

## Analiza deformacji powierzchniowych wzdłuż południowo-zachodnich wybrzeży Zatoki Gdańskiej z zastosowaniem satelitarnych danych interferometrycznych

Magdalena Czarnogórska<sup>1</sup>, Marek Graniczny<sup>1</sup>, Szymon Uścińowicz<sup>2</sup>, Raffaele Nutricato<sup>3</sup>, Saverio Triggiani<sup>3</sup>, Davide Oscar Nitti<sup>3</sup>, Fabio Bovenga<sup>4</sup>, Janusz Wąsowski<sup>5</sup>



M. Czarnogórska



M. Graniczny



S. Uścińowicz



R. Nutricato



S. Triggiani



D.O. Nitti



F. Bovenga



J. Wąsowski

**PSI analysis of ground deformations along SW coast of the Gulf of Gdańsk.** *Prz. Geol.*, 60: 206–211.

*A b s t r a c t.* The paper presents results of SPINUA (Stable Point Interferometry over Unurbanised Areas) Persistent Scatterers Interferometry (PSI) processing chain to study Earth surface deformations along the SW coast of the Gulf of Gdańsk, along the SE part of the Baltic Sea. As the input for SPINUA techniques 40 descending ERS-1/2 SLC (Frame = 251, Track = 36) images from the period 1995–2001 has been used. The area of interest (AOI) includes few cities and several towns, villages and harbors. The low lying coastal areas of the SW part of the Gulf of Gdańsk are at risk of floods and marine erosion. The PSI results, however, did not reveal the presence of a regional scale, spatially consistent pattern of displacements. It is likely that any crustal deformations in the AOI simply do not exceed  $\pm 2$

mm/year, which is the velocity threshold we assumed to distinguish between moving and non-moving persistent scatterers (PS). Importantly, for the most part the urban areas of the main cities (Gdańsk, Gdynia and Sopot) results show ground stability. Nevertheless, significant downward movements up to several mm/year, are locally noticed in the Vistula river delta – alluvial plain system located in the coastal zone east of Gdańsk as well as in the inland area west of the Gdańsk city. Indeed, the highest subsidence rates ( $-12$  mm/year) was observed in the Gdańsk petroleum refinery constructed on alluvial sediments. Thus the anthropogenic loading and consolidation of the recent deposits can locally be an important factor causing ground subsidence.

**Keywords:** Persistent Scatterers Interferometry (PSI), remote sensing, ground displacements, Baltic coastal zone

Wzmożenie procesów erozji wybrzeży Zatoki Gdańskiej powodowane jest przyspieszonym wzrostem poziomu morza oraz częstotliwości i siły sztormów. Na wzrost poziomu morza poza zmianami klimatycznymi mogą mieć wpływ również pionowe ruchy skorupy ziemskiej. Dotychczasowe analizy ruchów pionowych powierzchni ziemi przeprowadzane w skali kraju nie dostarczyły dotychczas jednoznacznych i spójnych informacji o ich przestrzennym zróżnicowaniu i zakresie (Liszkowski 1982; Wyrzykowski, 1985; Kowalczyk, 2006).

W kontekście pomiarów niwelacji precyzyjnej zachodnia część zatoki, położona na północ od Gdańska, wydaje się tektonicznie stabilna, a współczesne pionowe ruchy skorupy ziemskiej oscylują wokół 0. Z kolei południowa część zatoki, rozpościerająca się na wschód od Gdańska, osiada w stopniu 2 mm/rok (Wyrzykowski, 1985; Kowal-

czyk, 2006). W zasadzie nie ma bezpośrednich dowodów geologicznych na istnienie tak szybkich osiadań w rejonie Gdańska (Liszkowski, 1982). Wstępne analizy danych paleogeograficznych wskazują jednak, że w południowo-wschodniej części zatoki, w trakcie ostatnich 5000 lat miało i ma miejsce osiadanie rzędu 0,1 mm/rok w stosunku do części północno-zachodniej. Dane z zapisów mareografów wskazują również szybszy o 0,1 mm/rok wzrost poziomu morza w części południowo-wschodniej. W rejonie Gdańska na osiadanie powierzchni ziemi, poza czynnikami natury geotektonicznej, może mieć wpływ zwiększone wydobycie wód podziemnych. Rozpoznanie charakteru ruchów obniżających ma w tym rejonie kluczowe znaczenie, z uwagi na intensywne zagospodarowanie wybrzeża Zatoki Gdańskiej oraz możliwość zagrożenia powodziowego. W czasach historycznych zanotowano w rejonie

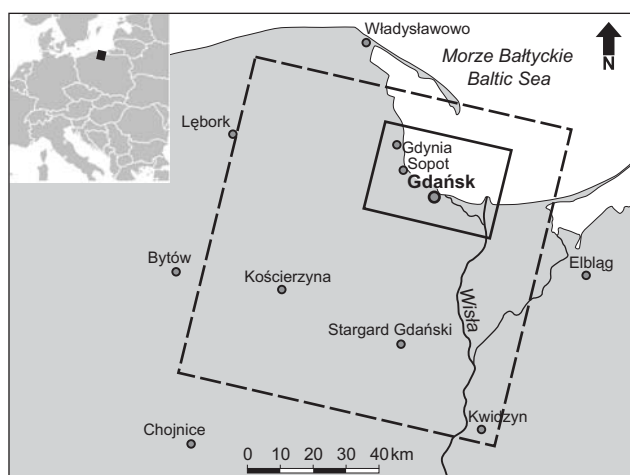
<sup>1</sup>Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Rakowiecka 4, 00-975, Warszawa; magdalena.czarnogorska@pgi.gov.pl, marek.graniczny@pgi.gov.pl.

<sup>2</sup>Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, Oddział Geologii Morza, ul. Kościarska 5, 80-328 Gdańsk; szymon.uscincowicz@pgi.gov.pl.

<sup>3</sup>Dipartimento Interateneo di Fisica, Politecnico di Bari, Via Amendola 173, 70126 Bari (Włochy); davide.nitti@fisica.uniba.it.

<sup>4</sup>CNR-ISSIA, Via Amendola, 122/d – 70126 Bari (Włochy); bovenga@ba.issia.cnr.it.

<sup>5</sup>CNR-IRPI, Via Amendola, 122/i – 70126 Bari (Włochy); j.wasowski@ba.irpi.cnr.it.



**Ryc. 1.** Lokalizacja obszaru badań (południowo-zachodnie wybrzeże Zatoki Gdańskiej) – zaznaczono linią ciągłą. Przerywane kreski wyznaczają zasięg kadru wykorzystanych scen satelitarnych ERS1/2

**Fig. 1.** Location of the area of interest marked by solid line (the SW coast of the Gulf of Gdansk) and ERS-1/2 SAR coverage used for processing purposes marked by dashed line

Gdańska przypadki powodzi i katastrofalnych sztormów, w wyniku których niszczona była infrastruktura miejska i portowa. W czasie ostatniej wielkiej powodzi w roku 1826 duża część nie tylko Żuław Wiślanych, ale również Gdańska, znalazła się pod wodą. Podobnych wydarzeń można spodziewać się również współcześnie, biorąc pod uwagę stały wzrost poziomu morza. Dlatego też omawiany obszar został poddany analizie satelitarnych danych interferometrycznych – PSI (*Persistent Scatterers Interferometry*), z uwagi na możliwość prześledzenia przemieszczeń powierzchni terenu na dużym obszarze.

## CHARAKTERYSTYKA OBSZARU BADAŃ

Badany obszar obejmuje kilkaset kilometrów kwadratowych i rozciąga się wzdłuż południowo-zachodnich wybrzeży Zatoki Gdańskiej. Na zachodzie sięga po tereny wysoczyzny morenowej, natomiast na wschodzie po ujście Wisły w rejonie Świbna (ryc. 1). Większość badanego obszaru pokrywają płaskie tereny delty wiślanej. Obszar delty Wisły jest płaski, a znajdujące się tam elewacje z reguły nie przekraczają wysokości 2,5 m.n.p.m. Na obszarze tym występują również tereny depresyjne, do około 2 m p.p.m. Wysoczyzna morenowa położona w zachodniej części badanego obszaru wznosi się do wysokości około 40–140 m n.p.m. Krawędzie wysoczyzny poprzecinane są systemem szerokich dolin.

Powierzchnia terenu pokryta jest utworami holocenijskimi i plejstocenijskimi (Mojski, 1979). Osady holocenijskie dominują na płaskich terenach delty Wisły. Są to przede wszystkim muły, torfy oraz piaski rzeczne o miąższościach około 20–30 m. Na kontakcie delty Wisły z Bałtykiem występują różnowiekowe ciągi wydmy wznoszące się lokalnie do 10–20 m n.p.m. Wysoczyzna morenowa zbudowana jest głównie z glin, ilów oraz piasków fluwioglacjalnych wieku plejstocenijskiego, których miąższość nie przekracza 200 m. Na obszarze miasta Gdańska występują również osady antropogeniczne. Ocenia się, że od

okresu Średniowiecza powierzchnia terenu podniosła się o około 3 m.

## PRZETWARZANIE PSI

Dane radarowe były przetwarzane za pomocą programu SPINUA (*Stable Point Interferometry over Unurbanized Areas*), który jest jednym z szeregu implementacji metody PSInSAR, opracowanej przez zespół POLIMI (Ferretti, 2001), służących do przetwarzania i analizy PSI. Program ten charakteryzuje się stopniowym podejściem na etapie rejestracji serii obrazów radarowych wykonanych w różnym czasie. Szczegółowy opis metody SPINUA można znaleźć w publikacji Bovenga i in. (2004). Interferogramy dyferencyjne są generowane przy wykorzystaniu zewnętrznego, cyfrowego modelu terenu SRTM o rozdzielczości przestrzennej  $90 \times 90 \text{ m}^2$ . Ponadto program SPINUA wyróżnia przetwarzanie niewielkich fragmentów obrazów radarowych, obejmujących zazwyczaj kilka kilometrów kwadratowych. Umożliwia to w dalszej kolejności optymalizację zagęszczenia i identyfikację potencjalnych PS (*Persistent Scatterers*) – radarowych punktów pomiarowych, nazywanych również stabilnymi rozpraszaczami (Perski, 2008). Ponadto, ich niewielki rozmiar umożliwia lokalne zastosowanie liniowej aproksymacji sygnału fazy atmosferycznej, co z kolei zapewnia większą dokładność przetwarzania. Wybrane niewielkie fragmenty obrazów częściowo zachodzą na siebie tak, aby otrzymać jednorodne wyrównanie referencyjne, co jest istotne dla otrzymania poprawnej mapy deformacji. Zbiór analizowanych danych obejmował zestaw 41 obrazów satelitarnych ERS-1 i ERS-2 zarejestrowanych w okresie 1995–2001, w tzw. wariacie schodzącym – czyli, dla części orbity, gdy satelita porusza się z N ku S (ryc. 1). Jako obraz referencyjny wyznaczono scenę z 22 maja 1997 r.

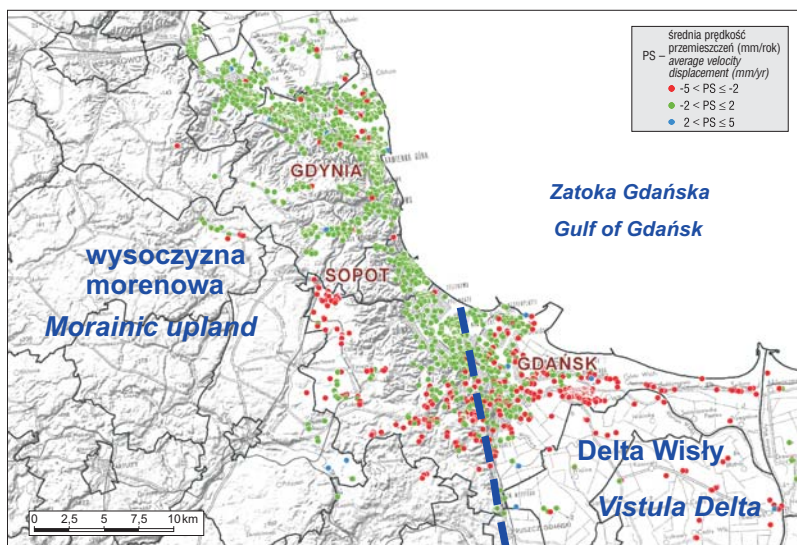
Dane satelitarne ERS SAR zostały dostarczone przez ESA w ramach projektu CAT-1 nr 4416.

## WYNIKI INTERPRETACJI

### Skala regionalna

Na rycinie 2 przedstawiono przestrzenną dystrybucję geokodowanych PS na obszarze południowo-zachodniego wybrzeża Zatoki Gdańskiej. Przeciętna wartość szybkości przemieszczeń LOS (*Line of Sight* – co można przetłumaczyć jako linia wybierania sygnału antena–teren skośnie do kierunku pionu) została zmniejszona do wartości  $\pm 5 \text{ mm/rok}$  do celów prawidłowej wizualizacji danych. Najogólniej można stwierdzić, że na badanym obszarze znaczna większość PS nie wskazuje na występowanie przemieszczeń. Co więcej centra głównych aglomeracji miejskich Gdańska, Gdyni czy Sopotu charakteryzują się stabilnością gruntów. Natomiast na wschodnich oraz zachodnich peryferiach Gdańska zaznaczyły się wyraźnie PS o wartościach ujemnych. Ponadto dwa wyraźne skupienia ujemnych PS wystąpiły się na zachód od Gdańska oraz Sopotu. Pierwsze z nich zostały zlokalizowane na terenie gdańskiego lotniska, natomiast drugie na obszarze nowej infrastruktury budowlanej. Oba obszary cechuje płaska, mało zróżnicowana





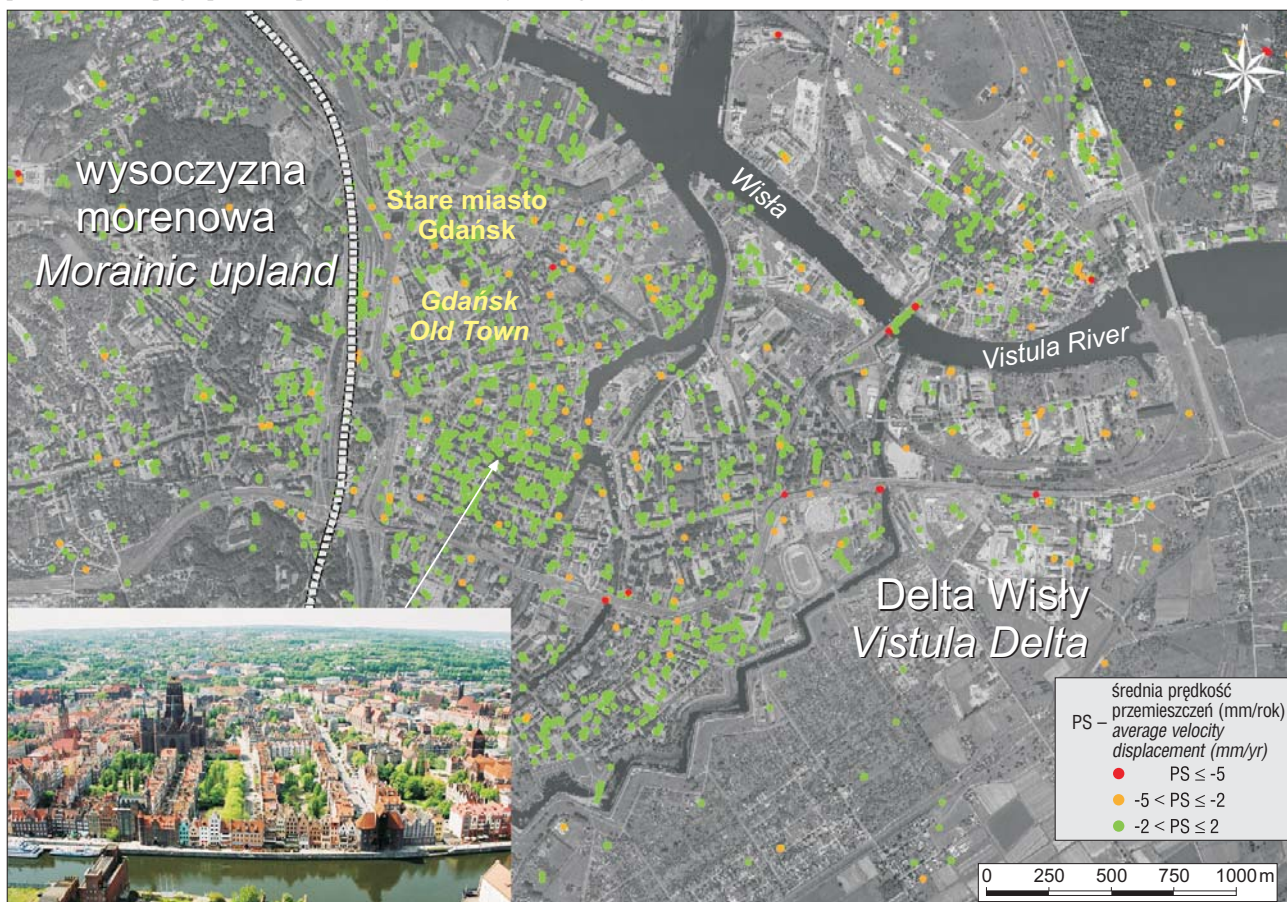
**Ryc. 2.** Przestrzenne rozmieszczenie punktów pomiarowych PS w projekcji kartograficznej na obszarze południowo-zachodniego wybrzeża Zatoki Gdańskiej. Legenda przedstawia średnią prędkość przemieszczeń w mm/rok w kierunku linii widzenia (LOS) w okresie 1995–2001. Punkty PS naniesiono na kompozycję topograficzną (opracował W. Jegliński)

**Fig. 2.** Spatial distribution of persistent scatterers (PS) in cartographic projection along the SW coast of the Gulf of Gdansk. The legend shows average Line of Sight (LOS) velocity for the period 1995–2001. Persistent scatterers have been superimposed on the topographic composition (elaborated by W. Jegliński)

topografia oraz występowanie osadów gliniastych i ilastych. Najprawdopodobniej zaobserwowane osiadanie terenu jest związane z kompaktacją gruntów powstałą wskutek obciążenia nowej zabudowy.

### Skala szczegółowa

Analiza interferometryczna jest często niezwykle przydatna do oceny przemieszczeń w skali szczegółowej. Bardziej wnikliwa analiza starego centrum Gdańska uwiadcza, że oprócz licznych punktów wskazujących na stabilność podłoża (co sygnalizowano uprzednio) znajdują się pojedyncze PS, sugerujące proces osiadania, co może być związane z występowaniem gruntów słabonośnych (ryc. 3). W takich przypadkach wskazana jest wizja lokalna i sięgnięcie o ile to możliwe po wyniki innych pomiarów geodezyjnych, na przykład precyzyjnej niwelacji. Ciekawe spostrzeżenia odnotowano w przypadku mostu Siennickiego nad Martwą Wisłą, znajdującego się we wschodniej części miasta (ryc. 4). O ile zasadnicza część mostu jest stabilna to filary



**Ryc. 3.** Większość punktów PS w projekcji kartograficznej wskazuje na stabilność podłoża starego centrum Gdańska. Jednak pojedyncze punkty PS wskazują na lokalny proces osiadania. Kolorowe zdjęcie przedstawia stare centrum Gdańska. W tle ortofotomapa pobrana z [www.geoportal.gov.pl](http://www.geoportal.gov.pl). W lewym dolnym rogu zdjęcie lotnicze starego miasta (w 2004 r.). Fot. P. Domaradzki

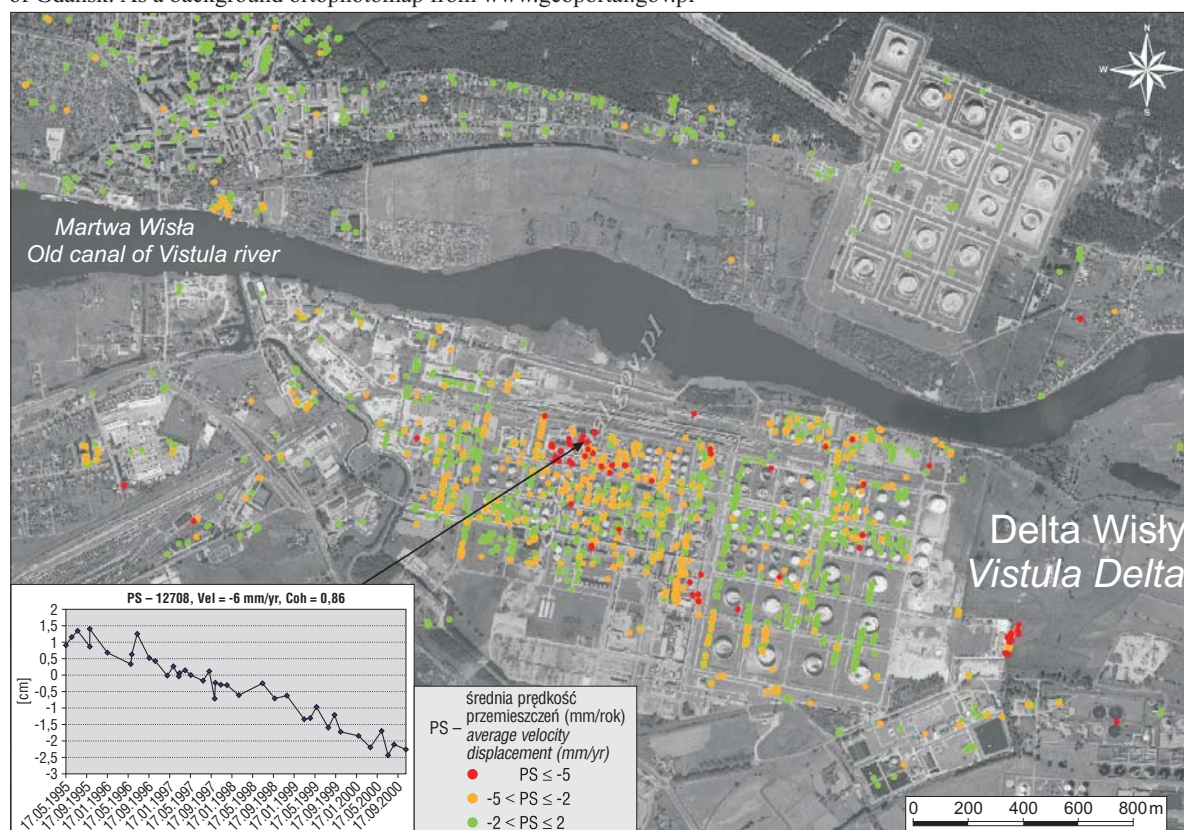
**Fig. 3.** The majority of PS data base in cartographic projection show the stability of the ground of the old town Gdańsk. However single PS points show the local subsiding process. As a background orthophotomap from [www.geoportal.gov.pl](http://www.geoportal.gov.pl). In the bottom left corner of the figure there is visible an airphoto of the old town (in 2004). Fot. by P. Domaradzki





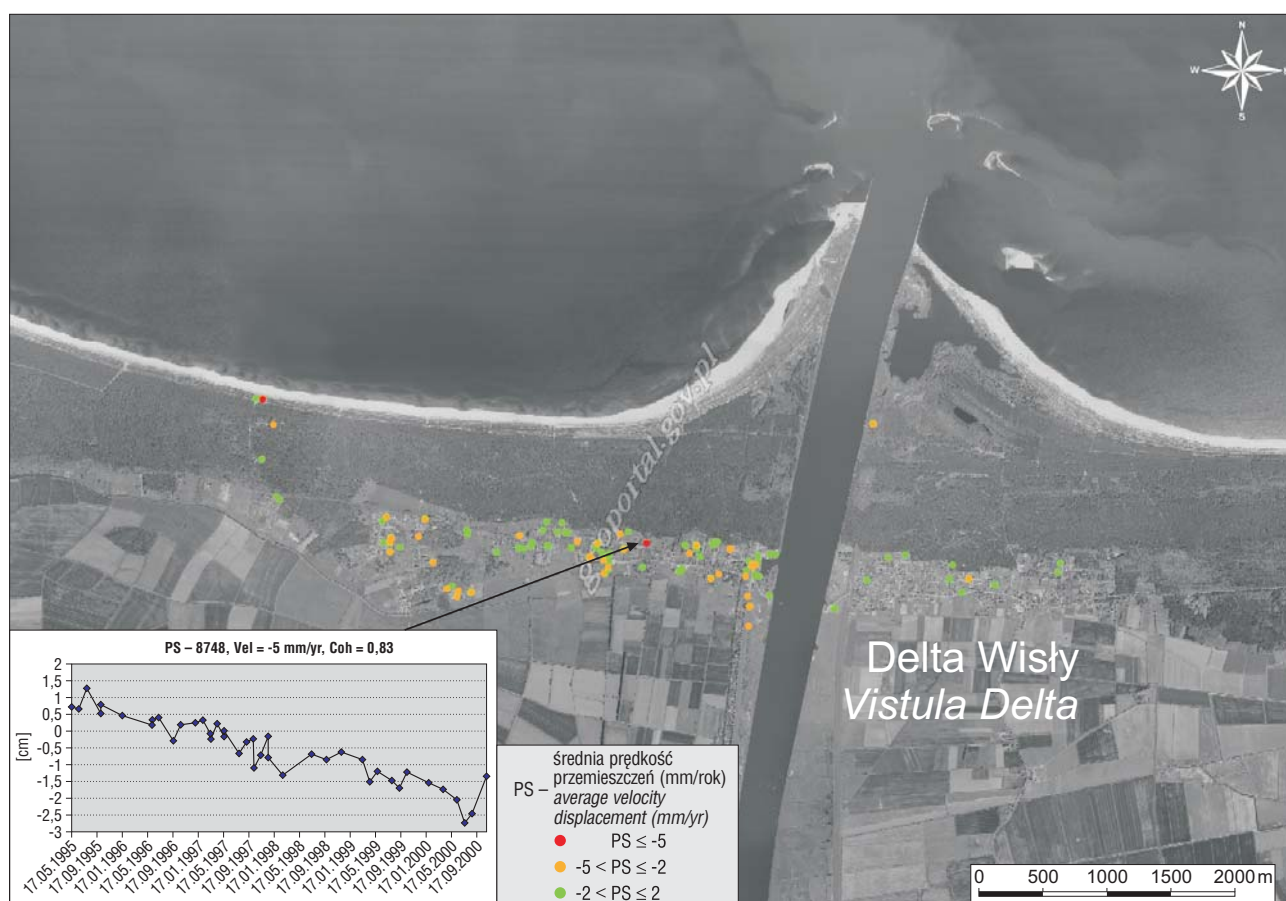
**Ryc. 4.** Osiadanie zarejestrowane na filarach mostu Siennickiego, centralna część mostu jest stabilna – wschodnia część Gdańska. W tle ortofotomapa pobrana z [www.geoportal.gov.pl](http://www.geoportal.gov.pl)

**Fig. 4.** Subsiding process registered in abutments of Siennicki bridge, central part of the bridge is stable – east part of the city of Gdansk. As a background ortophotomap from [www.geoportal.gov.pl](http://www.geoportal.gov.pl)



**Ryc. 5.** Największe wartości osiadania zarejestrowano na obszarze rafinerii gdańskiej. Wykres przedstawia serie czasową wybranego punktu PS (o numerze 12708) o średniej prędkości przemieszczeń – 6 mm/rok i koherencji 0,86. W tle ortofotomapa pobrana z [www.geoportal.gov.pl](http://www.geoportal.gov.pl)

**Fig. 5.** The highest rate of subsidence was registered in the Gdansk refinery site. Graph shows time series of a PS (number 12708) with an average velocity of -6 mm/year and coherence of 0.86. As a background ortophotomap from [www.geoportal.gov.pl](http://www.geoportal.gov.pl)



**Ryc. 6.** Punkty PS w projekcji kartograficznej o ujemnych wartościach zarejestrowano także w rejonie Świbna – ujście Wisły. Wykres przedstawia serię czasową wybranego punktu PS (o numerze 8748) o średniej prędkości przemieszczeń 5 mm/rok i koherencji 0,83. W tle ortofotomapa pobrana z [www.geoportal.gov.pl](http://www.geoportal.gov.pl)

**Fig. 6.** Persistent scatterers in cartographic projection displaying negative values have been registered also in Świbno – outlet of Vistula river. Graph shows time series of selected PS (number 8748) with an average velocity of 5 mm/year and coherence of 0,83. As a background orthophotomap from [www.geoportal.gov.pl](http://www.geoportal.gov.pl)

mostowe charakteryzują się niestabilnymi PS, z wyraźną tendencją do obniżania. Jest to zgodne z geotechnicznego punktu widzenia, ponieważ z reguły filary mostowe w pierwszej kolejności są zagrożone niestabilnością w podłożu. Również i w tym przypadku analiza interferometryczna wskazuje na konieczność wykonania wizji terenowej podjęcia szczegółowych badań.

Innym niezwykle ciekawym obszarem wyróżnionym w trakcie analizy interferometrycznej jest teren rafinerii gdańskiej. W rejonie tym zaznacza się niezwykle wyraźnie duże skupienie PS o ujemnych wartościach (ryc. 5). W miejscu tym odnotowano największe wartości ujemne w całym badanym obszarze, sięgające 12 mm/rok (Czarnogórska i in., 2009). Obserwacje te potwierdzono również w innym opracowaniu (Perski & Mróz, 2008). Na terenie rafinerii oprócz ujemnych PS są również inne nie wskazujące na obecność przemieszczeń. Najprawdopodobniej przyczyna zaistniałych procesów wynika z przyczyn geomorfologicznych – lokalizacji obiektu w obrębie starych naturalnych koryt Wisły na terenie jej delty oraz geologicznych – występowania rzecznych osadów aluwialnych, mułów oraz materiału organicznego w tym torfów. Obserwowany efekt powstał zatem zapewne w wyniku zróżnicowanej kompaktacji osadów pod wpływem ciężaru infrastruktury budowlanej rafinerii. Warto również zaznaczyć, że budowę rafinerii zapoczątkowano w latach 70. XX wieku. Proces ten jest więc

długotrwały, jakkolwiek należy wziąć pod uwagę znaczną miąższość osadów słabonośnych 30–40 m oraz znaczny ciężar konstrukcji. Podobną sytuację zaobserwowano w trakcie analizy PSI aglomeracji Rzymu. W południowej części miasta na terenach zabudowy w obrębie osadów aluwialnych Tybru odnotowano wyraźne osiadanie, niezależnie od faktu, że zabudowa została zapoczątkowana jeszcze w latach czterdziestych, bezpośrednio po zakończeniu II Wojny Światowej (Wasowski & Ferretti, 2007).

Innym obszarem skupienia PS wskazujących na przemieszczenia jest rejon ujścia Wisły w rejonie Świbna (ryc. 6). Zarejestrowane na tym obszarze PS odzwierciedlają sygnały odebrane od pojedynczych domów bądź innych związanych z nimi obiektów. Obecność stabilnych i niestabilnych PS sugeruje również i tutaj zróżnicowane osiadanie w skali lokalnej. Przyczyna takiego zachowania punktów PS może mieć dwojaki charakter. Z całą pewnością jest to związane ze specyfiką tego miejsca i zróżnicowaniem litologii oraz wahaniami zwierciadła wód gruntowych.

## WNIOSKI

Wyniki analizy PSI nie potwierdziły jednoznacznie spójnego i regularnego obrazu przemieszczeń wzdłuż południowo-zachodnich wybrzeży Zatoki Gdańskiej. Jest bardzo prawdopodobne, że ruchy skorupy ziemskiej w tym



rejonie nie przekraczają wartości  $\pm 2$  mm/rok, co utrudnia lub wręcz uniemożliwia jednoznaczny interpretację PS na powierzchni terenu. Jest bezspornie oczywiste, że badania i pomiary terenowe są niezbędne do właściwej oceny stwierdzonych przemieszczeń. Wszystko wskazuje jednak na to, że przemieszczenia są związane ze zróżnicowanym osiadaniem budynków oraz infrastruktury inżynierskiej powstałym wskutek kompaktacji gruntów. Najwyższe wartości osiadań – 12 mm/rok – zarejestrowano na terenie rafinerii gdańskiej, zbudowanej na aluwialnych osadach delty Wisły.

Ważną obserwacją stanowi również fakt, że przeważająca część aglomeracji Gdańska, Gdyni i Sopotu jest stabilna.

### Literatura

- BOVENGA F., REFICE A., NUTRICATO R., GUERRIERO L. & CHIARADIA M.T. 2004 – SPINUA: a flexible processing chain for ERS/ENVISAT long term interferometry, Proceedings of ESA – ENVISAT Symposium, Salzburg, Austria, 6–10 September 2004.
- CZARNOGÓRSKA M., GRANICZNY M., UŚCINOWICZ Sz., NUTRICATO N., TRIGGIANI S., NITTI D.O., BOVENGA F. & WASOWSKI J. 2009 – PSI analysis of ground deformations along the south-western coast of the gulf of Gdańsk (Poland), The Proceedings of the Fringe Conference 2009, ESA ESRIN, Frascati, Italy, CD-ROM-SP-677.
- KOWALCZYK K. 2006 – Nowa mapa współczesnych pionowych ruchów skorupy ziemskiej na obszarze Polski. Cały kraj się obsuwa. *Geodeta*, 8 (135): 45–48.
- KOWALCZYK K. 2006 – Wyznaczenie modelu ruchów pionowych skorupy ziemskiej na obszarze Polski. Rozprawa doktorska UWM 2006 Olsztyn.
- LISZKOWSKI J. 1982 – Geneza pola współczesnych pionowych ruchów skorupy ziemskiej na obszarze Polski. *Rozprawy Uniwersytetu Warszawskiego* 174, 179 s.
- MOJSKI J.E. 1979 – Szczegółowa mapa geologiczna Polski 1 : 50 000, ark. Gdańsk, Instytut Geologiczny, Warszawa.
- PERSKI Z. 2008 – Współczesna aktywność tektoniczna Tatr i Podhala w świetle wyników badań satelitarnej interferometrii radarowej InSAR i PSInSAR [W:] *Tatrzańskie mapy geologiczne, Zakopane, 27–29.05.2008. Materiały konferencyjne*. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa: 39–40.
- PERSKI Z. & MRÓZ M. 2008 – Współczesna aktywność geodynamiczna wybrzeża Bałtyku w świetle wyników badań satelitarnej interferometrii radarowej InSAR, PSInSAR. [W:] *XVI Ogólnopolskie Sympozjum Naukowe 'Geoinformacja obrazowa w świetle aktualnych potrzeb'*, Międzyzdroje 15–17 października 2008. Streszczenie, *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 18: 509–517.
- UŚCINOWICZ Sz. 2003 – Relative sea level changes, glacioisostatic rebound and shoreline displacement In the Southern Baltic, *Polish Geological Institute Special Papers*, Vol. 10.
- WASOWSKI J. & FERRETTI A. 2007 – Detecting site instability hazards with SAR interferometry. [In:] *New Developments and Challenges in Remote Sensing*, Oluic Z., Bochenek Z. (ed). Milpress, Rotterdam, 707–713.
- WYRZYKOWSKI 1985 – Map of recent vertical movements of the Earth crust on the territory of Poland 1 : 2 500 000, Instytut Geodezji i Kartografii, Warszawa.

Praca wpłynęła do redakcji 7.05.2010 r.  
Po recenzji akceptowano do druku 30.12.2010 r.