

## Metoda punktowej, długookresowej satelitarnej interferometrii radarowej (PSInSAR<sup>TM</sup>) w rozpoznaniu geodynamiki NE części Górnośląskiego Zagłębia Węglowego

Marek Graniczny<sup>1</sup>, Magdalena Czarnogórska<sup>1</sup>, Zbigniew Kowalski<sup>1</sup>,  
Andrzej Leśniak<sup>2</sup>, Janusz Jureczka<sup>3</sup>



M. Graniczny

M. Czarnogórska

Z. Kowalski

A. Leśniak

J. Jureczka

**Permanent Scatterer Interferometry (PSInSAR<sup>TM</sup>) technique for recognizing geodynamics of northeastern part of the Upper Silesian Coal Basin.**  
Prz. Geol., 56: 826–835.

*Abstract.* Polish Geological Institute as a member of TerraFirma Consortium obtained PSInSAR dataset for the Sosnowiec area (Upper Silesian Coal Basin — USCB) in mid-March 2004 and in spring 2006. The area of

dataset covers northeastern part of the Upper Silesian Coal Basin. Processing of the data has covered scenes both ERS-1, ERS-2 registered between 1992 and 2006. The PSInSAR data were processed by TeleRilevamento Europa. Interpretation of the Sosnowiec scene has covered analysis of the multi-thematic data, including geostatistics, land use, mining, geology and seismicity. The most interesting results obtained in the Sosnowiec area are as follows: the indicated subsidence values in the period from 1992 to 2003 vary between –39.63 mm to +25.12 mm. These values show tendencies of the slow ground motion with a very high accuracy. Preliminary interpretation of the PSInSAR data of the Upper Silesian Coal Basin indicated strong correlation between the recorded PS negative values and structural pattern of the Carboniferous strata. Clearly visible concentration of negative values is also noted at footwalls and hanging walls of the Będzin and Klodnica regional faults. Undoubtedly, the two mentioned faults of the Variscan origin were rejuvenated during the Alpine Orogeny (Triassic deposits were found in the hanging walls of the faults). The presence of the ground motion along its strike, can suggest neotectonic character of these faults. Linear anomalies oriented WNW-ESE were formed by changing values of the ground motions which are also parallel to the productive Carboniferous deposits forming the coal basin such as the Mudstone Series, Paralic Series and Upper Silesian Sandstone Series. The explanation of these phenomena (genesis and mechanisms) needs further studies. There is an evident correlation between linear negative anomalies and induced seismicity, mainly in the vicinity of the Klodnica fault. Interpretation of slow ground motions registered by PSInSAR method from the USCB indicates also probably prolongation of the Będzin fault in northwest direction and subsidence of the Upper Silesian Sandstone Series compared to the Mudstone Series and Paralic Series.

**Keywords:** satellite interferometry, subsidence, Upper Silesian Coal Basin

Na początku lat 90. XX w. na podstawie danych satelitów ERS-1 i ERS-2 zaczęto generować interferogramy radarowe umożliwiające tworzenie cyfrowych modeli terenu oraz rejestrację zmian powierzchni terenu z centymetrową dokładnością (Graham, 1974; Zebker & Goldstein, 1986; Lin i in., 1994). W Polsce prace w dziedzinie interferometrii podjęto na Uniwersytecie Śląskim (Perski, 1999). Ostatnie lata przyniosły dalszy rozwój tej dyscypliny (Ferretti i in., 1999), opracowano system metody punktowej długookresowej (*Persistent Scatterer Interferometry* — PSI).

Dane PSI są uzyskiwane zaledwie przez kilka ośrodków w Europie i w Stanach Zjednoczonych. Jednym z nich jest konsorcjum *TerraFirma*, które dąży do zorganizowania i wdrożenia ogólnoeuropejskiego serwisu dostarczającego informacji na temat geozagrożeń powodowanych przemieszczeniami powierzchni ziemi, ich identyfikacji, oceny, zrozumienia oraz monitoringu. Nadrzędnym celem tego serwisu informacyjnego jest: ochrona życia ludzi, poprawa systemu ochrony przed geozagrożeniami i redukcja potencjalnych strat ekonomicznych.

Konsorcjum *TerraFirma* stosuje innowacyjną technikę teledetekcyjną PSI, która umożliwia satelitarną rejestrację milimetrycznych przemieszczeń powierzchni ziemi. Począwszy od roku 1991, kiedy wystrzelono na orbitę pierwszego satelitę ERS-1, uzyskuje się pomiary przemieszczeń punktów referencyjnych (PS — *persistent scatterer*), rejestrowane w wyniku odbicia promieniowania radarowego od budynków, mostów i innych obiektów. W rezultacie specjalistycznego przetwarzania powstaje unikalny zbiór pomiarów przemieszczeń punktów na dużym terenie. Za pomocą metod konwencjonalnych uzyskanie takiego zbioru danych byłoby niezwykle trudne bądź wręcz niemożliwe. Pomiarów dokonuje się przede wszystkim na terenach zurbanizowanych i przemysłowych, gdzie PS są znacznie łatwiej identyfikowane. Trudniejsze warunki występują natomiast na obszarach pokrytych roślinnością, która rozprasza wiązkę promieniowania radarowego (Ferretti i in., 2001).

Większość realizowanych obecnie projektów jest ukierunkowana na identyfikację osiadań na terenach zurbanizowanych oraz na badania osuwisk. W niedalekiej przyszłości planowane jest objęcie badaniami terenów sejsmicznych, pasów wybrzeży oraz obszarów równinnych zagrożonych powodziami.

Konsorcjum *TerraFirma* zaplanowało działalność w trzech kilkuletnich etapach. Pierwszy etap, który trwał 2 lata, zakończył się w 2005 r., drugi etap będzie trwał 3 lata, a trzeci 5 lat. Etap pierwszy miał na celu przede wszystkim

<sup>1</sup>Państwowy Instytut Geologiczny, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa

<sup>2</sup>Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Akademia Górniczo-Hutnicza, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

<sup>3</sup>Państwowy Instytut Geologiczny, Oddział Górnośląski, ul. Królowej Jadwigi 1, 41-200 Sosnowiec

konsolidację dostarczycieli danych oraz ich użytkowników. W ramach drugiego etapu przetwarzano dane z wytopowanych aglomeracji miejskich i przemysłowych, jak również terenów osuwiskowych w Grecji, we Włoszech i Szwajcarii, wykonano także scenę na terenie Polski, obejmującą południową część GZW, łącznie z przygranicznym rejonem Czech — Ostrawą i Karwiną.

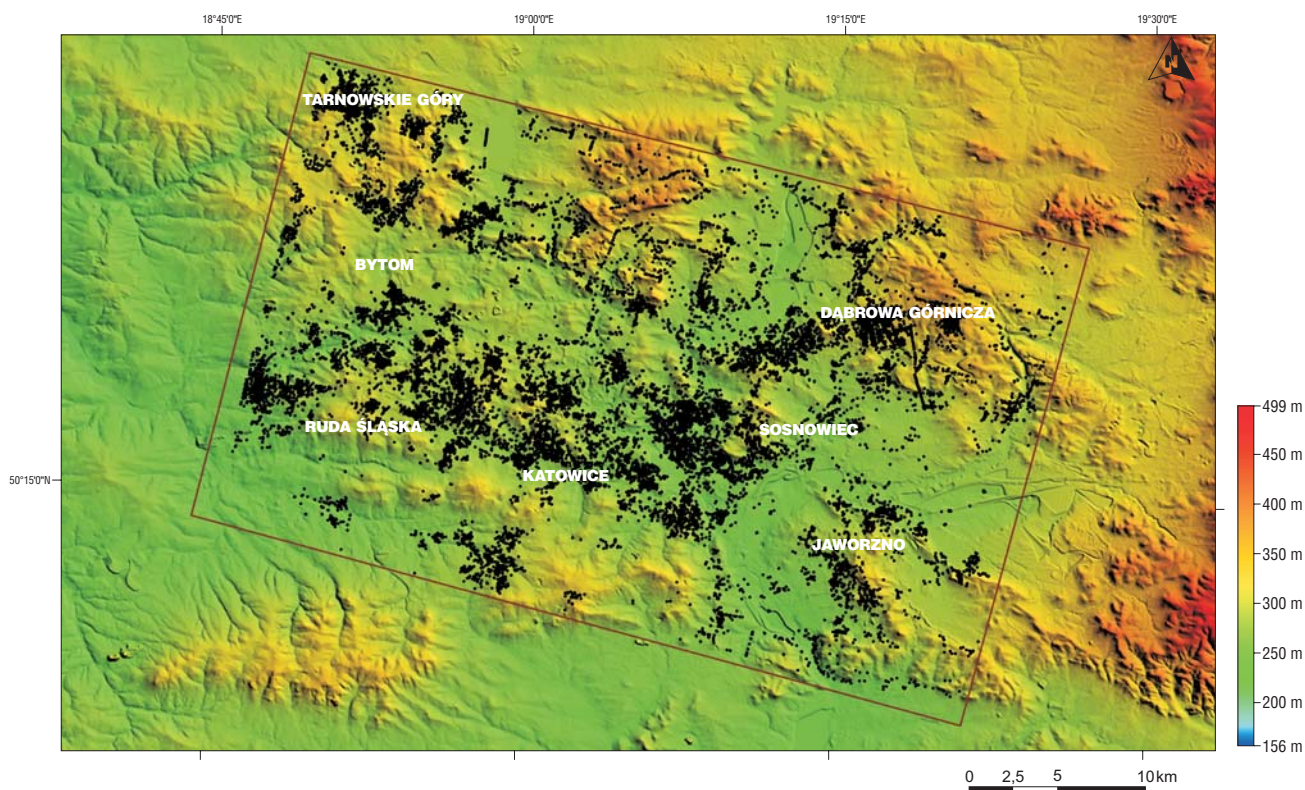
W połowie marca 2004 r. oraz na wiosnę 2006 r. Państwowy Instytut Geologiczny jako partner konsorcjum *TerraFirma* otrzymał zbiór danych PSInSAR z terenu północno-wschodniej części Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Scena ta nosi nazwę *Sosnowiec*. Przetworzony zbiór danych obejmuje sceny radarowe ERS-1 i ERS-2, zarejestrowane w latach 1992–2006. Dane PSInSAR zostały przetworzone przez firmę *Tele Rilevamento Europa* i posłużyły do realizacji projektu *Metoda satelitarnej interferometrii radarowej PSInSAR w rozpoznaniu geodynamiki północno-wschodniej części GZW*. Celem projektu było przetestowanie użyteczności interferometrycznych danych satelitarnych PSI do rozpoznawania zjawisk geodynamicznych na powierzchni terenu. Do obróbki danych wykorzystano metody geostatystyczne. Badania prowadzone w ramach projektu skupiły się przede wszystkim na analizie danych interferometrycznych w kontekście rzeźby, użytkowania terenu, działalności górniczej oraz występowania wstrząsów górotworu, budowy geologicznej i tektoniki. Badania przeprowadzono na obszarze o powierzchni około 1210 km<sup>2</sup>. Prawie cały obszar badawczy znajduje się w granicach GZW (ok. 1000 km<sup>2</sup>), w tym znaczna jego część (ok. 680 km<sup>2</sup>) znajduje się w granicach pól eksploatacyjnych kopalń węgla kamiennego. Wiele z tych kopalń zamknięto w ciągu ostatnich dziesięciu lat. Obszary czynnych kopalń zajmują ok. 260 km<sup>2</sup>, co stanowi 21,5% terenu objętego pomiarami.

### Zbiór danych PSI Sosnowiec

Scena *Sosnowiec* została wykonana za pomocą oprogramowania *PSInSAR<sup>TM</sup>* (*Permanent Scatterer Interferometry, trade mark Telerilevamento Europa*), opatentowanego przez włoską instytucję *Tele Rilevamento Europa (TRE)* w Mediolanie. Pierwszy wstępnie przetworzony zestaw danych przekazano w marcu 2004 r.; drugą wersję, zawierającą punkty PS o wysokiej koherencji — na wiosnę 2006 r. (ryc. 1). Ze strony włoskiej kierownikiem projektu był Aleksandro Ferreti. Dostarczony materiał jest standardowym produktem *TerraFirma H-1*. Jest to „surowy”, geokodowany i sprawdzony pod kątem jakości zestaw danych PSI, wykonywany przez *TerraFirma Operational Service Provider* (w tym wypadku *TRE*). Produkt H-1 powstaje w wyniku integracji danych radarowych pozyskanych podczas trzech misji satelitarnych — ERS-1 (1991–1996), ERS-2 (1995 do chwili obecnej) i Envisat (2001 do chwili obecnej). Dostarcza informacji na temat przemieszczeń powierzchni terenu w ciągu ostatnich 16 lat. Dane te są przetworzone do poziomu umożliwiającego integrację z GIS. Produkt H-1 obejmuje wyłącznie dane pomiarowe i nie zawiera żadnej interpretacji. Produkt ten może być niezwykle przydatny do identyfikacji zagrożeń związanych z: osiadaniem, górnictwem i podziemnymi pracami inżynierskimi, osuwiskami, powodzią, deformacjami skorupy ziemskiej, neotektoniką, sejsmicznością czy działalnością wulkaniczną. Świadczą o tym liczne przykłady wykorzystania tych informacji w całej Europie.

Główne zalety technologii PSI to:

- Możliwość wykonywania pomiarów różnicowych o dużej dokładności: względnego tempa przeciętnego rocznego przemieszczenia pomiędzy dwoma sąsiednimi punktami z dokładnością do  $\pm 0,1-0,5$  mm/rok; pojedynczego pomiaru względnego przemieszcze-



Ryc. 1. Rozmieszczenie przestrzenne zbioru PS o podwyższonej koherencji na tle numerycznego modelu terenu  
Fig. 1. Distribution of the high coherence PS dataset superimposed on digital elevation model



nia PS z dokładnością do 1–4 mm względem kierunku przelotu satelity oraz do 1 cm w kierunku prostopadłym do niego.

- ❑ Maksymalne, możliwe do zmierzenia, tempo przemieszczeń, ograniczone przez zakres długości fal satelitów ERS-1 i ERS-2, wynosi do 14 mm w trakcie 35 dni.
- ❑ Pomiar wartości składowej pionowej jest znacznie dokładniejszy niż za pomocą aparatury GPS.
- ❑ Szybka i efektywna technika pomiarów przemieszczeń obszarów o powierzchni nie przekraczającej 2000 km<sup>2</sup>.
- ❑ Niski koszt monitoringu przemieszczeń w porównaniu z innymi metodami pomiarowymi *in-situ*.
- ❑ Bogactwo danych archiwalnych (zwłaszcza z terenów europejskich), umożliwiające odtworzenie historii przemieszczeń od 1991 r.
- ❑ Duża gęstość punktów pomiarowych PS, zwłaszcza na terenach zurbanizowanych — powyżej 100 PS/km<sup>2</sup>.
- ❑ Dane mogą być łatwo zaimportowane do GIS.
- ❑ Zalecane komplementarne wykorzystanie z innymi metodami monitoringu przemieszczeń — GPS i niwelacją precyzyjną (*optical levelling*).

Zbiór danych sceny *Sosnowiec* zawiera 30 869 wyselekcjonowanych punktów pomiarowych o podwyższonej koherencji (spójności sygnału) — w przedziale od 0,72 do 0,98. W tym punktów o koherencji od 0,72 do 0,8 jest 21 695, co stanowi 70,3% całego zbioru, punktów o koherencji w przedziale 0,8–0,9 znajduje się w bazie 7932, to jest 25,7%, natomiast punktów o najwyższej koherencji, tj. powyżej 0,9, jest 1242, co stanowi 4% zbioru.

Na badanym obszarze GZW wartość średniej szybkości przemieszczania się punktów (mm/rok) waha się od –23 do +7,6 mm. Jeśli chodzi o wartości skrajne, to zarejestrowano 2 punkty o wartościach poniżej –20 mm, 28 punktów o wartościach mieszczących się w granicach od –20 mm do –15 mm oraz 7 punktów o wartościach powyżej 3 mm.

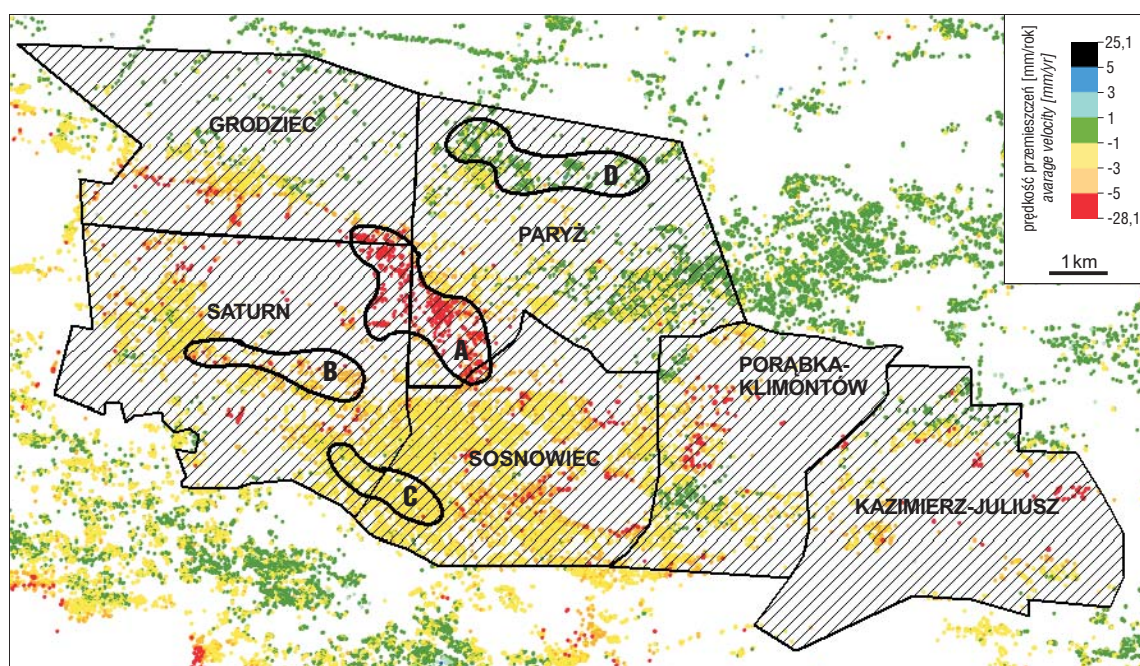
## Analiza statystyczna zbioru danych PSI *Sosnowiec*

Do analizy danych PSI odpowiednie są metody geostatystyczne, które stosuje się we wszystkich tych przypadkach, gdzie wartości parametru zostały pomierzone tylko w wybranych punktach przestrzeni lub czasu i wartości te są zależne od wartości parametru w punktach sąsiednich (oddalone od siebie wartości parametru są skorelowane).

Szczegółowa analiza geostatystyczna przemieszczeń terenu zarejestrowanych dzięki technice PSI została przeprowadzona na obszarach górniczych kopalń: *Sosnowiec*, *Saturn*, *Grodziec*, *Paryż*, *Porąbka-Klimontów* oraz *Kazimierz-Juliusz*, znajdujących się w Zagłębiu Dąbrowskim. Teren ten nie został wybrany przypadkowo. Część z tych kopalń znajduje się w strefie uskoku będzińskiego, w rejonie którego odnotowano znaczące osiadania terenu. Dokładne prześledzenie danych umożliwi wyłonienie czynników, które mogły mieć decydujący wpływ na uruchomienie procesu przemieszczeń gruntu.

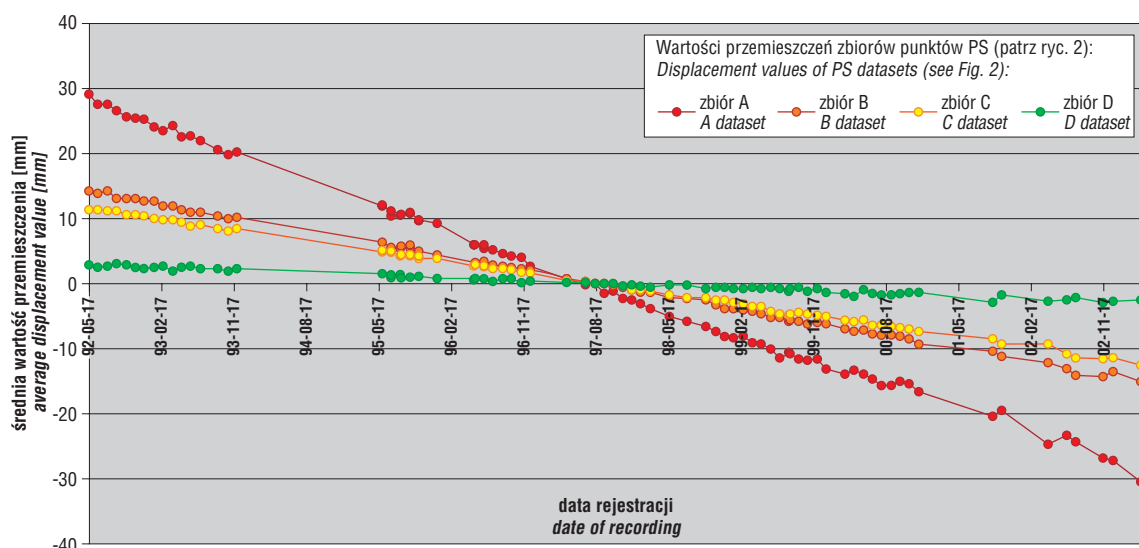
Dla wybranego obszaru badań charakterystyczne jest osiadanie terenu, które największe wartości przyjmuje na terenie obszaru górniczego czynnej kopalni *Kazimierz-Juliusz*, ale również w rejonach, gdzie eksploatacja węgla już od kilku lub kilkunastu lat nie jest prowadzona (ryc. 2). Tylko kilka punktów PS wskazuje na podnoszenie się terenu. Są to pojedyncze obserwacje rozrzucone po całym obszarze i nie tworzące większego skupiska. Północna część obszaru badań to tereny o stosunkowo niewielkich szybkościach przemieszczeń, w granicy 0–1 mm/rok.

W celu analizy przebiegu przemieszczeń w rejonie Zagłębia Dąbrowskiego w latach 1992–2003, zbadano trendy przemieszczeń charakterystycznych zbiorów danych A, B, C, D, zaznaczonych na ryc. 2. Każdy z czterech wskazanych zbiorów danych zawiera punkty PS o charakterystycznych wartościach średniej szybkości przemieszczeń terenu. Zbiór A (czerwony) zawiera punkty, których szybkość osiadań jest większa niż 5 mm/rok. Zbiór B



**Ryc. 2.** Rozmieszczenie przestrzenne punktów PS na obszarach górniczych wybranych kopalń Zagłębia Dąbrowskiego (A, B, C, D — zbiory punktów o charakterystycznej prędkości osiadania)

**Fig. 2.** Distribution of PS points superimposed on the selected mining areas of the Dąbrowa Coal Basin (A, B, C, D — point datasets with characteristic velocity of subsidence)



Ryc. 3. Wartości przemieszczeń wybranych zbiorów punktów PS (określonych na ryc. 2)  
Fig. 3. Displacement values of selected PS dataset (explained in Fig. 2)

(pomarańczowy) to punkty, w których szybkość osiadań zawarta jest w przedziale 3–5 mm/rok. Zbiór C (żółty) zawiera punkty, których szybkość osiadań jest większa niż 1 mm/rok, ale mniejsza niż 3 mm/rok, a zbiór D (zielony) zawiera punkty o szybkości przemieszczeń mniejszej niż 1 mm/rok. Na ryc. 3. przedstawiono średnie wartości przemieszczeń każdego ze zbiorów punktów (A, B, C, D), obliczane osobno dla każdego momentu wykonania obrazu radarowego. Dla kolejnych przelotów satelity oddzielnie uśredniane były wartości przemieszczeń zarejestrowane we wszystkich punktach należących do poszczególnych zbiorów (A, B, C, D).

W przybliżeniu prostolinijny wykres średnich przemieszczeń wybranych zbiorów punktów A, B, C, D (ryc. 3) świadczy o tym, że w latach 1992–2003 nie następowały większe zmiany w przebiegu przemieszczeń terenu. Dokładna analiza trendu wskazuje jedynie na niewielkie zmiany w wartościach zarejestrowanych po roku 2001. Zmiany te ujawniają się na przykład na wykresie odzwierciedlającym przebieg przemieszczeń zbioru punktów A —

o największym tempie osiadania. Można również zaobserwować, iż po roku 1996 szybkość przemieszczeń terenu nieznacznie zmalała. Zmiana ta może mieć związek z zaprzestaniem eksploatacji węgla kamiennego w kopalniach: *Paryż* (czerwiec 1995), *Saturn* (grudzień 1995), *Sosnowiec* (grudzień 1997) i *Grodziec* (grudzień 1998). Ponadto można też stwierdzić, że liniowy przebieg przemieszczeń PS wybranych zbiorów świadczy o poprawnym przetworzeniu danych interferometrycznych.

Następnie porównano i przeanalizowano procentowy udział PS z poszczególnych klas użytkowania terenu przyjętych w bazie CORINE (tab. 1).

Zgodnie z oczekiwaniami, zdecydowanie największy udział w zbiorze danych PS mają punkty zlokalizowane na terenach zurbanizowanych i przemysłowych (81,5%). Jest natomiast zaskakujące, że kolejną grupę pod względem wielkości udziału stanowią punkty położone na terenach użytków rolnych i pastwisk (6,5%). Należy jednak pamiętać, że co do wielkości zajmowanego obszaru klasa ta zajmuje drugie miejsce. Nieco mniejszy udział mają punkty

Tab. 1. Analiza statystyczna zbioru danych o podwyższonej koherencji

Tab. 1. Statistical analysis of the high coherence PS dataset

Typy użytkowania terenu <i>Landuse</i>	Liczba punktów PS <i>Number of points PS</i>	Udział procentowy <i>Percentage</i>
Tereny zurbanizowane i przemysłowe <i>Urban and industrial areas</i>	25182	81,5
Drogi <i>Roads</i>	153	0,5
Górnictwo odkrywkowe i składowiska odpadów <i>Mineral extraction and dump sites</i>	144	0,5
Zielone obszary zurbanizowane, infrastruktura sportowa i rekreacyjna <i>Green urban areas, sport and leisure facilities</i>	1228	4,0
Użytki rolne i pastwiska <i>Agricultural areas and pastures</i>	2022	6,5
Inne uprawy oraz rozproszona zabudowa <i>Complex cultivation pattern with scattered development</i>	1533	5,0
Obszary leśne <i>Forests</i>	583	1,9
Wody powierzchniowe <i>Waters</i>	24	0,1
Suma <i>Total</i>	30869	100,0



PS zarejestrowane na terenach innych upraw i rozproszonej zabudowy (5%) oraz zielonych obszarów zurbanizowanych (4,0%). W zbiorze danych odnotowano zdecydowanie mniejszy udział PS na obszarach leńszych (1,9%), co było zgodne z przewidywaniem. Stosunkowo słabo jest reprezentowana klasa terenów górnicznych i składowisk odpadów oraz dróg (po 0,5% udziału). Należy to wytłumaczyć niewielką powierzchnią obu klas użytkowania terenu. Zgodnie z oczekiwaniem bardzo mały udział przypada punktom PS na obszarach wód powierzchniowych (0,1%). Można uznać, że wynik ten mieści się granicach błędu.

### Interpretacja wyników

#### Analiza spadków terenu w obrębie sceny Sosnowiec.

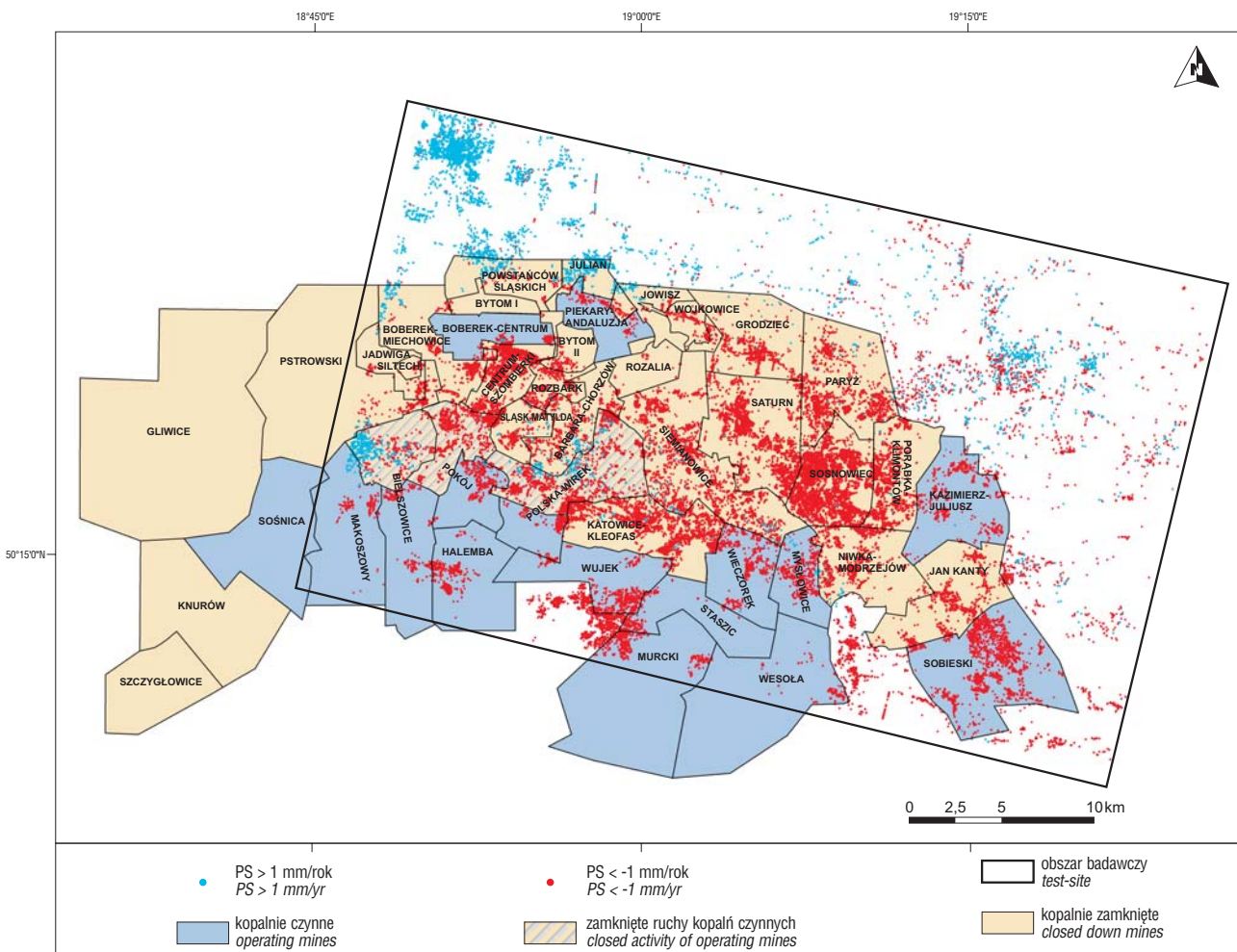
Przestrzenne rozmieszczenie PS porównano z numerycznym modelem terenu DTED 2, opracowanym na podstawie wektoryzacji diapozytywów wojskowych map topograficznych w skali 1 : 50 000. Na podstawie tych danych wygenerowano mapy nachyleń w trzech przedziałach — powyżej 8, 15 i 22°.

Na analizowanym terenie obszary nachylone występują jedynie sporadycznie, a spadki terenu nie przekraczają na ogół 15°. Dlatego też nie zauważono wyraźniejszych związków pomiędzy przemieszczeniami punktów PS a występowaniem terenów nachylonych. Najwyraźniejsza zależność zaznacza się w strefie o przebiegu NW-SE, pomiędzy Będzinem, Grodkowem i Wojkowicami, która

odpowiada w przybliżeniu przebiegowi uskoku będąńskiego. Pewne lokalne związki zaznaczają się również w strefie uskoku grodzieckiego (NNW-SSE), na północ od Grodkowa oraz na południe od Mysłowic.

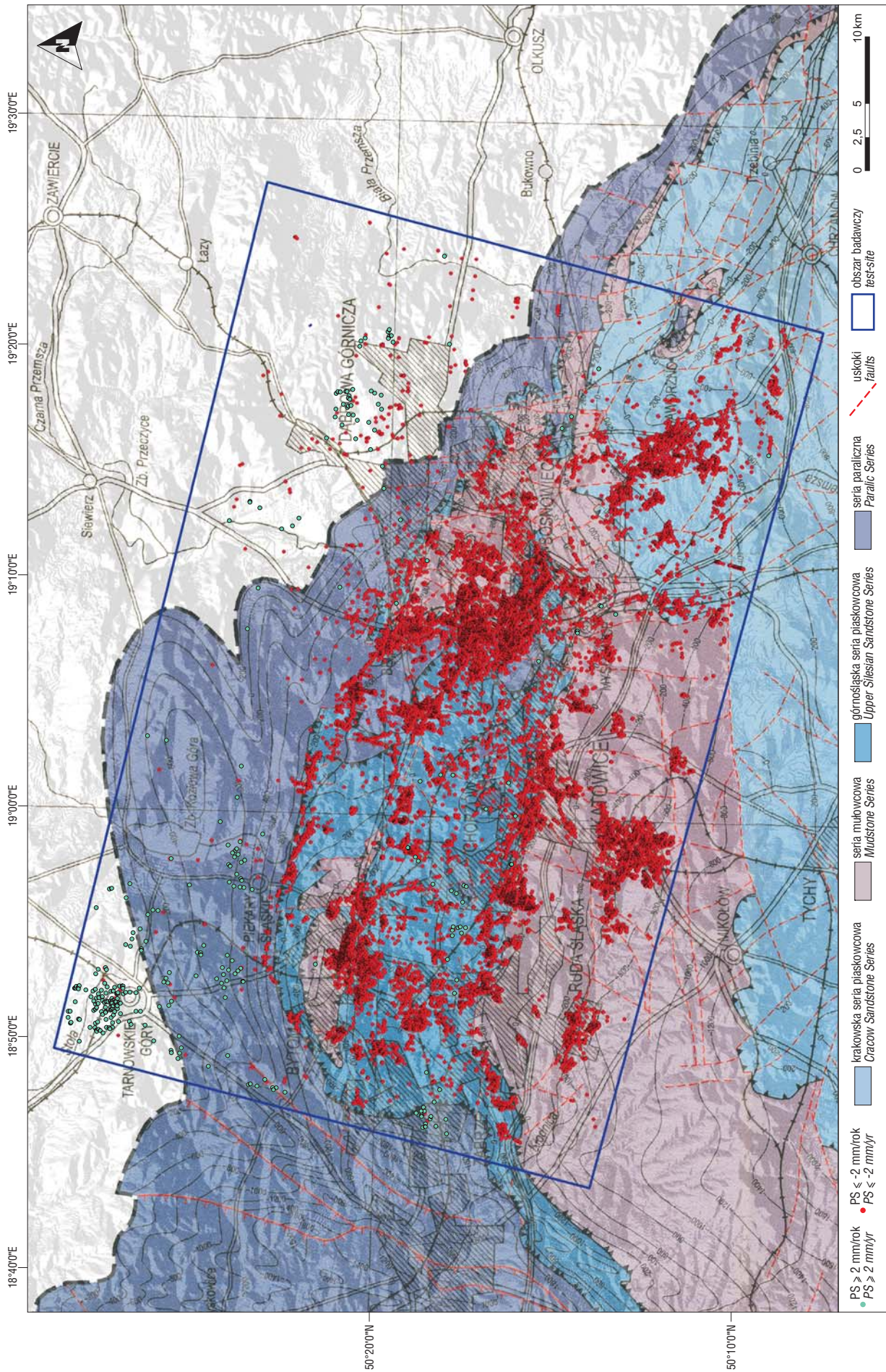
**Analiza sceny Sosnowiec w kontekście obszarów górnicznych i geologii.** Porównanie lokalizacji obszarów górnicznych kopalń czynnych, kopalń zamkniętych oraz kopalń czynnych o ruchach zamkniętych z przestrzennym rozkładem PS charakteryzujących się przemieszczeniami  $< -1$  oraz  $> +1$  mm/rok wskazuje (ryc. 4), że nie ma oczywistych zależności pomiędzy rozkładem przemieszczeń a lokalizacją obszarów górnicznych. Przemieszczenia o różnych zwrotach występują zarówno na obszarze kopalń czynnych, jak i zamkniętych, a także poza obszarami górnicznymi. Można jednak zauważyć, że na pewnych obszarach górnicznych, m.in. kopalń *Sobieski*, *Halemba*, *Murcki*, *Wujek*, *Staszic*, *Kazimierz Juliusz* i w północnej części obszaru górnicznego *Piekary-Andalużja* oraz *Pokój*, przeważają ujemne ruchy pionowe. Znaczna koncentracja PS świadczących o osiadaniu znajduje się również na terenach zamkniętych kopalń *Sosnowiec*, *Saturn*, *Paryż*, *Katowice-Kleofas* i *Centrum-Szombierki*.

Za bardzo interesujące można uznać spostrzeżenia odnośnie do przemieszczeń punktów PS na terenach kopalń *Bielszowice* i *Polska-Wirek*. Obie kopalnie są czynne, jednak mają też obszary ruchów zamkniętych. Właśnie na tych obszarach obok osiadania następuje również podno-



Ryc. 4. Przestrzenny rozkład wybranych punktów PS na tle obszarów górnicznych  
Fig. 4. Distribution of selected PS points superimposed on the mining areas





**Ryc. 5.** Przestrzenny rozkład wybranych punktów PS na tle utworów karbonu produktywnego (jednostki litostratigraficzne według Jureczki i in., 2005)  
**Fig. 5.** Distribution of selected PS points superimposed on the Carboniferous coal-bearing deposits (lithostratigraphic units after Jureczka et al., 2005)



szenie się terenu. Jest to dobrze widoczne w zachodniej części obszaru KWK *Bielszowice* oraz na styku obszarów górniczych kopalni *Polska-Wirek* oraz zamkniętej kopalni *Barbara-Chorzów*. Być może podnoszenie się gruntu można wiązać ze zmianami poziomu wód podziemnych w częściowo zamkniętych kopalniach. Problem ten wymaga dalszych, szczegółowych badań.

W skali regionalnej zbieżność przestrzennego rozmieszczenia obszarów podlegających osiadaniu z układem strukturalnym utworów karbonu produktywnego jest zbyt oczywista, by mogła być efektem przypadku (ryc. 5). Kilka liniowych stref PS bez wątpienia wskazuje na ich związek z geologią. Być może zgodność rozmieszczenia obszarów osiadań z układem strukturalnym GZW wynika również z „dopasowania się” eksploatacji węgla do układu strukturalnego.

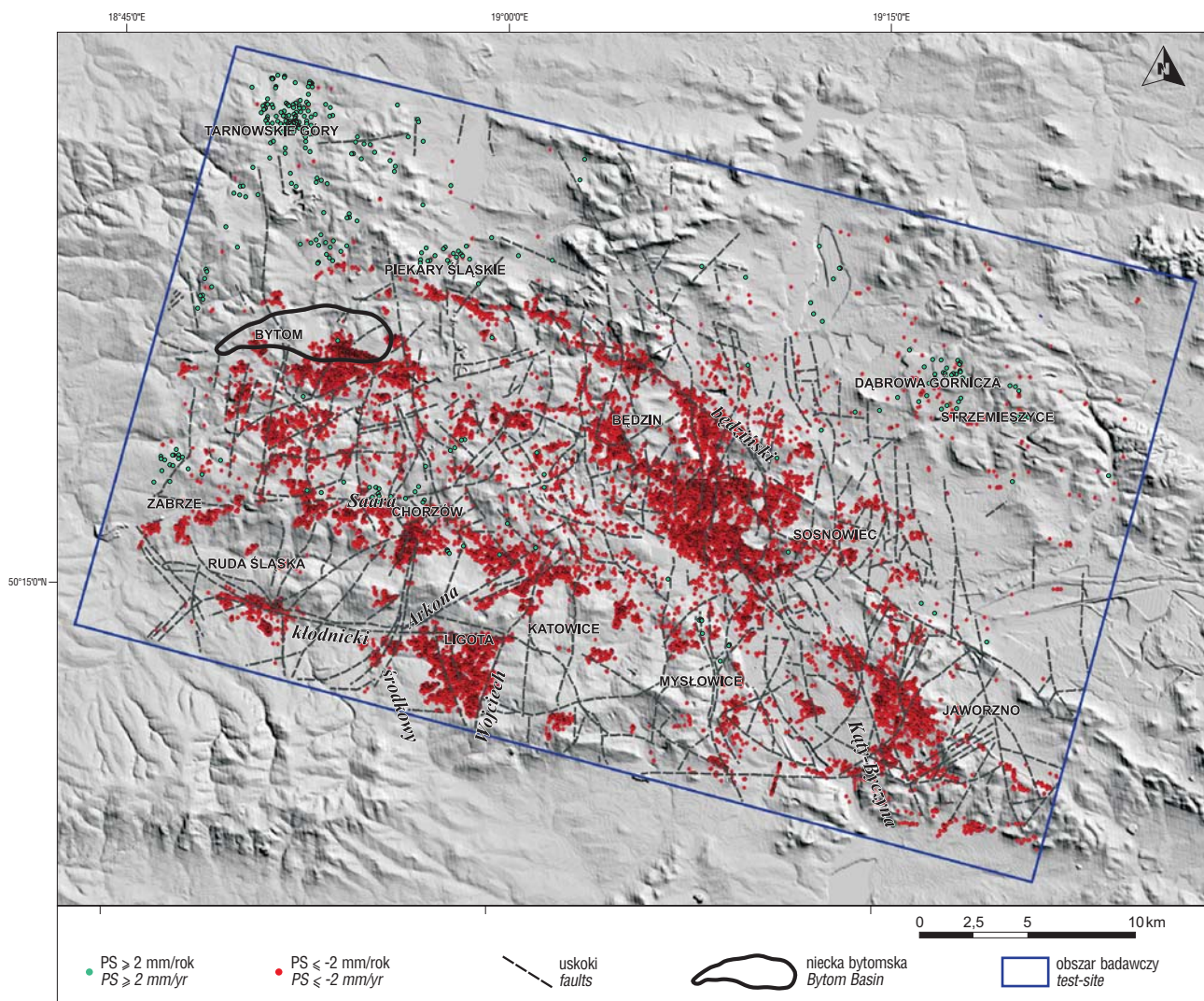
Równoleżnikowy przebieg uskoku kłodnickiego, który stanowi ważną strukturę regionalną, jest wyraźnie podkreślony przez punkty PS wskazujące na ujemne ruchy pionowe. Koncentrują się one zwłaszcza na dwóch odcinkach uskoku — zachodnim, w rejonie Rudy Śląskiej (kopalnia *Halemba*) oraz wschodnim, rejon *Ligoty*. Co ciekawe, punkty wskazujące na obniżanie się terenu są skoncentrowane przede wszystkim w obrębie południowego skrzydła uskoku (w którym występują utwory

triasowe). Uskok ten ma genezę waryscyjską i został odmłodzony w czasie ruchów alpejskich. Zarejestrowane przesunięcia punktów PS mogą świadczyć o istnieniu współczesnych ruchów tektonicznych w jego strefie.

W rejonie Ligoty rozmieszczenie punktów PS przybiera formę klina ograniczonego liniami uskoku: kłodnickiego (od północy), Wojciech (od wschodu) oraz środkowego (od zachodu). Należy wspomnieć, że jest to rejon KWK *Wujek*, KWK *Mureki* oraz KWK *Staszic*.

Inną ważną strefą, wyraźnie odzwierciedloną przez układ punktów PS, jest regionalny uskok będziński. Jest interesujące, że rozkład PS sugeruje przedłużenie tego uskoku zarówno w kierunku NW (po okolice Piekary Śląskich), jak i SE (do Sosnowca). Tutaj również większość ujemnych PS jest zlokalizowana po stronie południowego (zrzuconego) skrzydła uskoku (ryc. 6). Uskok będziński ma podobną genezę do uskoku kłodnickiego, można więc założyć, że i w tym przypadku PS wskazują na przejawy współczesnej tektoniki. Ujemne PS występują także w obrębie struktury synklinalnej w rejonie Bytomia, na obszarze wychodni serii mułowcowej.

Niezwykłe wyraźnie zaznacza się regionalna granica, przebiegająca na wielokilometrowym odcinku pomiędzy Rudą Śląską a Mysłowicami, pomiędzy wychodnią spągu serii mułowcowej a górnośląską serią piaskowcową.



Ryc. 6. Porównanie przestrzennego rozkładu wybranych punktów PS i głównych uskokuw na tle rzeźby terenu (uskoki wg Herbicha, 1981)  
Ryc. 6. Comparison of the distribution of selected PS points and the main faults superimposed on shaded relief. (faults after Herbich, 1981)



Przeważająca liczba ujemnych PS występuje po stronie górnośląskiej serii piaskowcowej. Odzwierciedlenie tej regionalnej granicy w przestrzennym rozmieszczeniu PS może świadczyć o aktywności procesów tektonicznych. Ich rozpoznanie wymaga przeprowadzenia szczegółowej analizy danych z wierceń i przekrojów geologicznych oraz badań geofizycznych.

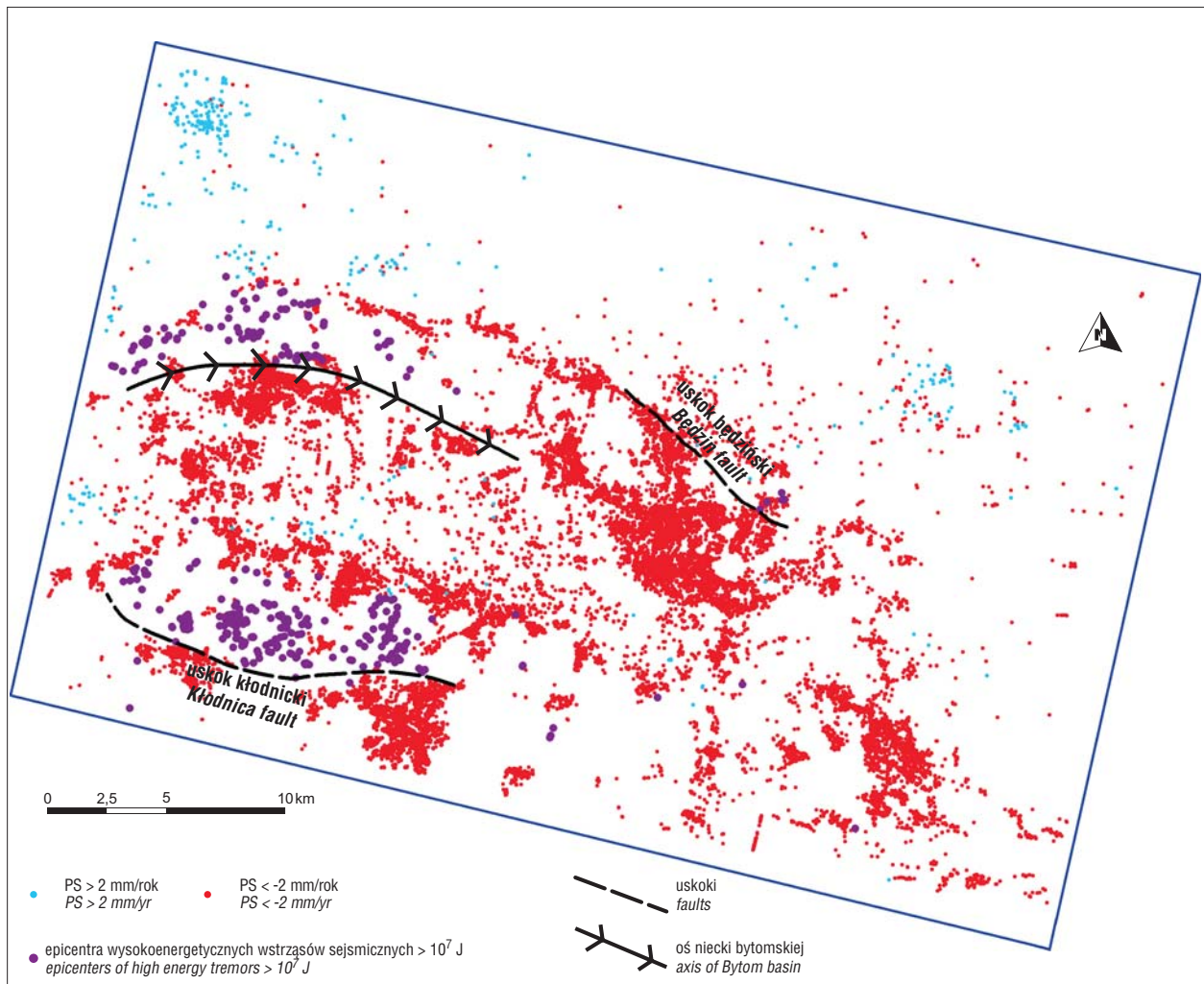
W sposób wyraźny zaznacza się również regionalna granica pomiędzy wychodniami spągu górnośląskiej serii piaskowcowej a serią paraliczną, przebiegająca od Bytomia przez Piekary Śląskie do Będzina. Obszary występowania utworów górnośląskiej serii piaskowcowej cechuje przewaga ujemnych PS, natomiast w obrębie serii paralicznej dominują dodatnie PS, można więc zaryzykować twierdzenie, że obszary występowania górnośląskiej serii piaskowcowej (pomiędzy Zabrzem, Bytomiem, Będzinem i Chorzowem) w znacznej mierze podlegają osiadananiu.

Poza granicami GZW, na północ od Dąbrowy Górniczej oraz Strzemieszyc, występują zarówno dodatnie, jak i ujemne PS. Z kolei w rejonie miejscowości Tarnowskie Góry mamy do czynienia ze zdecydowaną przewagą ruchów wznoszących. Nie jest jasne, czy ruchy te mają związek z odciążeniem krawędzi GZW, czy są związane ze starą eksploatacją górniczą złóż cynku, ołowiu i żelaza oraz

zmianami warunków hydrogeologicznych. Rozwiązanie tej kwestii wymaga przeprowadzenia odrębnych badań.

W różnych częściach GZW stwierdzono liczne korelacje pomiędzy liniami uskokowymi a ujemnymi PS. Dotyczą one między innymi uskoku: Arkona (odnoga uskoku kłodnickiego), uskoku Kąty–Byczyna i myśłowickiego w rejonie Jaworzna, uskoku Saary w rejonie Rudy Śląskiej i Chorzowa oraz wielu innych.

**Analiza sceny Sosnowiec w kontekście danych sejsmicznych.** Eksploatacja pokładów węgla kamiennego, prowadzona na obszarze GZW od przeszło 200 lat, stworzyła skomplikowany stan naprężenia i deformacji, który jest przyczyną powstawania zjawisk dynamicznych, objawiających się w postaci wstrząsów górotworu. Obserwacje sejsmologiczne są systematycznie prowadzone na terenie GZW od około 60 lat. Na podstawie danych nadsyłanych przez Górnośląską Regionalną Sieć Sejsmologiczną (GRSS) oraz kopalniane sieci sejsmologiczne (KSS) Główny Instytut Górnictwa prowadzi i opracowuje Bank Silnych Wstrząsów Górniczych. Rejestrowana intensywność sejsmiczności indukowanej jest bardzo zróżnicowana i waha się od odslabych wstrząsów, niewyczuwalnych przez ludzi, do wstrząsów o sile słabych trzęsień ziemi, powodujących straty materialne (ryc. 7).



**Ryc. 7.** Rozmieszczenie przestrzenne wybranych punktów PS i wysokoenergetycznych wstrząsów sejsmicznych — rozkład wysokoenergetycznych wstrząsów sejsmicznych według Stec (2001) i Pileckiej (2005)

**Fig. 7.** Distribution of selected PS points and epicenters of high-energy tremors (distribution of epicenters of high-energy tremors after Stec (2001) and Pilecka (2005))



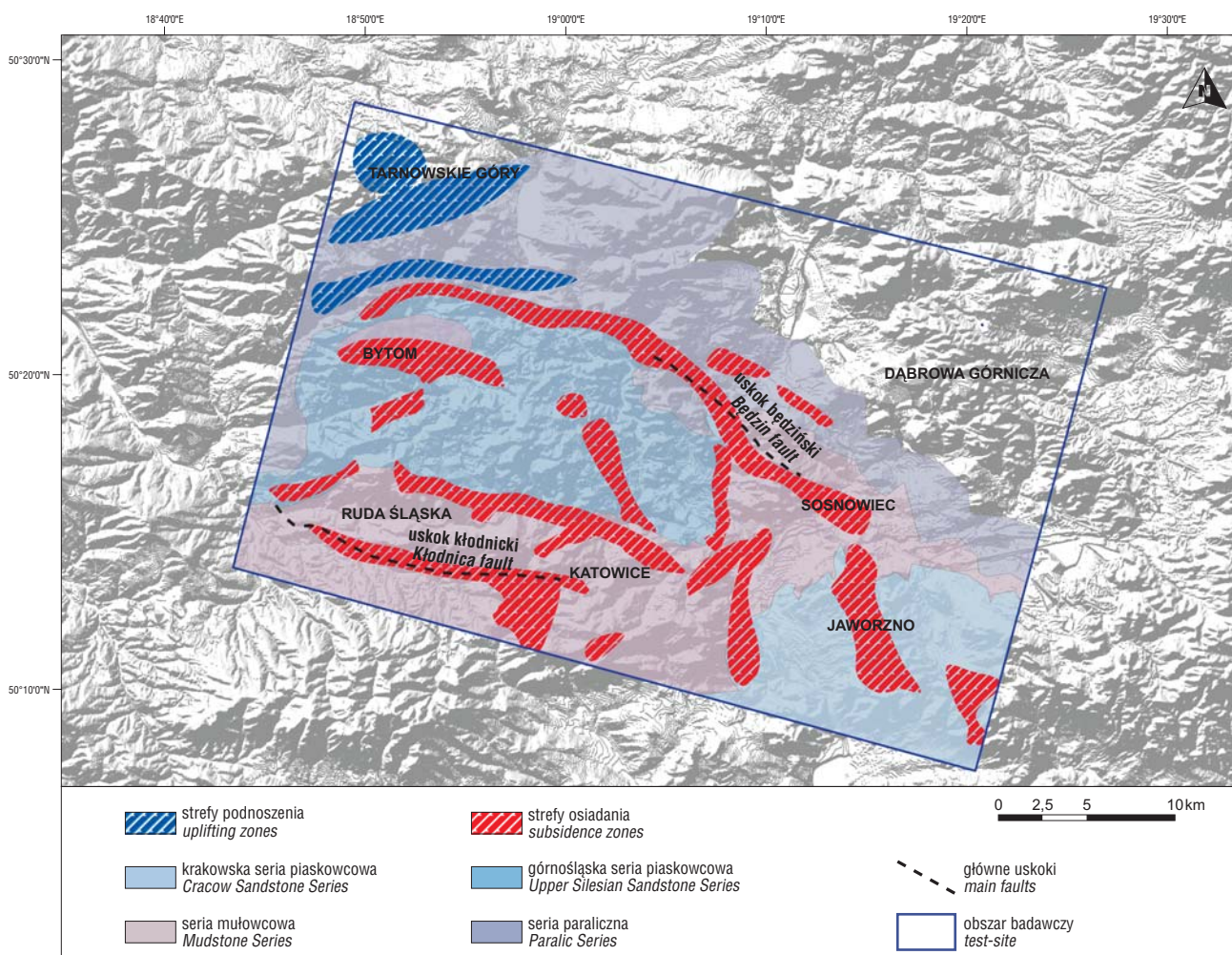
Dotychczasowe badania rozkładów czasowo-energetycznych oraz mechanizmów powstawania trzęsień ziemi w rejonie GZW wskazują na występowanie dwóch rodzajów wstrząsów, charakteryzujących się różnymi mechanizmami (Pilecka, 2006). Pierwsze z nich występują w bezpośrednim sąsiedztwie wyrobisk górniczych i są ściśle związane ze stanem naprężenia i deformacji wynikającym z naruszenia górotworu wskutek prac górniczych. Zazwyczaj są to wstrząsy słabsze, oddziałujące w małej odległości od frontu robót górniczych. Drugi typ wstrząsów powstaje w wyniku nałożenia się dwóch czynników — górniczego i tektonicznego. Są to wstrząsy wysokoenergetyczne, występujące w większych odległościach od frontu prac górniczych. Mogą też występować w sąsiedztwie różnych form tektonicznych lub na terenach złóż częściowo wyeksploatowanych. Na ogół są one groźniejsze. W tej grupie wstrząsów dominuje mechanizm poślizgowy normalny, w niektórych przypadkach z zaznaczającym się poziomem przemieszczenia w ognisku wstrząsu. Zdarza się również, że azymuty płaszczyzn rozrywu i ich upady korelują się z rozciągłością i upadem uskoku.

Dobrym przykładem korelacji ognisk wstrząsów z kierunkiem rozciągłości uskoku kłodnickiego i uskoku towarzyszących są badania prowadzone w kopalni *Halemba* (Dubiński & Stec, 2001). Analiza objęła grupę zjawisk sejsmicznych o energii  $> 10^6$  J z lat 1999–2000, zlokalizo-

wanych w rejonie uskoku kłodnickiego i czterech innych uskoku towarzyszących. W toku analizy wyróżniono trzy grupy wstrząsów związanych z uskokami, w tym tylko jedna z nich była zgodna z rozciągłością uskoku kłodnickiego (E-W).

Lasocki i Idziak (1998), analizując relacje pomiędzy ogniskami kolejnych zjawisk sejsmicznych, stwierdzili kierunkowe zależności występowania ognisk wstrząsów i to zarówno należących do tego samego, jak i do różnych skupisk. Przestrzenno-czasowe zależności silnych wstrząsów autorzy ci tłumaczą jako efekt procesów dynamicznych zachodzących na skalę regionalną.

Jura (1995, 1999) podjął próbę odtworzenia pola naprężeń wzdłuż tzw. młodych uskoku na podstawie metod strukturalno-geomorfologicznych oraz szczegółowego badania wstrząsów górotworu w sąsiedztwie stref uskoku. Za główne współczesne struktury sejsmogeniczne uznał on dwie hipotetyczne brzeżne nieciągłości, przebiegające równoleżnikowo wzdłuż strefy granicznej między segmentami masywu górnośląskiego — blokami Bytomia i centralnym. Na północy jest to nieciągłość pod osi synkliny Bytomia, a na południu nieciągłość w rejonie uskoku kłodnickiego. Wyniki badań w północnej części uskoku wskazują na występowanie młodoalpejskich naprężeń tektonicznych, które mają wpływ na indukowane przez eksploatację górniczą wstrząsy górotworu.



Ryc. 8. Obraz inetrpretacji zbioru PSInSAR w aspekcie danych geologicznych  
Fig. 8. Interpretation of PSInSAR dataset based on geological data

Na badanym obszarze wstrząsy sejsmiczne grupują się w trzech rejonach — na północ od uskoku kłodnickiego, na północ od osi niecki bytomskiej oraz w południowo-wschodnim odcinku uskoku będzińskiego. Układ przestrzenny PS o przemieszczeniach  $< -2$  mm oraz  $> +2$  mm wskazuje na pewne powiązania z lokalizacją epicentrow wstrząsów o energii  $> 10^7$  J, zarejestrowanych w latach 1985–2004 (ryc. 7). Jedynie w strefie uskoku będzińskiego są one związane z ujemnymi PS. W pozostałych dwóch lokalizacjach wstrząsy sejsmiczne występują dokładnie pomiędzy strefami o ujemnych punktach PS. Trudno jednoznacznie wyjaśnić przyczyny tego stanu rzeczy. Być może wysokoenergetyczne wstrząsy generują przemieszczenia większe od tych, które można zarejestrować za pomocą SAR pasma C (5,66 cm). Być może również system nie może ich zarejestrować z uwagi na zbyt szybkie tempo przemieszczeń.

### Wnioski

Próbę interpretacji przemieszczeń na terenie GZW w aspekcie danych geologicznych przedstawiono na ryc. 8. Zwraca uwagę możliwość przedłużenia uskoku będzińskiego i szybsze osiadanie terenów objętych wychodniami górnośląskiej serii piaskowcowej (powierzchni stropowej karbonu produktywnego) w odniesieniu do obszarów, gdzie występują wychodnie serii mułowcowej i paralicznej.

Analiza danych PSI ma istotne znaczenie dla wytypowania newralgicznych miejsc lub stref dla przeprowadzenia badań szczegółowych za pomocą innych metod. Miejsca wskazujące na podwyższoną mobilność podłoża powinny być bezwzględnie brane pod uwagę w trakcie prowadzenia działalności górniczej oraz opracowywania planów zagospodarowania przestrzennego. Terenami, które powinny być objęte badaniami w pierwszej kolejności, są: rejon KWK *Halemba* przyległy do uskoku kłodnickiego, rejon KWK *Murcki*, wyznaczony liniami uskoków: kłodnickiego (od północy), Wojciech (od wschodu) oraz nie nazwanego (od zachodu), strefy uskokowe w rejonie KWK *Sobieski-Jaworzno III* oraz cała strefa uskoku będzińskiego.

Jak widać na przykładzie rejonu GZW, technika PSI dostarcza bardzo ważnych danych, niezbędnych nie tylko do przewidywania zagrożeń związanych z przemieszczeniami terenu, ale istotnych również w procesie badania współczesnej aktywności tektonicznej. W celu zwiększenia bezpieczeństwa w obszarach górniczych, optymalnym rozwiązaniem jest integracja danych PSI z danymi DiffSAR, GPS, a także danymi innego typu, jak np. mapy aktywności sejsmicznej lub mapy lineamentów. Połączenie tych danych pozwoli na dokładniejsze poznanie typu deformacji występujących w rejonie badań. Technika PSI to niewątpliwie bardzo istotne źródło informacji przydatne do monitoringu terenów niestabilnych. Wyniki badań zagranicznych naukowców, potwierdzone w trakcie wykonywania niniejszego opracowania, wskazują na ogromną użyteczność tej metody. Wdrożenie jej na stałe jako techniki pomiarowej w badaniu niewielkich, permanentnych przemieszczeń terenu może mieć kluczowe znaczenie dla zwiększenia bezpieczeństwa obszarów, na których takie ruchy występują. Należy jednak pamiętać, że pomimo wielu bardzo ważnych spostrzeżeń dotyczących korelacji PSI z elementami geologii, rzeźby, użytkowania terenu, działalności górniczej itp., w wielu przypadkach analiza dała wyniki niejednoznaczne, przykładem mogą być rezultaty szcze-

gółowej analizy aglomeracji sosnowieckiej. Badania metodyczne powinny być więc prowadzone również na innych obszarach Polski, o odmiennych warunkach geologicznych i zagospodarowaniu.

Praca wykonana na zlecenie Ministerstwa Nauki w ramach grantu nr 4 T12B 070 28.

### Literatura

- BUŁA Z., HABRYN R., PIĄTKOWSKA A., DOKTÓR S., GRANICZNY M. & KOWALSKI Z. 2007 — Plan strukturalny formacji osadowych Górnego Śląska i zachodniej Małopolski w świetle analizy teledetekcyjnej. *Prz. Geol.*, 55: 582–588.
- CZARNOGÓRSKA M., GRANICZNY M., JURECZKA J., KOWALSKI Z. & PIĄTKOWSKA A. 2006 — Application of the PS interferometry for identification of geohazards — case study the Upper Silesian Coal Basin, The abiotic Environment — evaluation of changes and hazards — case studies. Abstracts and field trip guide-book, Centre of Excellence REA, Polish Geological Institute: 16–17.
- DUBIŃSKI J. & STEC K. 2001 — Relationship between focal mechanism parameters of mine tremors and local strata tectonics, Dynamic rock mass response to mining. The South African Institute of Mining and Metallurgy, Johannesburg: 113–118.
- FERRETTI A., PRATI C. & ROCCA F. 1999 — Permanent Scatterers in SAR interferometry. Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 1999), Hamburg (Germany), 28 June–2 July 1999, 3: 1528–1530.
- FERRETTI A., PRATI C. & ROCCA F. 2001 — Permanent Scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39: 8–20.
- GRAHAM L.C. 1974 — Synthetic interferometer radar for topographic mapping. Proceedings of the IEEE, 62: 763–768.
- GRANICZNY M., KOWALSKI Z., JURECZKA J. & CZARNOGÓRSKA M. 2005 — TerraFirma Project — Monitoring of subsidence of Northeastern part of Upper Silesian Coal Basin. *Sp. Papers Polish Geological Institute*, 20: 59–63.
- GRANICZNY M., KOWALSKI Z., JURECZKA J. & CZARNOGÓRSKA M. 2006 — Practical Application of TerraFirma PS-InSAR in Poland, 1<sup>st</sup> Workshop of the EARSel SIG on Geological Hazards, 2 June 2006. EARSel and Institute of Geodesy and Cartography, Warsaw: 25–26.
- GRANICZNY M., KOWALSKI Z., JURECZKA J., CZARNOGÓRSKA M. & PIĄTKOWSKA A. 2008 — Preliminary interpretation of PSI data of the North Eastern part of the Upper Silesian Basin (Sosnowiec test site) TERRAFIRMA PROJECT. *Sp. Papers Polish Geological Institute*, 24: 29–35.
- HERBICH E. 1981 — Analiza tektoniczna sieci uskokowej Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. *Rocznik PTG*, 51: 383–434.
- IDZIAK F.I., TEPER L. & ZUBEREK W.M. 1999 — Sejsmiczność a tektonika Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. *Wyd. UŚ, Katowice*.
- JURECZKA J., DOPITA M., GAŁKA M., KRIEGER W., KWARCINSKI J. & MARTINEC P. 2005 — Atlas geologiczno-złożowy polskiej i czeskiej części Górnośląskiego Zagłębia Węglowego w skali 1 : 200 000. Państw. Inst. Geol.
- LASOCKI S. & IDZIAK A.F. 1998 — Dominant directions of epicentre distribution of regional mining induced seismicity series in Upper Silesia Coal Basin. *Pure Appl. Geophys.*, 153: 21–40.
- LIN Q., VESECKY J.F. & ZEBKER H.A. 1994 — Comparison of elevation derived from INSAR data with DEM over large relief terrain. *Intern. J. Remote Sensing*, 15: 1775–1790.
- PERSKI Z. 1999 — Osiadanie terenu GZW pod wpływem eksploatacji podziemnej określane za pomocą satelitarnej interferometrii radarowej (InSAR). *Prz. Geol.* 47: 171–174.
- PILECKA E. 2005 — Wstępna analiza związku wysokoenergetycznej sejsmiczności indukowanej z lineamentami na obszarze GZW. *Mat. Symp. Zagrożenia naturalne w górnictwie*: 1–10.
- PILECKA E. 2006 — Związek lineamentów z sejsmicznością indukowaną na terenach górniczych Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. IGSMiE PAN.
- STEC K. 2001 — Rozwój i wykorzystanie Górnośląskiej Regionalnej Sieci Sejsmologicznej. [In:] *Badania geofizyczne w kopalniach*. *Wyd. Sigmie PAN, Kraków*: 179–183.
- ZEBKER H.A. & GOLDSTEIN R.M. 1986 — Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations. *J. Geophysical Res.*, 91: 4993–4999.
- ŻABA J. 1995 — Uskokii przesuwce strefy krawędziowej bloków górnośląskiego i małopolskiego. *Prz. Geol.*, 10: 838–842.

Praca wpłynęła do redakcji 05.03.2008 r.

Po recenzji akceptowano do druku 28.07.2008 r.