

## Przestrzenne rozmieszczenie osiadań w rejonie Kopalni Soli Wieliczka w świetle satelitarnych danych interferometrycznych

Janusz Wąsowski<sup>1</sup>, Fabio Bovenga<sup>2</sup>, Raffaele Nutricato<sup>3</sup>, Domenico Conte<sup>3</sup>,  
Alberto Refice<sup>2</sup>, Marek Graniczny<sup>4</sup>, Zbigniew Kowalski<sup>4</sup>



J. Wąsowski

F. Bovenga

R. Nutricato

D. Conte

A. Refice

M. Graniczny

Z. Kowalski

**Spatial distribution of subsidence in the Wieliczka Salt Mine area as detected through satellite interferometry.** *Prz. Geol.*, 57: 164–172.

*Abstract.* The paper presents the use of the Persistent Scatterers Interferometry (PSI) Synthetic Aperture Radar (SAR) data to determine magnitude of subsidence in area of the town of Wieliczka. The town is home to a unique salt mine, over 700 years old, one of the best known tourist attractions in Poland. Each year the mine is visited by about 1 million tourists from all over the world and in 1978 UNESCO placed it on its first International List of the World Cultural and Natural Heritage. There is direct evidence that the mining has been influencing stability of ground and buildings in the town, which is located above the mine. The application of the PSI SPINUA technique made it possible to identify large number of radar targets (with density exceeding 100 PS/km<sup>2</sup>), suitable for monitoring ground motion in the Wieliczka area. The results show continuous subsidence with average annual movements ranging from a few millimeter per year to 24 mm/yr in the period 1992–2000. The detected subsiding zone very well corresponds to the extent of the underground salt mine. There are also indications of possible connections between the mine-induced subsidence and the presence of the old large landslides occurring on the north-facing slopes south of the Wieliczka Salt Mine.

**Keywords:** Persistent Scatterers Interferometry (PSI), Wieliczka, mining-induced subsidence, landslides

W artykule, który stanowi rozbudowaną wersję pracy przedstawionej na konferencji Europejskiej Agencji Kosmicznej ESA (*European Space Agency*) — *FRINGE 2007* (Wąsowski i in., 2008), zaprezentowano przestrzenne rozmieszczenie osiadań w obrębie Wieliczki na podstawie analizy satelitarnych danych interferometrycznych — PSI (*Persistent Scatterers Interferometry*). W obrębie miasta Wieliczka znajduje się 700-letnia Zabytkowa Kopalnia Soli, która jest jedną z największych atrakcji turystycznych w Polsce. Co rok odwiedza ją ponad milion zwiedzających z całego świata. Zabytkowa Kopalnia Soli w Wieliczce została również włączona w 1978 r. do Listy Światowego Dziedzictwa Przyrodniczego i Kulturowego, nadzorowanej przez UNESCO (<http://www.kopalnia.pl>).

Od okresu średniowiecznego w Wieliczce wydrążono 7,5 mln m<sup>3</sup> podziemnych pustek, począwszy od poziomu I, leżącego na głębokości 64 m poniżej powierzchni terenu, do poziomu IX, na głębokości 327 m. W wyniku prac górniczych powstało ponad 2000 komór, 200 km korytarzy oraz wiele szybów. Pokłady soli kamiennej były wydobywane w pasie przebiegającym w kierunku wschód-zachód, o długości 6–7 km i szerokości ok. 1 km. Istnieją bezpo-

średnie dowody, że wieloletnia działalność górnictwa ma znaczny wpływ na stabilność gruntów oraz posadowionych na nich budynków, ponieważ kopalnia jest położona bezpośrednio pod miastem.

Jedno z ostatnich katastrofalnych wydarzeń miało miejsce w Wieliczce na początku lat 90. XX w., kiedy zdarzył się gwałtowny wypływ wód podziemnych w północnej części kopalni. Lokalnie spowodował on kilkumetrowe osiadania oraz związane z nimi osuwiska, które doprowadziły do zniszczenia torów kolejowych i powstania uszkodzeń w obrębie XVII-wiecznego Zespołu Kościelno-Klasztorowego oo. Franciszkanów Reformatów. Ponadto wiele budynków w mieście nosi ślady uszkodzeń (spękania o zróżnicowanej wielkości). Wszystko to wskazuje, że stabilność podłoża jest w Wieliczce istotnym problemem i wymaga zbadania.

Obszar Wieliczki został wybrany jako jedno z testowych miejsc projektu ALOS ADEN 3595, którego głównym celem jest zastosowanie zintegrowanych metod (teledetekcyjnych oraz *in situ*) do wyznaczania rejonów potencjalnych geozagrożeń oraz monitoringu osiadań i powierzchniowych ruchów masowych.

<sup>1</sup>CNR-IRPI, Via Amendola 122/I, 70126, Bari, Italy; j.wasowski@ba.irpi.cnr.it

<sup>2</sup>CNR-ISSIA, Via Amendola 122/D, 70126, Bari, Italy; bovenga@ba.issia.cnr.it, refice@ba.issia.cnr.it

<sup>3</sup>Politecnico di Bari, Via Amendola, 173, 70126, Bari, Italy; raffaele.nutricato@tiscali.it, conte@fisica.uniba.it

<sup>4</sup>Państwowy Instytut Geologiczny, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa; marek.graniczny@pgi.gov.pl, zbigniew.kowalski@pgi.gov.pl

W ostatnich latach satelitarne metody interferometryczne okazały się użytecznym narzędziem do detekcji oraz długookresowego monitoringu przemieszczeń powierzchni terenu (Massonnet & Feigl, 1998). W tym kontekście Wieliczka jest obszarem szczególnego zainteresowania, ponieważ nakładają się tutaj zjawiska powiązane zarówno z osiadaniem spowodowanym działalnością górniczą, jak i osuwiskami. Zachodzi więc tutaj możliwość prześledzenia ewentualnych związków pomiędzy efektami podziemnej działalności górniczej oraz niestabilnością zboczny.

### Lokalizacja i warunki geologiczne obszaru badań

Wieliczka jest niewielkim miastem (ok. 20 000 mieszkańców), położonym 14 km na południowy wschód od Krakowa (ryc. 1). Poza samym centrum miasta okoliczne tereny charakteryzują się niskim stopniem zurbanizowania i w przeważającej mierze są wykorzystywane rolniczo. Miasto rozpościera się wzdłuż depresji zorientowanej wschód-zachód (na wysokości 240–270 m n.p.m.) oddzielonej od południa wzgórzami o łagodnych zboczach (wysokości do 400 m n.p.m.), należącymi do najbardziej wysuniętej na północ części Karpat. Pomimo małych deniwelacji terenu na zboczach wzgórz okalających Wieliczkę stwierdzono powstawanie osuwisk (Wójcik i in., 2005).

Pod względem geologicznym obszar gminy i miasta Wieliczka jest położony na styku dwóch regionalnych jednostek tektonicznych: Karpat zewnętrznych i zapadliska przedkarpackiego. Obszar w granicach gminy i miasta Wieliczka odznacza się zróżnicowaną budową geologiczną, zwłaszcza w strefie nasunięcia karpackiego (np. Kolasa & Ślącza, 1985). Północna część gminy znajduje się na terenie zbudowanym z utworów zapadliska przedkarpackiego, do których zalicza się piaski bogucickie i warstwy chodeńskie. U czoła nasunięcia znajduje się wąska strefa tzw. miocenu sfałdowanego.

Przez środkową część omawianego obszaru przebiega linia nasunięcia karpackiego. Czoło nasunięcia karpackiego jest zachowane w postaci wyraźnego progu i charakteryzuje się skomplikowaną budową. Wynika ona z obecności zróżnicowanych litologicznie utworów wiązanych z serią śląską i podśląską. Utwory fliszu karpackiego, jak również utwory neogeńskie są w strefie nasunięcia silnie zaburzone tektonicznie. W tej strefie występuje najwięcej aktywnych osuwisk (Wójcik & Mrozek, 2005). W południowej części gminy występują utwory należące do jednostki śląskiej. Ze strefami występowania skał dolnokredowych, gdzie dominują łupki, są związane osuwiska. W południowej części gminy dużą powierzchnię zajmują wschodnie warstwy istebniańskich, a zwłaszcza piaskowce istebniańskie, i na tych obszarach występuje niewielka liczba osuwisk. Z prowadzonych tu rozważań wynika, że tektonika odgrywa bardzo istotną rolę w budowie geologicznej rejonu Wieliczki.

Na badanym obszarze pokłady soli kamiennej zalegają w obrębie zaburzonych tektonicznie osadów miocenijskich, obejmujących ilaste margle, mułowce i piaskowce (Kolasa & Ślącza, 1985). W depresji Wieliczki osady te są pokryte utworami czwartorzędowymi, głównie łąkami, piaskami i żwirami oraz utworami koluwalnymi i eluwialnymi. Podłoże pokładów soli stanowią wapienie jurajskie i kredowe oraz utwory fliszowe.

### Satelitarne dane radarowe oraz przetwarzanie PSI

Wśród satelitarnych metod interferometrycznych można wyróżnić dwie metody: klasyczną InSAR (*Interferometric Synthetic Aperture Radar*) oraz PSI (*Permanent Scatterer Interferometry*). W metodzie InSAR mierzy się różnicę fazy sygnałów radarowych wzdłuż linii przebiegu wiązki mikrofalowej (LOS — *Line of Sight* — co może zostać przetłumaczone jako linia widzenia bądź wybierania sygnału) pomiędzy dwoma zdjęciami SAR otrzymanymi dla tego samego obszaru w różnym czasie. Czynniki, które w sposób najbardziej znaczący ograniczają praktyczną użyteczność klasycznej metody InSAR, to brak koherencji (wynika z wegetacji) i wpływ atmosfery na fazę sygnału radarowego, tzw. atmosferyczny obraz fazy (APS — *Atmospheric Phase Screen*).

W celu rozwiązania problemu braku koherencji i wpływu atmosfery, w 1999 r. naukowcy z Politechniki w Mediolanie rozwinęli metodę PSI (Ferretti i in., 2001). W tej technice poddaje się jednoczesnej obróbce statystycznej minimum 20 obrazów radarowych, co w efekcie prowadzi do eliminacji składowej atmosferycznej fazy i pozostałych błędów sygnału radarowego.

Z warunków technicznych zobrazowań ERS (*Earth Resources Satellite*) wynika, że maksymalna wielkość przesunięć możliwych do zaobserwowania metodą PSI nie przekracza wartości 14,5 cm na rok. To ograniczenie jest funkcją długości fali radarowej (długość fali promieniowania  $\lambda$  dla satelity ERS wynosi 5,6 cm) oraz czasu ponownego przelotu satelity (35 dni). W praktyce jest jednak bardzo trudno wyznaczyć przemieszczenia LOS przekraczające 8–10 cm/rok (Colesanti & Wąsowski, 2006).

Zbiór danych dotyczący Wieliczki obejmował zestaw 39 obrazów satelitarnych ERS-1 i ERS-2 (w tzw. wariancie „schodzącym”), wykonanych w okresie 1992–2000. Dane satelitarne uzyskano od ESA w ramach projektu ALOS ADEN 3595. Przed wyborem zdjęć satelitarnych uwzględniono dane dotyczące opadów, pochodzące z wielickiej stacji meteorologicznej. Uniknięto w ten sposób zamówie-



Ryc. 1. Lokalizacja obszaru badań  
Fig. 1. Location of the Wieliczka area

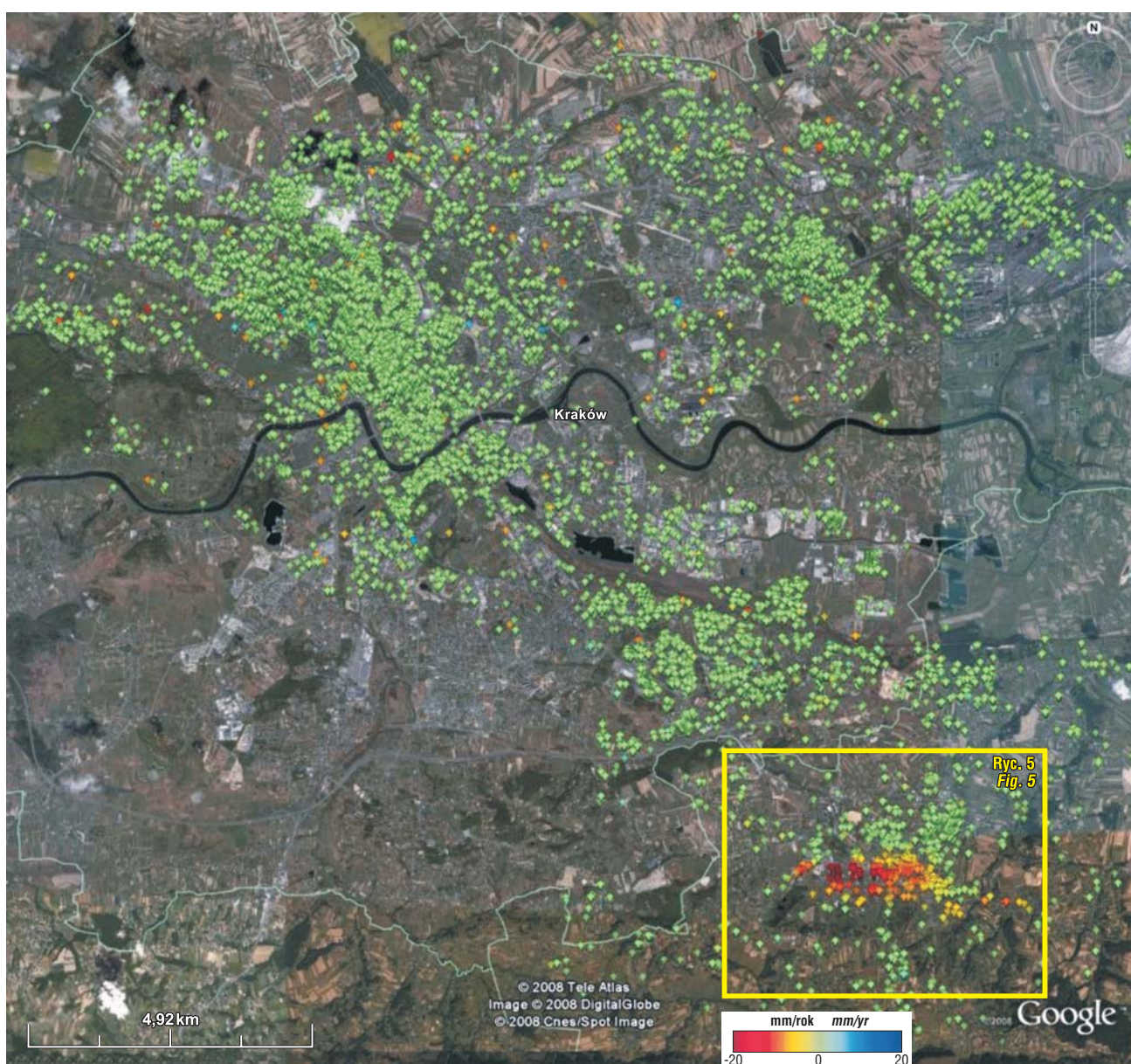


nia zdjęć wykonanych w trakcie zalegania pokrywy śnieżnej bądź intensywnych opadów deszczu i śniegu.

Dane SAR były analizowane w programie SPINUA (*Stable Point Interferometry over Unurbanized Areas*, co można przetłumaczyć jako interferometria stabilnych punktów w obszarach niezurbanizowanych), należącego do grupy oprogramowania PSI (*Persistent Scatterers Interferometry*). Więcej szczegółów na ten temat można znaleźć w artykułach Bovengi i in. (2005) oraz Ferrettiego i in. (2001). Charakterystycznym elementem oprogramowania SPINUA, odróżniającym go od innych programów PSI, jest przetwarzanie niewielkich fragmentów obrazów radarowych, obejmujących zwykle kilka kilometrów kwadratowych (Refice i in., 2006). Niewielkie fragmenty całego

zdjęcia umożliwiają optymalizację zagęszczenia, rozmieszczenia i zidentyfikowania potencjalnych PS (*Persistent Scatterers*) — radarowych punktów pomiarowych, nazywanych również stabilnymi rozpraszaczami (Perski, 2008). Ich niewielki rozmiar umożliwia lokalnie zastosowanie liniowej aproksymacji sygnału fazy atmosferycznej, co z kolei zapewnia większą dokładność przetwarzania. Resztki sygnału fazy atmosferycznej mogą być wyznaczone na większym obszarze dzięki zastosowaniu interpolacji zwanej krigingiem (twórca metody D. Krige).

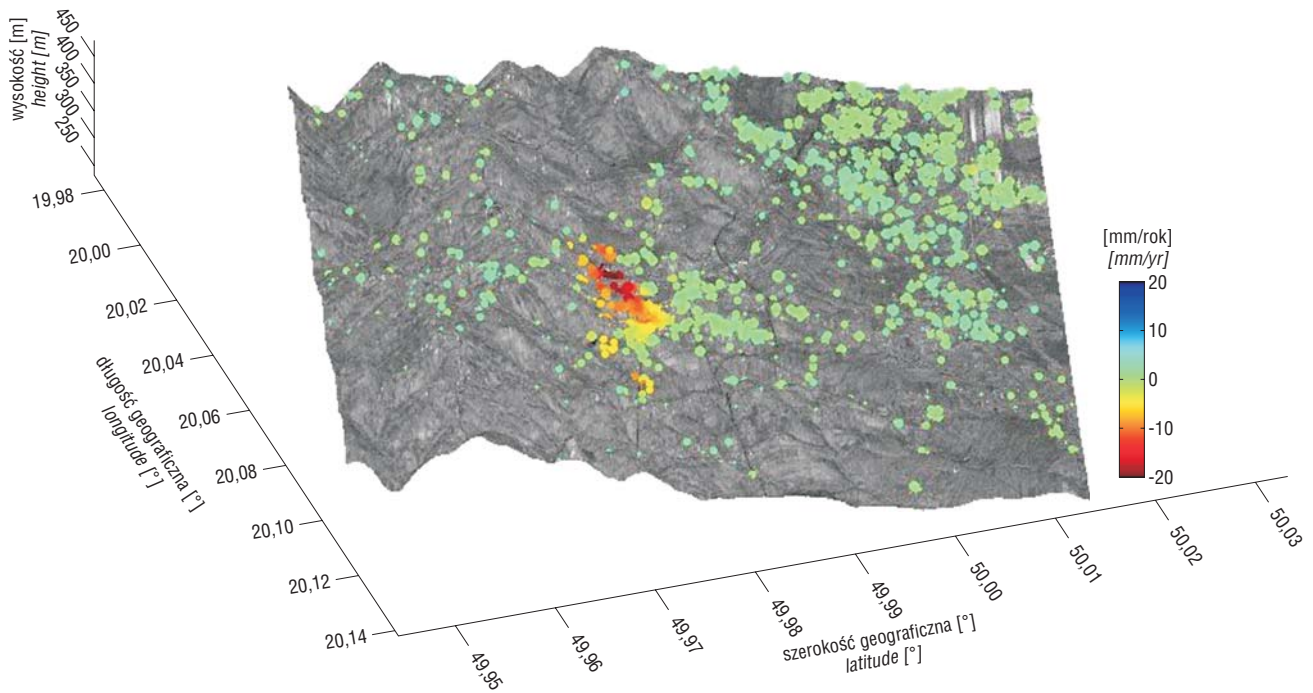
Końcowe rezultaty analizy obejmują geokodowaną bazę danych punktów pomiarowych PS (czyli odniesioną do konkretnego układu współrzędnych), zawierająca również informacje na temat średniej prędkości przemieszcza-



**Ryc. 2.** Rozmieszczenie geokodowanych radarowych punktów pomiarowych w rejonie Krakowa i Wieliczki. W tle zdjęcia satelitarne pobrane z *Google Earth* (Wąsowski i in., 2008). Przeciętna prędkość przemieszczeń LOS z okresu 1992–2000 jest zmniejszona do zakresu wartości  $\pm 20$  mm/rok. Wyniki analizy znakomitej większości PS na terenie Krakowa świadczą o stabilnych warunkach, natomiast na terenie Wieliczki PS rejestrują obniżanie terenu

**Fig. 2.** Distribution of geo-coded Persistent Scatterers (PS) in the Cracow-Wieliczka area. Background optical image is from *Google Earth* (Wąsowski et al., 2008). The average Line of Sight (LOS) velocity (for the period 1992–2000) has been saturated at  $\pm 20$  mm/yr for visualization purposes. Note the predominance of motionless PS in the city of Cracow and the presence of downward moving PS in the town of Wieliczka





**Ryc. 3.** Rozmieszczenie punktów PS w rejonie Wieliczki na tle obrazu SAR oraz cyfrowego modelu terenu DEM-SRTM (przewyższenie wysokości  $3 \times$ ). Przeciętna prędkość przemieszczeń LOS z okresu 1992–2000 wynosi  $\pm 20$  mm/rok

**Fig. 3.** PS distribution in the Wieliczka area superimposed on the SAR despeckled amplitude image draped over a Digital Elevation Model derived from SRTM data (about  $3 \times$ ) vertical exaggeration. Line of Sight (LOS) velocity for the period 1992–2000 has been estimated at  $\pm 20$  mm/yr

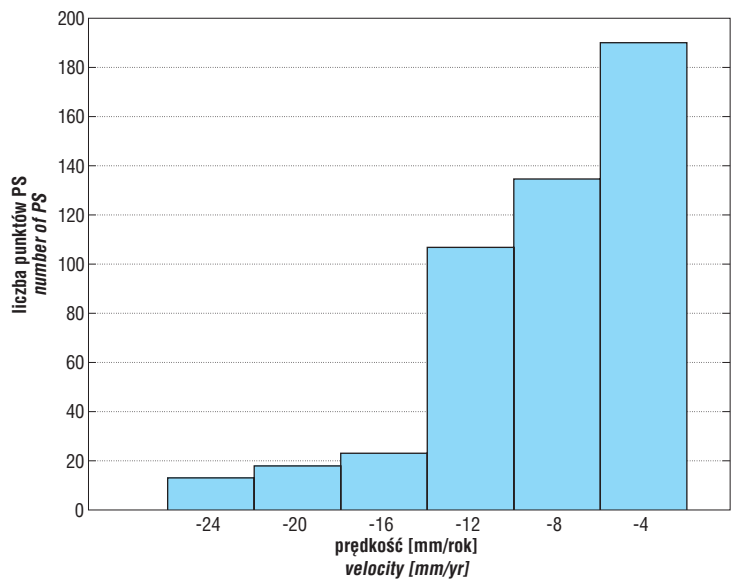
nia punktów, szacowany błąd DEM (cyfrowego modelu terenu) oraz kompletne serie czasowe przemieszczeń (zarejestrowanych w trakcie kolejnych przelotów satelity). Warto jednak dodać, że błąd pomiarów średniego przemieszczenia na rok jest bardzo mały, tzn. wynosi około 1,5 mm (por. Crosetto i in., 2008). Punkt odniesienia (*reference PS*), który służy do obliczania względnych wartości przewyższenia dla każdego PS, został wybrany w stabilnym rejonie pomiędzy Wieliczką a Krakowem. Opiswane tu dane mogą być importowane do dowolnie wybranego środowiska wizualizacji geograficznej, jak np. *Google Earth*. Różnicowe interferogramy obszaru testowego Wieliczka zostały wygenerowane dzięki zastosowaniu wysokościowego modelu powierzchni terenu SRTM DEM (*Shuttle Radar Topography Mission*) o rozdzielczości przestrzennej  $90 \times 90$  m.

### Rezultaty analizy PSI oraz interpretacja

**Analiza regionalna.** Wstępna analiza PSI objęła również Kraków, na którego terenie zidentyfikowano liczne radarowe punkty pomiarowe (ryc. 2). Zdecydowana większość z nich nie wykazuje żadnych ruchów, co świadczy o ogólnej stabilności miasta i jego najbliższego sąsiedztwa. Całkowicie odmienna sytuacja zachodzi natomiast w Wieliczce i jej otoczeniu. W mieście i jego okolicy (ryc. 3) wyznaczono 3114 punktów PS, a ich przeciętne zagęszczenie wynosi ponad  $100$  PS/km<sup>2</sup>. Dodatkowo szybkość przemieszczeń LOS obserwowanych PS jednoznacznie wskazuje, że rejon Wieliczki charakteryzuje się dużą liczbą punktów rejestrujących

obniżanie (ujemne PS); nie ma natomiast punktów świadczących o procesach wypiętrzania.

Większość radarowych punktów pomiarowych, rejestrujących wartości ujemne, jest położona na linii o kierunku wschód-zachód (ryc. 2, 3). Punkty te, których jest kilkadziesiąt na terenie Wieliczki (ryc. 3, 4), z reguły jest kilkadziesiąt przemieszczeniami nieprzekraczającymi 1 cm/rok. Około 7% punktów PS przemieszcza się ze średnią prędkością zbliżoną do 2 cm/rok.



**Ryc. 4.** Histogram częstości ujemnych radarowych punktów pomiarowych (wskazujących na osiadanie) na terenie Wieliczki, w zależności od przeciętnej prędkości przemieszczeń w okresie 1992–2000

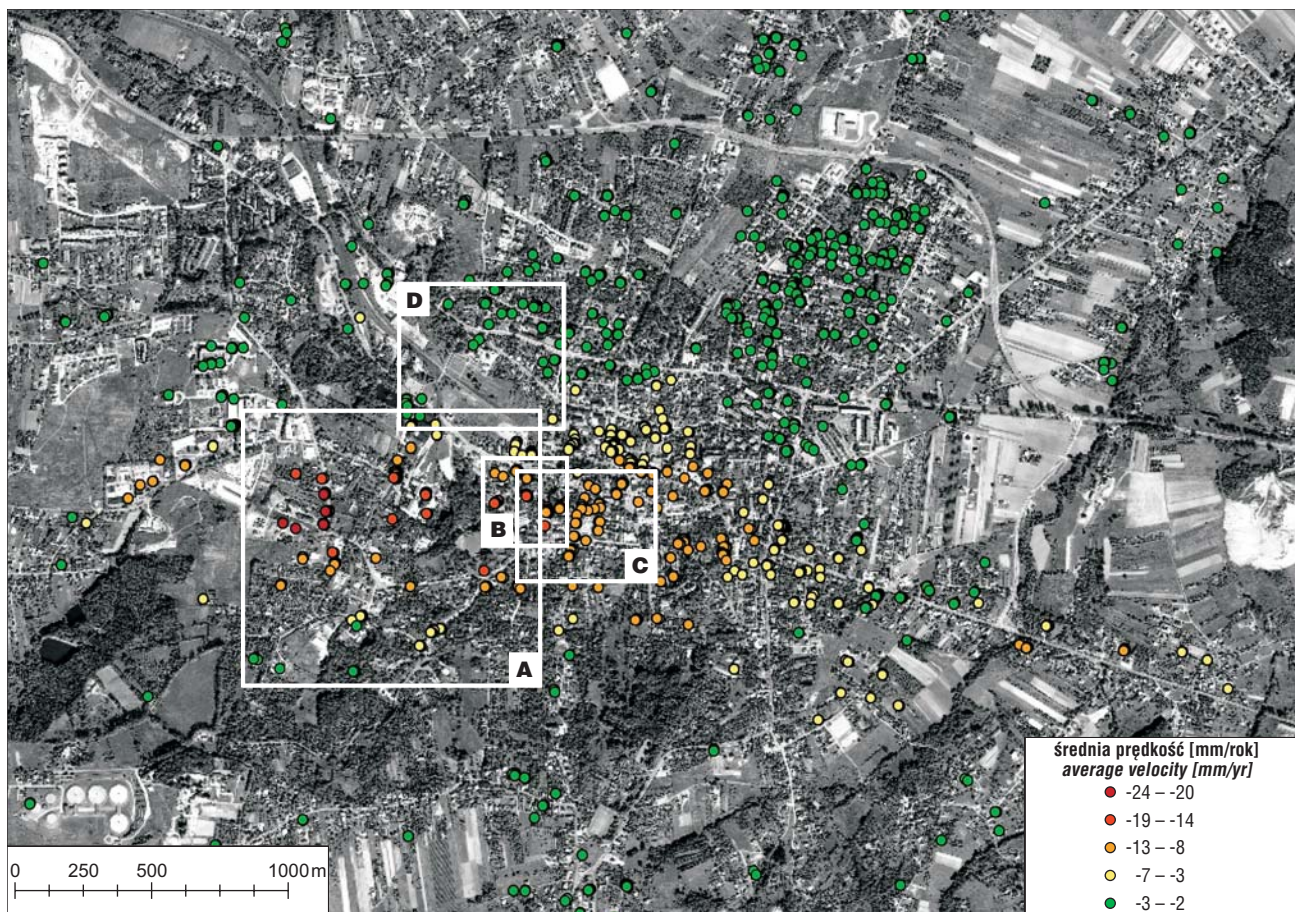
**Fig. 4.** Histogram showing frequency of negative (downward moving) PS in the Wieliczka area, according to their average velocities for the period 1992–2000

**Punkty PS zarejestrowane w Wieliczce.** W celu ułatwienia interpretacji informacje z bazy danych PSI zostały naniesione na zdjęcie satelitarne *QuickBird* (ryc. 5), które charakteryzuje się bardzo dużą rozdzielczością (ok. 0,62 m). Pobieźna interpretacja zdjęcia wykazała, że większość georadarowych punktów pomiarowych jest skoncentrowana w centrum miasta, natomiast na terenach użytkowanych rolniczo zarejestrowano niewielką liczbę PS. Pochodzą one głównie od budynków lub obiektów infrastruktury przemysłowej, występują również wzdłuż dróg. Można też zauważyć, że praktycznie całe miasto oraz tereny położone od niego na wschód i zachód charakteryzują się ruchami obniżającymi. Strefa ujemnych PS o kierunku wschód-zachód ma długość ok. 4,5 km. Należy również zaznaczyć, że przeciętna prędkość LOS odznacza się dużą zmiennością, przy czym maksymalne obniżanie, sięgające 24 mm/rok, zanotowano w zachodniej części miasta. Zdecydowanie mniejsze wartości odnotowano we wschodniej części miasta — poniżej 10 mm/rok. Prawdopodobnie zróżnicowane wartości osiadania w Wieliczce są powiązane z historyczną działalnością kopalni soli. Aby wyjaśnić to zjawisko,

wybrano cztery niewielkie pola testowe, które były narażone na negatywne skutki działalności górniczej (ryc. 5). Pierwsze z nich wyznaczono na skraju zachodniej części miasta, w rejonie charakteryzującym się maksymalnym osiadaniami (ryc. 6A). Warto również nadmienić, że w obrębie tego obszaru są zlokalizowane dwa najgłębsze szyby — Kościuszko i Kinga (300 m i 296 m poniżej powierzchni terenu). Prędkość ruchu radarowych punktów pomiarowych w pobliżu szybów wynosi od -24 do -19 mm/rok (Kościuszko) i od -19 do -15 mm/rok (Kinga) (ryc. 7).

Drugie pole testowe zlokalizowano w pobliżu szybu Daniłowicza (ryc. 6B). Jest to trzeci najgłębszy szyb po Kościuszcze i Kindze (243 m poniżej powierzchni terenu). Obecnie jest on wykorzystywany do celów turystycznych. W bezpośrednim sąsiedztwie szybu prędkość osiadania wynosi -18 mm/rok (ryc. 7).

Trzecie pole testowe wyznaczono w pobliżu najstarszej części miasta (rynek główny) oraz najstarszego i stosunkowo płytkiego szybu Regis (106 m poniżej powierzchni terenu) (ryc. 6C). Sama struktura szybu nie została zarejestrowana jako PS, jakkolwiek punkty pomiarowe znajdują



**Ryc. 5.** Rozmieszczenie geokodowanych PS na tle zdjęcia satelitarnego *QuickBird* z rejonu Wieliczki (Wąsowski i in., 2008). Widoczne największe przemieszczenia LOS w rejonie na zachód od centrum miasta (do 24 mm/rok w latach 1992–2000). Zaznaczono cztery prostokątne pola testowe związane z działalnością górniczą, które przedstawiono w powiększeniu na ryc. 6. Pole testowe C obejmuje centralną część miasta

**Fig. 5.** Geo-coded PS distribution superimposed on *QuickBird* image of the Wieliczka area (Wąsowski et al., 2008). Note spatial variation in the average LOS velocities, with the highest displacement rates present in the area just west of the town center (up to 24 mm/yr in the period 1992–2000). White color, numbered rectangles mark 4 local areas of interest linked to the mining activity and shown in Fig. 6. Rectangle C covers the central part of the town of Wieliczka

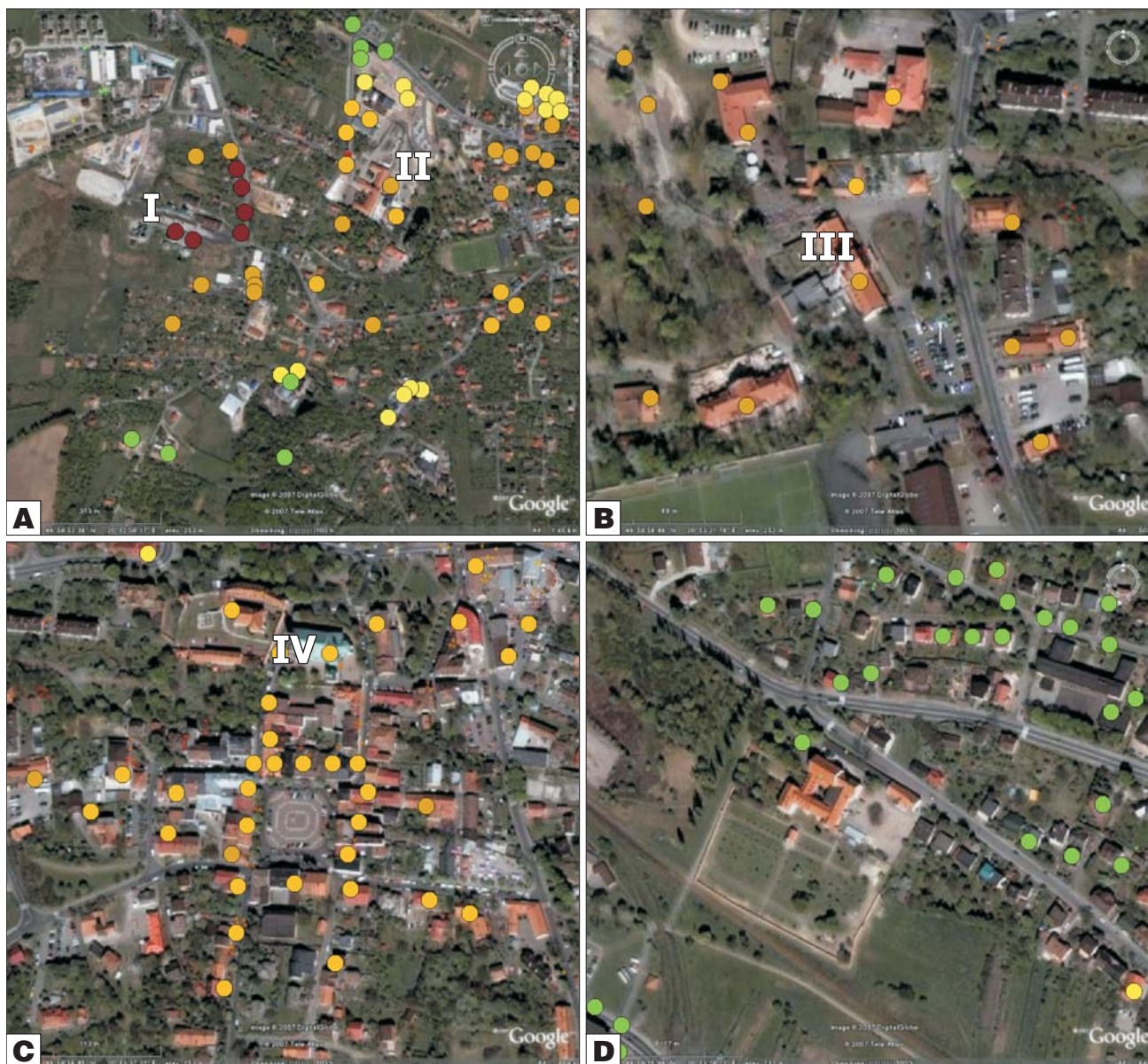


się na pobliskich historycznych budynkach (Zamek Żupny, kościół św. Klemensa). Prędkość PS w tym rejonie wynosi od  $-10$  mm/rok do  $-7$  mm/rok (ryc. 7).

Czwarte pole testowe zostało zlokalizowane w północno-zachodniej części miasta, obejmuje m.in. XVII-wieczny Zespół Kościelno-Klasztorny oo. Franciszkanów Reformatów (ryc. 6D). Właśnie na tym obszarze miał miejsce gwałtowny wypływ wody na początku lat 90. (o czym wspomniano we wprowadzeniu). Niestety, obszar, gdzie wystąpiło największe osiadanie, na południe od klasztoru jest pozbawiony PS. Zarejestrowano jedynie dwa radarowe punkty pomiarowe, zlokalizowane po północnej stronie

klasztoru. Wyniki ich pomiarów mogą sugerować istnienie warunków stabilnych (lokalnie), począwszy od końca 1992 r. Niemniej jednak przykłady spękań na ścianach klasztoru są liczne i to świadczy o mobilność terenu.

Z analizy zgromadzonych danych wynika, że największe przemieszczenia zarejestrowano w pobliżu szybu Kościuszko (od  $-24$  do  $-19$  mm/rok). Spostrzeżenie to jest niezwykle interesujące w kontekście tradycyjnych pomiarów geodezyjnych. Według Kortasa (2007) maksymalne osiadania w XX w. miały miejsce właśnie w rejonie szybu Kościuszko i w latach 1926–2005 osiągnęły 2,96 m, największy przyrost obniżen za  $-71$  mm/rok) wystąpił



**Ryc. 6.** Rozmieszczenie geokodowanych radarowych punktów pomiarowych na obszarach czterech pól testowych wykazujących przemieszczenia związane z eksploatacją soli (Wąsowski i in., 2008) na tle zdjęcia satelitarnego pobranego z *Google Earth*. **A** — obszar z głębokimi szymbami górniczymi Kościuszko (I) i Kinga (II); **B** — obszar w pobliżu szybu Daniłowicza (III), wykorzystywanego w celach turystycznych; **C** — centrum miasta wraz najstarszym szymbem Regis i pobliskimi zabytkowymi budynkami (IV — kościół św. Klemensa); **D** — obszar wokół klasztoru Franciszkanów

**Fig. 6.** Geo-coded PS distributions in the four areas of Wieliczka with specific linkages to the past and recent salt mine activity (Wąsowski et al., 2008). Background optical images are from *Google Earth*. **A** — Area with the deep Kosciuszko (I) and Kinga (II) mine shafts; **B** — Daniłowicz shaft area (III) — main tourist entrance to the mine; **C** — town center with the oldest Regis shaft and nearby historical buildings (IV — Saint Clemens church); **D** — the Franciscan Monastery area

w 1962 r. Wyniki badań osiadania reperów ujawniają zmniejszanie się prędkości ruchu od ok. 1980 r. Również przyrost objętości niecki osiadań wykazuje takie same zmiany w czasie.

**Złoże soli w Wieliczce, osuwiska i przemieszczenia punktów PS.** Dalsza analiza PSI objęła porównanie geodotowanych punktów PS z mapą geologiczną w skali 1 : 50 000, na której były zaznaczone wykartowane osuwiska oraz zasięg złoża soli (Burtan, 1956).

Można łatwo zauważyć, że zdecydowana większość radarowych punktów pomiarowych, w których zarejestrowano osiadanie, znajduje się w obszarze kopalni soli, gdzie trwa eksploatacja (ryc. 8). Natomiast na wschodnich i zachodnich krańcach złoża soli znajdują się nieliczne punkty PS, w których zanotowano brak ruchu.

Jak już uprzednio wspomniano, od południa do pasa solnego przylegają zbocza nasunięcia karpackiego, na których rozpoznano kilka osuwisk (Wójcik i in., 2005). Jakkolwiek na tym obszarze zlokalizowano zaledwie kilka punktów PS, to ich wartości są znaczące. Na jednym z osuwisk, położonym w pobliżu obszaru maksymalnego osiadania, wyniki badania radarowych punktów pomiarowych wskazują na powolny ruch od  $-7$  do  $-3$  mm/rok. Są one rozmieszczone pomiędzy jezerem osuwiskowym, w pobliżu podstawy zbocza a najbardziej wysuniętym na południe zasięgiem złoża soli. Jednakże na tym samym osuwisku, w wyższych partiach, zidentyfikowano wiele innych punktów pomiarowych, które nie wykazują żadnego ruchu. Jeśli

weźmie się pod uwagę wszystkie te obserwacje, to możliwe są trzy sposoby interpretacji:

□ ruch PS jest spowodowany osiadaniem związanym z działalnością górniczą, która obejmuje również jeźor osuwiskowy;

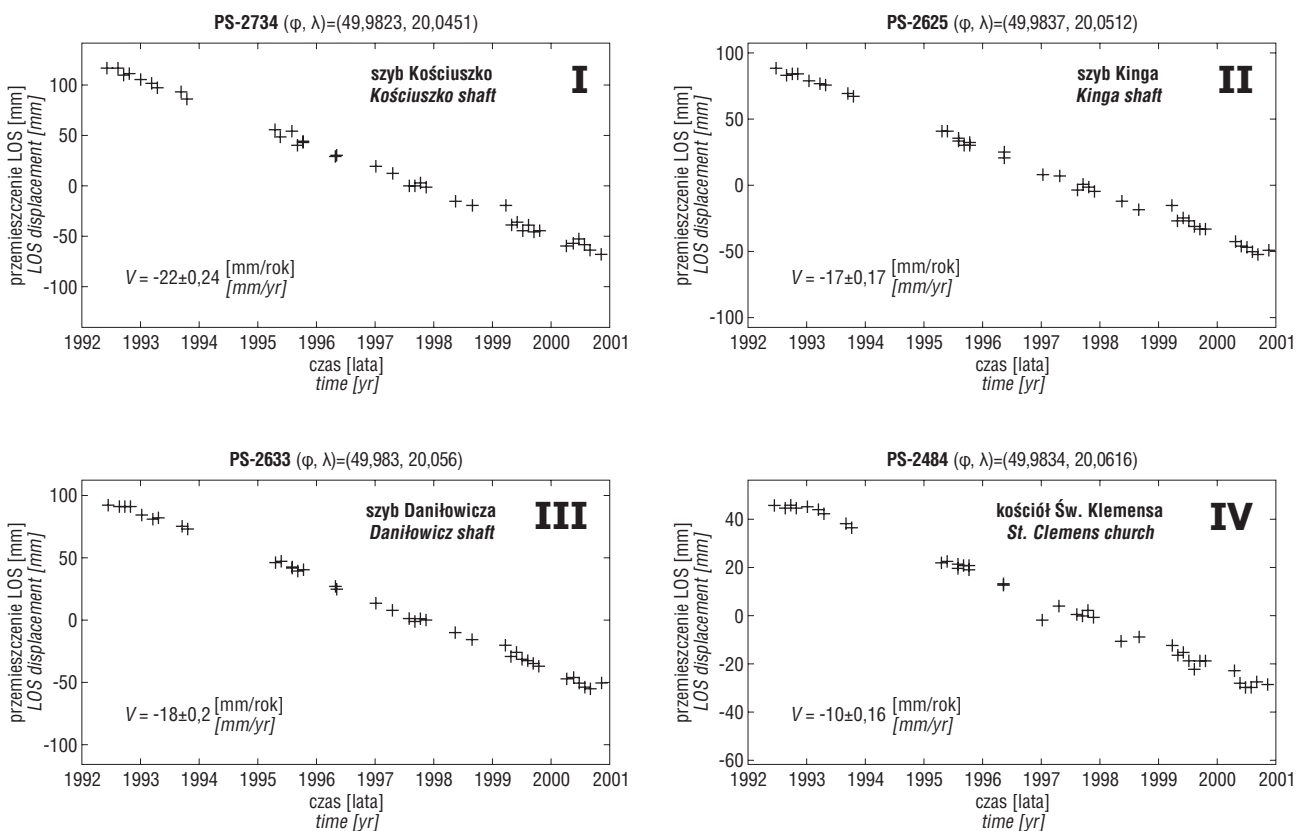
□ ruch PS odzwierciedla wolny ruch osuwiska, którego mobilność jest spowodowana osiadaniem pobliskiego terenu kopalni;

□ ruch PS wynika z kombinacji obu wymienionych czynników.

Niezależnie od przedstawionych tu dywagacji, wydaje się, że istnieje związek pomiędzy depresją Wieliczki, która podlega osiadaniu w wyniku działalności górniczej, a obecnością dużych osuwisk powstałych na zboczach Karpat. Jest również możliwe, że osiadanie zachodzące u podnóża zboczy może doprowadzić do reaktywacji osuwisk. Warto także zauważyć, że z północnej strony depresji Wieliczki zbocza są znacznie łagodniejsze i tu nie stwierdzono występowania osuwisk.

### Podsumowanie

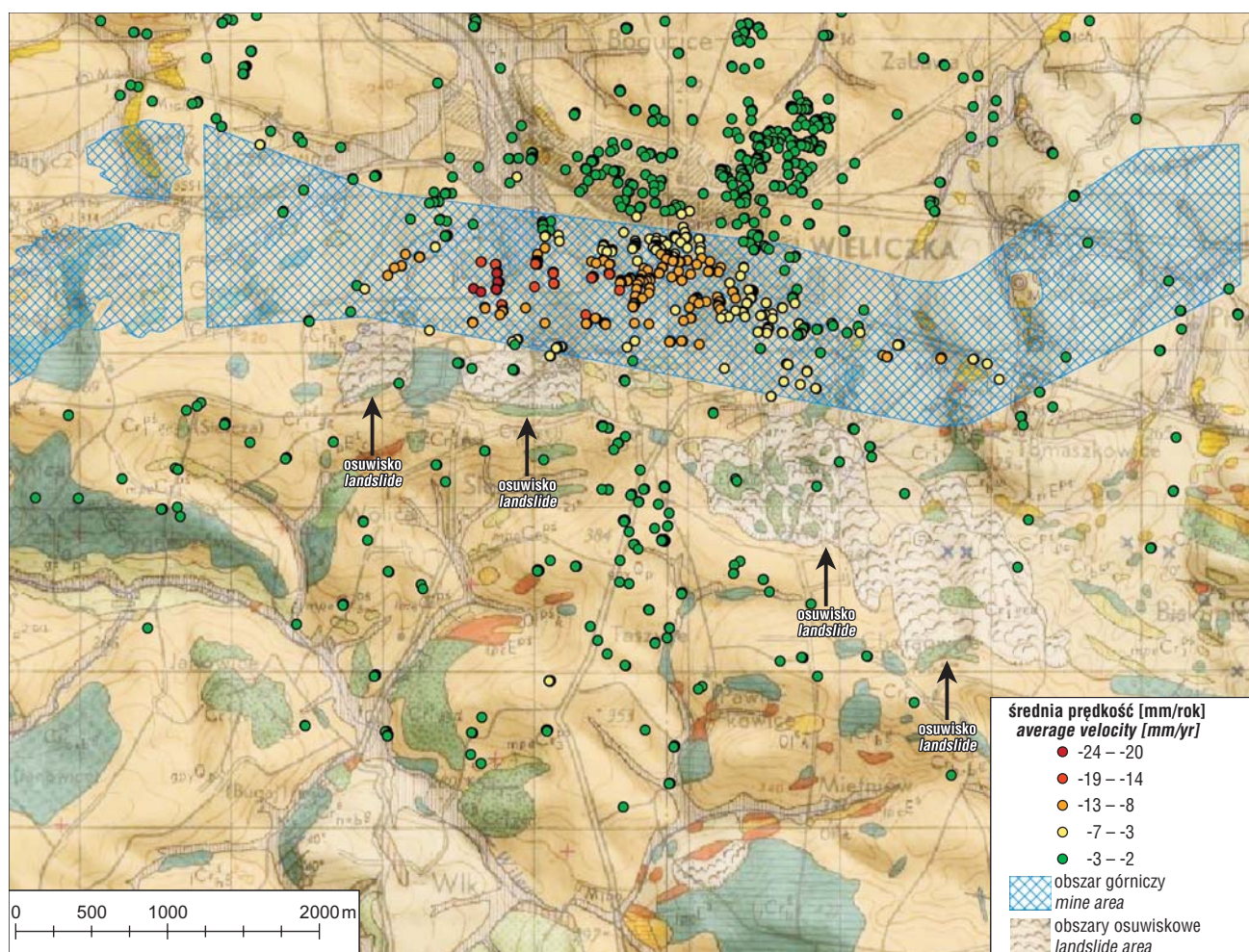
Zastosowanie metody PSI SPINUA doprowadziło do identyfikacji licznych radarowych punktów pomiarowych (ponad 100 PS/km<sup>2</sup>), co umożliwiło monitoring przemieszczeń powierzchni terenu w rejonie Wieliczki. Analiza danych wykazała ciągłe osiadanie o wartości 1–2 cm/rok, zaobserwowane w okresie 1992–2000. Szerokość strefy podlegającej osiadaniu wyraźnie odpowiada zasięgowi



**Ryc. 7.** Wykresy serii czasowych przemieszczeń charakterystycznych radarowych punktów pomiarowych zaznaczonych na ryc. 6 ( $V$  — prędkość PS): I — szyb Kościuszko, II — szyb Kinga, III — szyb Daniłowicza, IV — kościół św. Klemensa w pobliżu szybu Regis (Wąsowski i in., 2008)

**Fig. 7.** Displacement time series of representative PS indicated in Fig. 6 ( $V$  — PS velocity): I — Kosciuszko shaft, II — Kinga shaft, III — Daniłowicz shaft, IV — Saint Clemens church located very close to the Regis shaft (Wąsowski et al., 2008)





**Ryc. 8.** Rozmieszczenie geokodowanych radarowych punktów pomiarowych na tle mapy geologicznej (Burtan, 1956) oraz cyfrowego modelu terenu DEM. Widoczne są również duże osuwiska powstałe na północnych zboczach frontu Karpat, zbudowane z utworów fliszu

**Fig. 8.** Geo-coded PS distribution superimposed on the geological map (Burtan, 1956) of the Wieliczka area and draped over a Digital Elevation Model. Note also the presence of old large landslides on the N-NNE facing slopes of the Carpathian mountain front (involving the fliszu)

podziemnej kopalni soli, natomiast jej długość (4,5 km) jest nieco krótsza od zasięgu prac górniczych i granicy rozpoznanych złóż soli. Jest to prawdopodobnie związane z brakiem punktów PS na terenach rolniczych na wschód i zachód od miasta. Maksymalne osiadania stwierdzono w zachodniej części miasta (do 2,4 cm/rok), gdzie przestrzenne rozmieszczenie radarowych punktów pomiarowych wskazuje na obecność owalnej niecki osiadań o długości ok. 2,5 km.

Pomiary geodezyjne wykonane na badanym obszarze w latach 1970–2000 pozwoliły udokumentować osiadania dochodzące do 1 m, a więc ok. 3 cm/rok. Wartości te są bardzo zbliżone do wyników uzyskanych z pomiarów interferometrycznych. Nieco mniejsze wartości udokumentowane techniką PSI w latach 1992–2000 mogą być częściowo wytłumaczone kierunkiem padania wiązki radarowej LOS. Osiadanie stwierdzone we wschodniej części miasta osiąga mniejsze wartości — ok. 1 cm/rok. Jakkolwiek gęstość punktów PS nie jest w tym rejonie duża, to ich rozmieszczenie przestrzenne sugeruje obecność niewielkiej niecki osiadań o kształcie owalnym. Ponadto analiza danych PSI

wskazuje na lokalne przemieszczenia znacznych wartości. Prawdopodobnie odzwierciedlają one zróżnicowane etapy prac górniczych, zmienne warunki geologiczne, a także mogą być związane z odmienną „reakcją” różnych konstrukcji budowlanych na osiadanie gruntu. Ważnym wynikiem analizy interferometrycznej jest zaobserwowanie prawdopodobnego związku pomiędzy osiadaniem wywołanym działalnością górniczą a dużymi osuwiskami. Aby jednoznacznie stwierdzić ten związek, należy jednak przeprowadzić szczegółowe badania i pomiary terenowe. Negatywny wpływ działalności górniczej na zabudowę Wieliczki można zauważyć w wielu częściach miasta ponad kopalnią (ryc. 9). Dlatego monitoring wykorzystujący interferometrię satelitarną powinien być kontynuowany.

Przewiduje się kontynuację analizy PSI na podstawie obrazów uzyskanych po 2000 r., w tym z europejskiego satelity ENVISAT — ASAR (*Advanced Synthetic Aperture Radar*) oraz japońskiego ALOS — PALSAR (*Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar*). W najbliższej przyszłości planuje się także integrację danych PSI



**Ryc. 9.** Przykłady spękanych budynków na terenie Wieliczki  
**Fig. 9.** Examples of distressed buildings in the Wieliczka area



## Literatura

- BOVENGA F., REFICE A., NUTRICATO R., GUERRIERO L. & CHIARADIA M.T. 2005 — SPINUA: a flexible processing chain for ERS/ENVISAT long term interferometry. [In:] Proceedings of the 2004 Envisat & ERS Symposium. Salzburg, Austria, 6–10 September 2004. ESA SP-572 (April 2005).
- BURTAN J. 1956 — Szczegółowa mapa geologiczna Polski, 1 : 50 000. Arkusz Wieliczka (M-34-77-A). Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.
- COLESANTI C. & WĄSOWSKI J. 2006 — Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry. Eng. Geol., 88: 173–199.
- CROSETTO M., AGUDO M., MONSERRAT O. & PUCCI B. 2008 — Inter-comparison of persistent scatterer interferometry results. [In:] Lacoste H. & Ouwehand L. (eds.) Proceedings of Fringe 2007. ESRIN, Frascati, Italy, 26–30 November 2007. ESA Publications Division, Noordwijk. CD-ROM: ESA SP-649 (February 2008).
- FERRETTI A., PRATI C. & ROCCA F. 2001 — Permanent scatterers in SAR interferometry. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 39, 1: 8–20.
- KOLASA K. & ŚLĄCZKA A. 1985 — Sedimentary salt megabreccias exposed in the Wieliczka mine, Fore-Carpathian Depression. Acta Geol. Pol., 35: 221–230.
- KORTAS G. 2007 — Przemieszczenia powierzchni nad historyczną kopalnią w Wieliczce. Prz. Gór., 63, 3 (1012): 4–12.
- MASSONNET D. & FEIGL K.L. 1998 — Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface. Rev. Geophys., 36: 441–500.
- 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.
- REFICE A., BOVENGA F. & NUTRICATO R. 2006 — MST-based stepwise connection strategies for multi-pass radar data, with application to coregistration and equalization. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 44, 8: 2029–2040.
- WĄSOWSKI J., BOVENGA F., NUTRICATO R., CONTE D., REFICE A., KOWALSKI Z. & GRANICZNY M. 2008 — Satellite interferometry reveals spatial patterns of subsidence in the ancient Wieliczka Salt Mine (UNESCO Heritage Site, Poland). [In:] Lacoste H. & Ouwehand L. (eds.) Proceedings of Fringe 2007. ESRIN, Frascati, Italy, 26–30 November 2007. ESA Publications Division, Noordwijk. CD-ROM: ESA SP-649 (February 2008).
- WÓJCIK A. & MROZEK T. 2005 — Landslides in the area surrounding the Wieliczka city. [In:] Jarmołowicz-Szulc K., Graniczny M. & Nescieruk P. (eds.) Mass movements hazard in various environment. Kraków, Poland, 20–21 October 2005. Abstracts and field trip guide-book. Polish Geological Institute, Warsaw: 45–46.
- Praca wpłynęła do redakcji 25.07.2008 r.  
Po recenzji akceptowano do druku 28.11.2008 r.

z danymi monitoringu geodezyjnego (niwelacja precyzyjna i techniczna) z Wieliczki i rejonu kopalni oraz dokładniejszą interpretację przemieszczeń. Pod uwagę zostaną również wzięte dane dotyczące lokalnych warunków geologicznych i informacje na temat dawnej działalności kopalni soli.

Autorzy artykułu chcą złożyć serdeczne podziękowania Markowi Kotlinowskiemu za pomoc w uzyskaniu kontaktów miejscowych oraz gościnność, Andrzejowi Leśniakowi za dostarczenie danych meteorologicznych, Zbigniewowi Zarębskiemu — prezesowi Zarządu Kopalni Soli w Wieliczce oraz Andrzejowi Trzósle i Pawłowi Ulmańcowi za udostępnienie informacji z kopalni. Autorzy pragną także podziękować recenzentowi artykułu dr. hab. inż. Januszowi Madejowi za cenne i konstruktywne uwagi.