bardzo słaba jakość, całość interpretacji ma charakter poglądowy i opisowy.

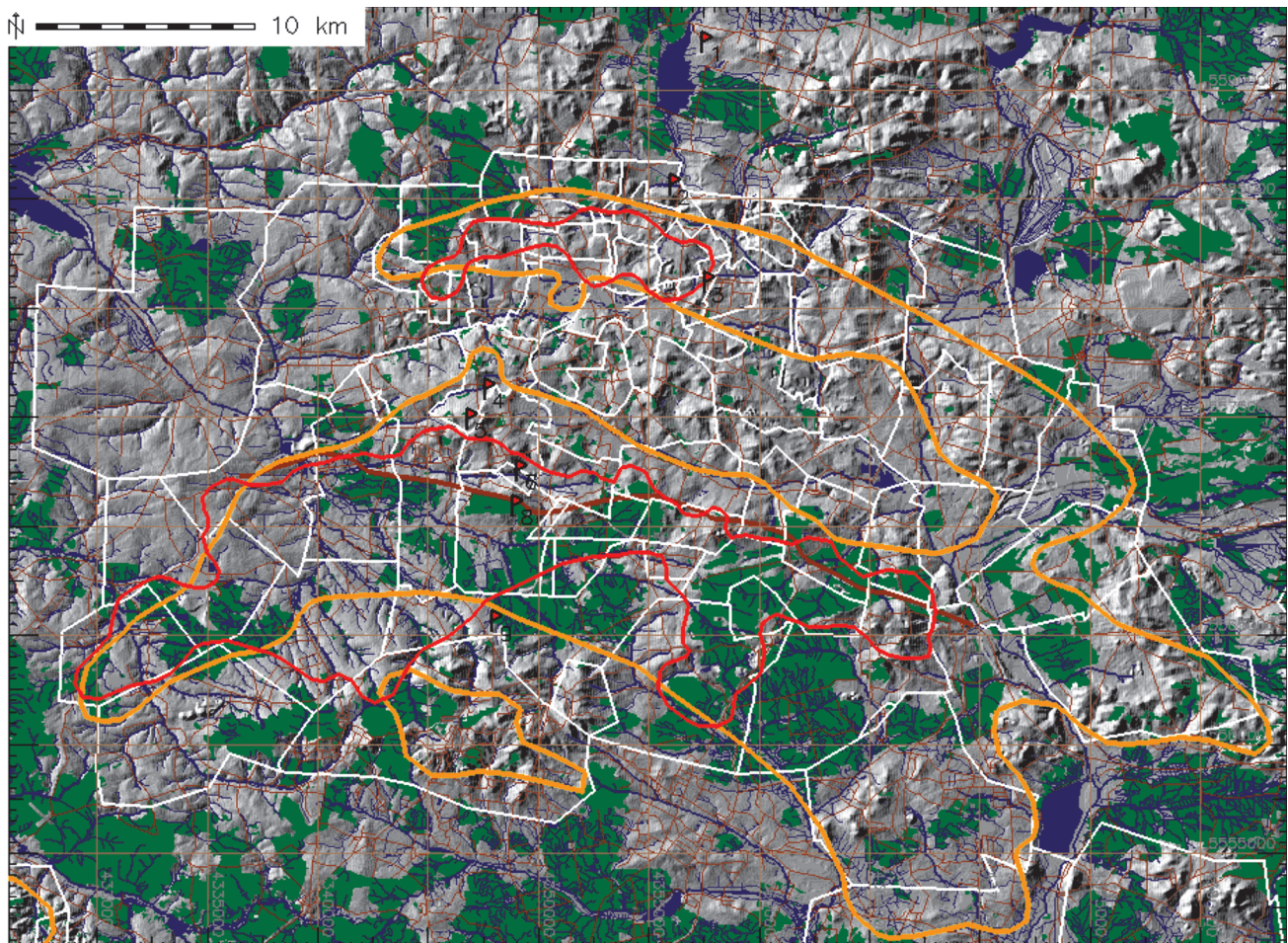
Z analizy otrzymanego obrazu dynamiki wynika, że w październiku 1992 r. na obszarze GZW ruchami powierzchni objętych było 143,15 km², co stanowi ogółem ok. 8% sumarycznej powierzchni obszarów górniczych (PERSKI, 2000) (rys. 3.23).

Regionalny obraz osiadań w latach 2004—2005 wyznaczono na podstawie dwóch dobrej jakości interferogramów ENVISAT, w sposób podobny jak dla lat 1992 i 1993.

Na potrzeby szczegółowej analizy wyznaczono wielkości obniżeń dla wybranych obszarów metodą manualnego rozwijania fazy, czyli interpretacji izolinii przyrostów osiadania. Lokalizację i zasięgi przyrostów osiadania określono z dokładnością ok. $\pm 0,5$ cm / 35 dni, a w przypadku obszarów wykazujących bardzo słabą koherencję — z dokładnością ok. $\pm 1,0$ cm / 35 dni.

3.2.4. Przetwarzanie danych PSInSAR

Dla obszaru badań pozyskano zbiór punktów PS na podstawie serii obrazów SAR z satelitów ERS-1 i ERS-2. Zbiór ten, składający się z 72 scen, został udostępniony przez Europejską Agencję Kosmiczną ESA w ramach projektu AO3-127. Obliczenia interferogramów oraz identyfikację i selekcję PS wykonano, używając opisanych wcześniej algorytmów

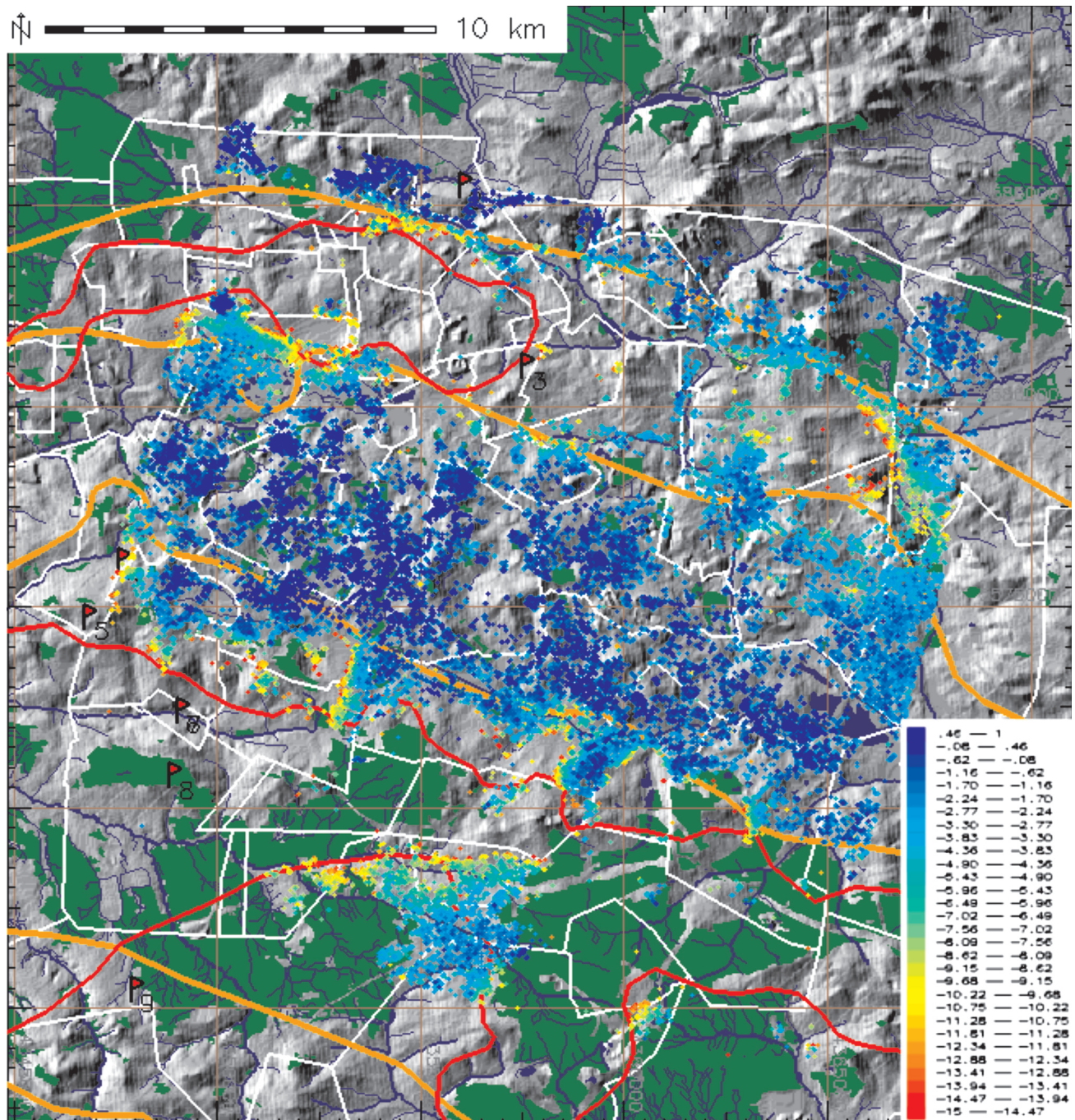


Rys. 3.23. Zgeneralizowany obraz obszarów podlegających obniżaniu:
kolor czerwony — zasięgi osiadań w latach 2004—2005, kolor pomarańczowy — zasięgi osiadań w latach 1992—1999

stworzonych w TU Delft. Samo przetwarzanie danych również przeprowadzono na Uniwersytecie w Delft z zastosowaniem klastra obliczeniowego.

Użyte sceny satelitarne obejmują interwał czasowy niemal 9 lat (od 17 maja 1992 r. do 4 kwietnia 2001 r.). Na etapie przetwarzania interferometrycznego wygenerowano 71 interferogramów, z czego do dalszego przetwarzania użyto 36. Pozostałe interferogramy odrzucono z uwagi na dużą lukę czasową między danymi rejestrowanymi w latach 1992/1993—1995 oraz zbyt dużą różnicę centroid dopplerowskich w stosunku do sceny referencyjnej. Przetwarzania prowadzono dla obszaru 60 km × 56 km (3 000 pikseli × 14 000 pikseli), obejmującego rejon przedstawiony na rys. 3.22. Interferogramy następnie skorygowano, usuwając składową wysokościową fazy z użyciem numerycznego modelu terenu (NMT). Zastosowano model DTED poziom 2 (w siatce jednosekundowej), pozyskany dzięki uprzejmości WOGiK. Model ten jest bardziej szczegółowy aniżeli stosowany najczęściej w interferometrii model SRTM (KAMPES, 2005).

Z uwagi na ograniczenia sprzętowo-systemowe nie zdołano przetworzyć danych dla całego obszaru. Postanowiono więc zredukować obszar do rozmiarów ok. 20 km × 20 km. W wyniku wspomnianych ograniczeń nie zdołano uzyskać pokrycia dla



Rys. 3.24. Mapa względnych prędkości deformacji pionowych GZW otrzymana metodą PSInSAR

całego planowanego obszaru. Przeprowadzono również testy rozwijania fazy metodą bootstrapping, jednak uzyskano wówczas znacznie większe błędy dla obszarów sieci o słabym połączeniu.

Dla badanego obszaru otrzymano 883 punkty PSC, dla których uzyskano 2613 boków siatki trójkątów. Na etapie przestrzennego rozwijania fazy odrzucono 544 boki, co stanowi 39,05%. Ostatecznie otrzymano 77 097 punktów PS. Po odrzuceniu punktów PS charakteryzujących się niską koherencją ostatecznie do analiz użyto 62 212 punktów. Ich rozkład przestrzenny i zakres deformacji przedstawiono na rys. 3.25.

3.2.5. Analiza dokładności wyników uzyskanych dla obszaru GZW

W przypadku deformacji określanych na podstawie interferogramów dokładność pomiaru uzależniona jest od precyzji manualnego rozwijania fazy i waha się w granicach ± 52 mm/r. (0,5 cm/35 dni). Należy podkreślić, że wykrywalne za pomocą tej metody są jedynie obniżenia bezpośrednio związane z odbywającą się eksploatacją podziemną. Górną granicą mierzalności deformacji jest przyrost nachylenia skłonu niecki: jeśli przekroczy ok. 1,5 mm/m, to deformacja taka spowoduje utratę koherencji (PERSKI, 2003).

W trakcie badań porównywano lokalizacje osiadań stwierdzanych interferometrycznie z aktualną (na okres objęty interferogramem) pozycją frontu wydobywczego. Analizy takie prowadzono zgodnie z mapami eksploatacji podziemnej lub na podstawie analizy danych interferometrycznych przez działy mierniczo-geologiczne kopalń. Z danych pochodzących z kopalń: „Katowice-Kleofas”, „Wujek”, „Polska-Wirek”, „Mysłowice”, „Halemba”, „Makoszowy”, „Bolesław Śmiały”, „Szczygłowice” i „Knurów”, wynika jednoznacznie, że wszystkie deformacje określane interferometrycznie mają ścisły związek z eksploatacją podziemną. Ponadto prace prowadzone na obszarze LGOM (KRAWCZYK, PERSKI, 2000) potwierdziły ten związek.

W przypadku metody PSInSAR trudno jest jednoznacznie zdefiniować dokładność. Najczęściej podaje się, że dokładność wyznaczenia prędkości deformacji dla modelu liniowego wynosi ok. ± 1 mm/r. Trzeba jednak pamiętać, że wartości te są względne zarówno w czasie, jak i w przestrzeni: w czasie — w stosunku do sceny obranej za referencyjną, a w przestrzeni — w odniesieniu do punktu obranego za referencyjny. Przyjmuje się, że deformacja w punkcie referencyjnym równa się

zero. Założenie to ma ważne implikacje praktyczne, w przypadku bowiem gdy punkt ten wykazuje rzeczywiste osiadanie, część punktów, w rzeczywistości stabilnych, w metodzie PSInSAR wykaże podnoszenie. Należy być zatem bardzo ostrożnym w interpretacji takiego właśnie „podnoszenia”. Dla każdego z punktów PS liczone są tzn. residua, czyli wielkości odstępstwa pojedynczych obserwacji od modelu liniowego. Bardzo często informacje te są niezwykle cenne, gdyż pokazują rzeczywistą deformację punktu PS w czasie. Jeśli chodzi o residua, to także należy być ostrożnym, gdyż ich wielkość zależy od tego, na ile dobrze został wyznaczony obraz składowej atmosferycznej. Składowa atmosferyczna wyznaczana jest na podstawie przyjętych *a priori* modeli atmosfery. Nieprawidłowo określona (przeszacowana lub nieoszacowana) wartość tej składowej może zatem wpłynąć na wartości poszczególnych residuów. Należy podkreślić, że najbardziej wiarygodną informacją uzyskiwaną metodą PSInSAR jest prędkość deformacji. Oczywiście, jest ona wyznaczana dla tych punktów, których przebieg w czasie można zaproksymować funkcją liniową. Dla obszaru GZW, gdzie bezpośrednio wpływy eksploatacji są nieliniowe zarówno w czasie, jak i w przestrzeni, nie uzyskuje się prawidłowego obrazu deformacji. Dla obszarów, na których prowadzono wydobywanie, nie otrzymano w ogóle punktów PS. Obraz deformacji był możliwy jedynie na obrzeżach tych rejonów, czyli tam, gdzie jest on liniowy wskutek dużej odległości od prowadzonej eksploatacji.

3.3. Kompleksowa analiza danych

3.3.1. Analiza interferogramów

Na podstawie analizy interferogramów można stwierdzić, że przestrzennie strefy występowania osiadań układają się w dwa równoleżnikowe pasy:

- północny — obejmujący nieckę bytomską,
- południowy — występujący w rejonie południowego skrzydła siodła głównego.

Oba pasy bardzo dobrze korelują ze strefowym występowaniem wstrząsów górniczych. Jak już wspomniano, występowanie stref obniżania na interferonach odpowiada rejonom prowadzonej eksploatacji, stąd wniosek, że pasowy układ stref osiadania jest wynikiem prowadzonej w specyficzny sposób eksploatacji. Rozmieszczenie eksploatacji

warunkowane jest natomiast następującymi czynnikami:

- budową geologiczną złoża: dostępność i zasobność pokładów, tektonika złoża, warunki hydrogeologiczne;
- granicami obszarów górniczych i koncesji wydobywczych oraz obecnością infrastruktury górniczej, opłacalnością wydobycia;
- występowaniem obszarów wyeksploatowanych.

Szczególnie ostatni z wymienionych czynników tłumaczy fakt występowania obszaru stabilnego w samym centrum GZW, na obszarze siodła głównego. Eksploatacja na tym terenie została bowiem zakończona w latach 1940—1980, z uwagi na wyeksploatowanie złoża. Zdaniem autora, spłot trzech wymienionych czynników warunkuje istnienie pasowego występowania stref osiadania, a widoczna korelacja przestrzenna „pasów” z budową geologiczną jest sprawą wtórną, wynikającą z warunków górniczo-geologicznych eksploatacji. Stwierdzenie to nie wyklucza istnienia lokalnych anomalii prędkości osiadania, wywołanych wstrząsami górniczymi, uskokami, obecnością starych zrobów w nadkładzie. Ich identyfikacja wymaga jednak szczegółowej analizy poszczególnych przypadków eksploatacji na pojedynczych ścianach wydobywczych (KRAWCZYK i in., 2007; PERSKI, JURA, 2003).

Na obszarze badań analizie poddano otoczenie punktów monitoringu GPS. Szczegółowo zanalizowano interferogramy obejmujące okres podobny do prowadzonych kampanii pomiarowych GPS.

Tabela 3.2. Interferogramy i pomiary GPS

Numer	Daty interferogramu	Satelita/ścieżka	Numer kampanii GPS	Data kampanii GPS
1	2.11.2004—11.01.2005	ES/143	I	25.11.2005
2	brak rejestracji	—	II	1.06.2006
3	brak rejestracji	—	III	16.11.2006
4	23.05.07—27.06.2007	ES/222	IV	01.06.2007

Jak wynika z tabeli 3.2, uzyskano dane interferometryczne jedynie dla kampanii I i IV. Otrzymane interferogramy generalnie prezentują stosunkowo wysoką koherencję, przy czym jakość interferogramu dla kampanii I jest znacznie wyższa. Na podstawie interferogramów stwierdzono, że punkty monitoringu GPS o numerach 6 i 7 znajdowały się na obszarze, na którym zachodziło obniżanie terenu spowodowane eksploatacją podziemną. Punkt 3 znajdował się w rejonie eksploatacji w latach 1995—2004.

W przypadku punktów 6 i 7 obniżenia stwierdzone metodą InSAR dla okresu kampanii I miały dość znaczną wielkość — nawet ok. 1,5 mm/dzień. Dokładna wielkość nie jest znana ze względu na

nią koherencję. Dla kampanii IV w rejonie punktów również zachodziły ruchy obniżające o nieznaną amplitudzie powierzchni 0,8 mm/dzień (słaba koherencja interferogramu).

Jeśli chodzi o punkty 4, 5 i 9, to nie stwierdzono występowania dużych przyrostów osiadania, jednak punkt 5 może im podlegać z uwagi na bliskie sąsiedztwo aktywnego wydobycia (ok. 1 km w kierunku SW). W świetle analizy InSAR punkty 4 i 9 można uznać za stabilne, niepodlegające obecnie bezpośredniemu wpływom aktualnie prowadzonej eksploatacji.

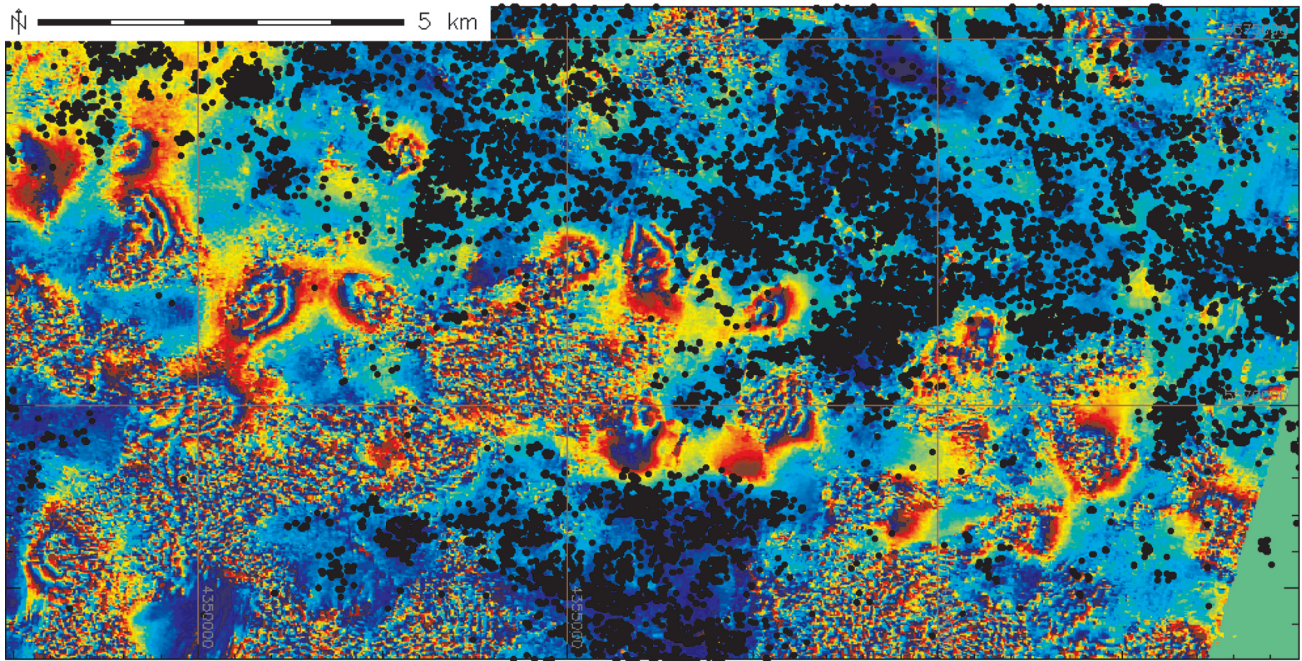
W rejonie północnym punkty monitoringu GPS o numerach 1 i 2 należy uznać za stabilne. Punkt 3, podobnie jak punkt 5, leży w bezpośrednim sąsiedztwie aktywnego skłonu niecki osiadań (ok. 1 km w kierunku NW). Punkt 3 znajdował się natomiast w rejonie objętym osiadaniem w latach dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku.

Uzyskane punkty PS prezentują wielkości obliczonej prędkości deformacji (mm/r.) przy założeniu modelu liniowego. Deformacja liczona jest względem punktu referencyjnego. W analizowanym przypadku punkt referencyjny leży w rejonie Stadionu Śląskiego w Chorzowie (rys. 3.24), stąd stosunkowo niewielka liczba punktów wykazujących podnoszenie. Z rozkładu przestrzennego wartości deformacji liniowych wynika, że najstabilniejszym obszarem centralnej części GOP jest właśnie rejon Chorzowa, z uwagi na zakończoną dosyć dawno eksploatację podziemną.

Jak już wspomniano, dla obszaru GZW zakres zmierzonych metodą PSInSAR deformacji jest znacznie niższy aniżeli tych wykazywanych przez pomiary naziemne. Należy jednak zaznaczyć, że nie uzyskano punktów na obszarach, na których odbywała się eksploatacja podziemna węgla (deformacje nieliniowe). Z porównania rozmieszczenia PS z interferogramami (rys. 3.25) jednoznacznie wynika, że algorytmy zastosowane w metodzie PSI obecnie nie nadają się do mierzenia deformacji pochodzących od podziemnego wydobycia węgla kamiennego.

Pomiary uzyskane metodą PS dobrze charakteryzują deformacje na terenach, na których eksploatacja górnicza została zakończona wiele lat temu, gdzie występujące nadal powolne deformacje mają charakter podobny do liniowego. Podczas interpretacji wyników z dużą ostrożnością należy traktować odizolowane, pojedyncze punkty położone wewnątrz kompleksów leśnych, gdyż w takich przypadkach występują bardzo często błędy rozwiązywania fazy, wynikające ze słabej redundancji sieci trójkątów.

Przeprowadzono analizę porównawczą danych PSInSAR i GPS dla punktów monitoringu. Ponie-

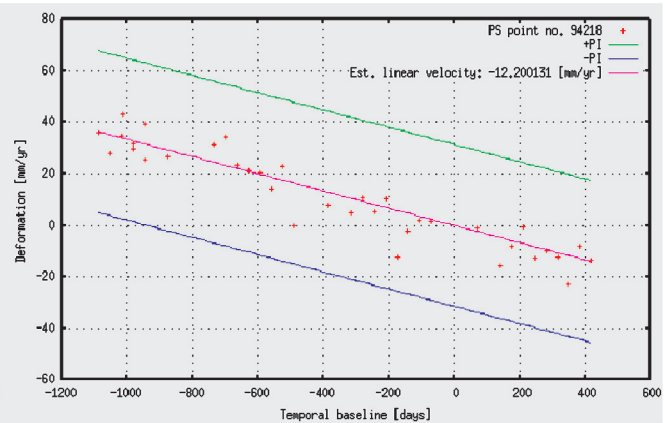
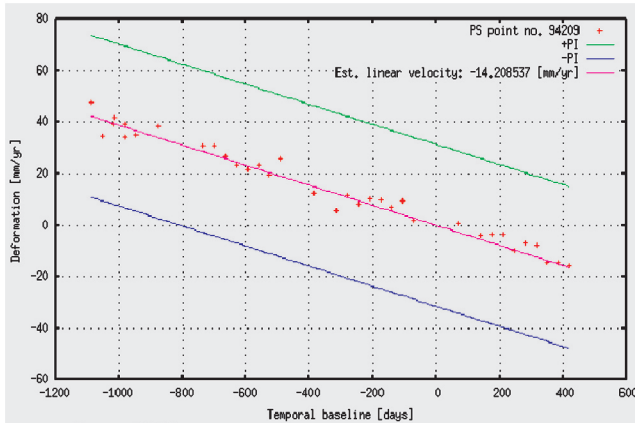


Rys. 3.25. Rozmieszczenie punktów PS w stosunku do klasycznego interferogramu D-InSAR (17.08.1998—21.08.1998)
Wyraźnie widoczny brak punktów PS na obszarach aktywnie prowadzonej eksploatacji w rejonach występowania prążków interferometrycznych

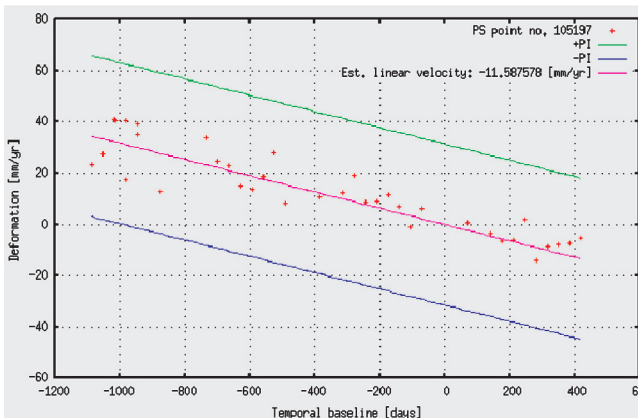
waż metoda PSInSAR jako oportunistyczna nie pozwala na zdefiniowanie położenia punktu pomiarowego, do celów porównawczych użyto najbliższych punktów PS. Z uwagi na fakt lokalizacji niektórych punktów GPS na obszarach aktywnego

wydobycia porównanie było możliwe jedynie w przypadku niektórych punktów (2, 4, 5). Punkty 1, 9 znajdują się poza obszarem opracowania PS, natomiast punkty 3, 6, 7, 8 — na obszarach objętych deformacjami nieliniowymi (rys. 4.26).

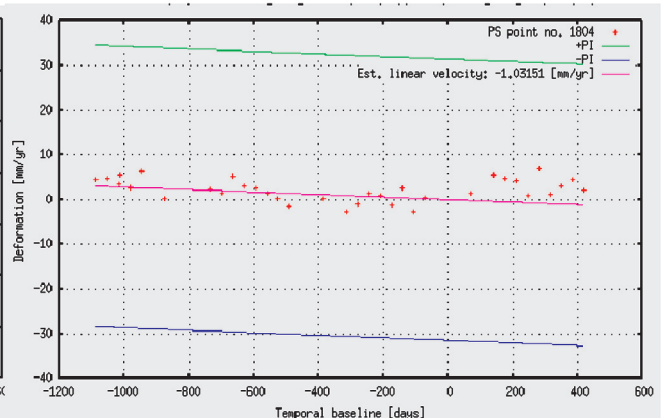
Punkt GPS nr.4



Punkt GPS nr.5



Punkt GPS nr.2



Rys. 3.26. Deformacje liniowe i resida PSInSAR dla punktów GPS 2, 4, 5. Analiza PSInSAR obejmuje lata 1995—2000

Literatura

- BOSY J., KONTNY B., CACOŃ S., 2006: *The Earth crust surface movements in SW Poland from GPS and leveling data*. Reports on Geodesy 76.
- CATTABENI M., MONTI-GUARNIERI A., ROCCA F., 1994: *Estimation and Improvement of Coherence in SAR Interferograms, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Pasadena, CA, USA, 8–12 August 1994*, s. 720–722.
- CZARNECKA K., 1988: *Problemy interpretacji badań współczesnych ruchów skorupy ziemskiej w Polsce*. W: „Geodezja”. Z. 31. Warszawa, Politechnika Warszawska.
- CZARNECKI K., 2004: *Badania geodynamiczne pienińskiego pasa skalowego w rejonie Czorsztyna*. Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- CZARNECKI K., MOJZES M., PAPCO J., WALO J., 2003: *First results of GPS measurements campaigns in Tatra Mountains*. Reports on Geodesy 64.
- FERRETTI A., PRATI C., ROCCA F., 2001: *Permanent Scatterers in SAR Interferometry*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39(1), s. 8–20.
- GÓRAL W., BANASIK P., MACIASZEK J., SZEWCZYK J., 2005: *Badawcza sieć geodynamiczna na obszarze wschodniej części Górnośląskiego Zagłębia Węglowego*. Kraków, Akademia Górniczo-Hutnicza.
- GÓRAL W., SZEWCZYK J., 2004: *Zastosowanie technologii GPS w precyzyjnych pomiarach deformacji*. Kraków, Akademia Górniczo-Hutnicza.
- KAMPES B.M., 2005: *Displacement Parameter Estimation using Permanent Scatterer Interferometry*. Delft, the Netherlands, Delft University of Technology.
- KAMPES B.M., HANSEN R.F., PERSKI Z., 2003: *Radar Interferometry with Public Domain Tools*. Third International Workshop on ERS SAR Interferometry, ‘FRINGE03’, Frascati, Italy, 1–5 Dec 2003, s. 6.
- KRAWCZYK A., PERSKI Z., 2000: *Application of satellite radar interferometry on the areas of underground exploitation of copper ore in LGOM — Poland, 11th International Congress of the International Society for Mine Surveying*. Kraków, Akademia Górniczo-Hutnicza, s. 209–218.
- KRAWCZYK A., PERSKI Z., HANSEN R., 2007: *Application of ASAR interferometry for motorway deformation monitoring*. ESA ENVISAT Symposium, Montreux, Switzerland, 23–27 April 2007.
- PERSKI Z., 2000: *Zastosowanie satelitarnej interferometrii radarowej do określania dynamiki i zasięgu górniczych deformacji terenu na przykładzie wybranych obszarów Górnośląskiego Zagłębia Węglowego*. Sosnowiec, WNoZ UŚ [praca doktorska — niepublikowana], s. 9–40.
- PERSKI Z., 2003: *InSAR and POLinSAR for land subsidence monitoring — a user perspective. Applications of SAR Polarimetry and Polarimetric Interferometry*. Frascati, ESA.
- PERSKI Z., JURA D., 2003: *Identification and measurement of mining subsidence with SAR interferometry: potentials and limitations*. In: 11th International Symp. on Deformation Measurements, Santorini, s. 165–171.
- PERSKI Z., KETELAAR G., MRÓZ M., 2007: *Interpretacja danych Envisat/ASAR o przemiennej polaryzacji na obszarach zurbanizowanych w kontekście charakterystyki stabilnych rozpraszaczy (persistent scatterers)*. Arch. Fotogrametrii i Teledetekcji, 16, s. 467–482.
- PERSKI Z., MRÓZ M., 2007: *Zastosowanie metod interferometrii radarowej InSAR do badania naturalnych ruchów powierzchni terenu w Polsce. Projekt GEO-IN-SAR*. Arch. Fotogrametrii i Teledetekcji, 17, s. 613–624.
- PRATI C., ROCCA F., 1994: *Use of the spectral shift in SAR interferometry, Second ERS-1 Symposium-Space at the Service of our Environment, Hamburg, Germany, 11–14 October 1993*, s. 691–696.
- ZEBKER H.A., GOLDSTEIN R.M., 1986: *Topographic Mapping From Interferometric Synthetic Aperture Radar Observations*. J. Geophys. Res., 91(B5), s. 4993–4999.
- ZEBKER H.A., VILLASENOR J., 1992: *Decorrelation in interferometric radar echoes*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 30(5), s. 950–959.

Zbigniew Perski