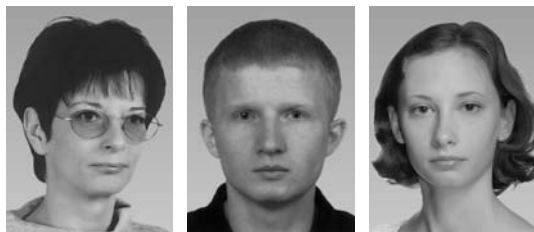


## Model przestrzenny struktury solnej Inowrocław a wizualizacja przemieszczeń powierzchni terenu zarejestrowanych na podstawie badań interferometrycznych

Anna Piątkowska<sup>1</sup>, Krzysztof Czuryłowicz<sup>1</sup>, Maria Przyłucka<sup>1</sup>



A. Piątkowska K. Czuryłowicz M. Przyłucka

**Application of the spatial model of the Inowrocław salt structure for clarification and visualization of surface movements registered by interferometric investigation.** *Prz. Geol.*, 62: 97–102.

*Abstract.* The Inowrocław salt dome can be considered one of the model structures in the Polish Lowlands. Salt structures formed as the result of halotectonic and halokinetic action. The Permian salt was squeezed upwards from deep geological levels due to the overburden load, using fractured zones and faults. The salt dome is presented as a dynamic three-dimensional geological model developed using advanced technology to create and visualize 3D spatial data. Thanks to the relationship between

the dynamics of the land surface and natural geological processes, the results and conclusions can be quickly drawn. For this purpose, average values of displacements in mm per year, obtained by Satellite Radar Interferometry – Persistent Scatterers (PS) for the time span 1992–2006, are presented in the form of interpolation, creating a surface of ground movement (subsidence and uplift) above the Inowrocław salt dome.

**Keywords:** salt dome, interferometry, spatial model

Złożone stosunki naprężeń górotworu, będące wynikiem długoletniej eksploatacji soli (na pierwsze historyczne wzmianki dotyczące wczesnośredniowiecznej warzelnicy soli natrafiono przy Kościele Imienia Najświętszej Maryi Panny w Inowrocławiu), powodują niewielkie ruchy powierzchni terenu nad wysadem solnym Inowrocław. Zależności są bardzo skomplikowane, zachodzi tu przenikanie się czynników naturalnych i indukowanych, mimo że działalność górniczą już zakończono. Do identyfikacji dynamiki ruchów terenu ponad wysadem solnym Inowrocław wykorzystano dane radarowe, co zostało opracowane przez Piątkowską i Surałę (2011) oraz Piątkowską i in. (2012). Celem tej pracy była wizualizacja zidentyfikowanych ruchów powierzchni wraz z trójwymiarowym modelem geologicznym. Dzięki temu możliwa była głębsza analiza powiązań między dynamiką ruchów terenu a budową geologiczną. Ponadto przestrzenna wizualizacja budowy geologicznej wysadu solnego Inowrocław w nawiązaniu do przestrzennie pokazanej dynamiki zmian powierzchni terenu może ułatwić wyjaśnienie przyczyn jej ruchliwości.

W technologii wizualizowania informacji uzyskanych metodą satelitarnej interferometrii radarowej (InSAR) zilustrowano mobilność powierzchni terenu bezpośrednio nad formą solną w Inowrocławiu z wykorzystaniem metodyki SAR (*Synthetic Aperture Radar*). W metodzie tej wykorzystuje się serię cyfrowych satelitarnych zobrażeń radarowych, wykonanych np. w technologii ERS-1 i ERS-2, i polega ona na obliczeniu różnic fazy odpowiadających sobie pikseli wybranych scen. Na podstawie dwóch zobrażeń SAR otrzymuje się tzw. interferogram, przedstawiający różnice fazy dla całego obszaru objętego zobrażeniem. Do badania niewielkich przemieszczeń zachodzących w określonym czasie stosuje się metody interferometryczne oparte na analizie tzw. rozpraszaczy stabilnych (*Persistent Scatterers*, w skrócie PS). Wynikiem przetworzenia jest

zbiór kilku–kilkudziesięciu tysięcy punktów, z których każdemu przypisana jest wartość prędkości ruchu w kierunku obrazowania satelity (prawie pionowym). Metoda okazała się bardzo przydatna w Polsce na terenach górniczych, tam, gdzie wydobywanie zostało zakończone, oraz tam, gdzie nadal jest prowadzona eksploatacja, na obszarze aglomeracji miejskich, jak również na terenach osuwiskowych. W Polsce prekursorskie działania dotyczące wykorzystania danych SAR i ukazujące się publikacje na ten temat zawdzięczamy m.in. Granicznemu i in. (2006, 2011), Leśniakowi i in. (2007), Leśniakowi i Porzyckiej (2009), Perskiemu i Mrozowi (2007), Perskiemu i in. (2008), Perskiemu (2010), Popiołkowi i in. (2002).

Rejon wysadu solnego Inowrocław jest obszarem pogórnym i metoda PS okazała się skuteczna do zilustrowania mobilności powierzchni terenu. Zinterpolowano ponad 2000 punktów PS zidentyfikowanych bezpośrednio nad wysadem solnym Inowrocław i na tej podstawie wyznaczono powierzchnię przedstawiającą pionowe ruchy terenu. Dzięki zastosowanej aplikacji multimedialnej wizualizacja przestrzenna uproszczonego schematu budowy geologicznej wysadu solnego pokazuje wprost zależności między powierzchnią zinterpolowanych wartości prędkości ruchu PS a budową geologiczną.

Multimedialne wymodelowanie powierzchni przemieszczeń nad strukturą solną przy użyciu automatycznie generowanych przekrojów geologicznych i wartości przemieszczeń terenu umożliwia ustalanie zależności dynamiki zmian powierzchni terenu od litologii, tektoniki, morfotektoniki, wód podziemnych itp.

Przetworzenia interferometryczne pozyskano w ramach badań statutowych Państwowego Instytutu Geologicznego – Państwowego Instytutu Badawczego i w większej części wykonał je Zbigniew Perski (Piątkowska & Surała, 2011; Piątkowska i in., 2012).

<sup>1</sup> Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa; annapiatkowska@poczta.onet.eu, krzysztof.czurylowicz@pgi.gov.pl, maria.przylucka@pgi.gov.pl

Do konstrukcji modelu przestrzennego wysadu solnego Inowrocław, na podstawie danych przetworzonych uprzednio do formatu GIS, wykorzystano aplikację Paradigm GOCAD. Wizualizację efektu końcowego prac badawczych wykonano za pomocą programu Geo3D. Program ten jest udostępniony w serwisie internetowym Geowizualizacja 3D ([www.geo3d.us.edu.pl](http://www.geo3d.us.edu.pl)), poświęconym interaktywnej wielowymiarowej kartografii geologicznej.

Interaktywny model przestrzenny wysadu solnego Inowrocław jest dostępny pod internetowym adresem: <http://www.pgi.gov.pl/pl/geologia-3d/projekty/4717-inowrocaw-3d.html>, skąd można go pobrać wraz z przeglądarką Geo3D w celu wizualizacji na własnym komputerze.

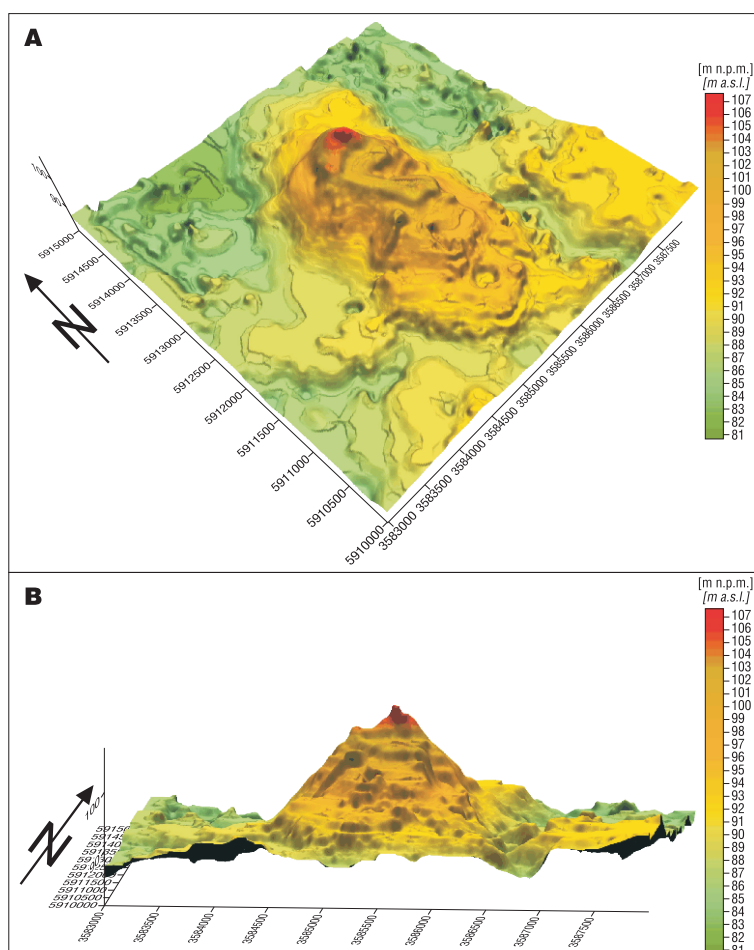
### OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA FORMY SOLNEJ

Formy solne to struktury tektoniczne rządzące się prawami halotektoniki i halokinetyki. Genetycznie są związane ze strefami tektonicznymi, gdzie w wyniku procesów kinematycznych kompleksów solnych formują się z nich najpierw poduszki solne (*pillows*), a następnie diapiry (*diapirs*), słupy solne lub grzbiecienie (*post diapirs*; Seni & Jackson, 1983; Alsop i in., 1996). Komplikacja poszczególnych form solnych jest zależna od budowy geologicznej otoczenia i lokalnych układów naprężeń panujących w górotworze od momentu uformowania poduszki solnej do stadium słupa solnego.

Wybrany jako przykład formy solnej wysad Inowrocław w rzucie poziomym przypomina kształtem elipsę o przebiegu dłuższej osi N-S, co jest wyraźnie widoczne w morfologii terenu (ryc. 1A, B). Struktura solna Inowrocławia jest wtapowana w systema uskoku regionalnych o przebiegu N-S, które nie są zgodne z generalnym kierunkiem osi antyklinorium środkowopolskiego (Dadlez, 1980, 2001; Dadlez & Marek, 1974; Piątkowska, 1989, 2003, 2006; Dadlez i in., 2000). Dyslokacje tektoniczne i mikrotektoniczne, ciągle i nieciągle, osie fałdów i mikrofałdów stwierdzone w strukturze wewnętrznej wysadu solnego powtarzają kierunki obu stref tektonicznych – NW-SE (atyklinorium) oraz N-S (systemu uskoku ograniczających strukturę solną; Tatka & Jałocha, 1983; Tarka, 1992; Hus i in., 1996). Z przeprowadzonych badań grawimetrycznych wynika, że północno-zachodnia ściana wysadu ma formę progów. Od strony północnej ściany wysadu są łagodniejsze i ich spadek wynosi ok. 45°, natomiast od wschodu i zachodu ściany są prawie pionowe.

Kopuła wysadu solnego Inowrocław znajduje się bezpośrednio pod zabudowaniami miasta, a jej geometryczny środek jest zlokalizowany pod rynkiem i jednocześnie stanowi najwyższy punkt miasta (ryc. 1A, B). Eksploatacja soli na tym obszarze ma długą historię – od 1875 r. z przerwami do 1991 r. Ponadstuletnia działalność wydobywcza na wysadowym złożu soli Inowrocław spowodowała zmianę naturalnych naprężeń panujących w górotworze i zaburzenie stosunków wodnych.

Strop wysadu solnego pokrywa czapa gipsowo-anhydrytowo-iłowa, powyżej której występuje stosunkowo cienka warstwa osadów czwartorzędowych o miąższości malejącej



Ryc. 1. Model powierzchni terenu nad wysadem solnym Inowrocław (przewyższony 15-krotnie) przedstawiający wpływ wysadu na morfologię. **A** – widok z góry, **B** – perspektywa z południa (widok krótszej osi wysadu)

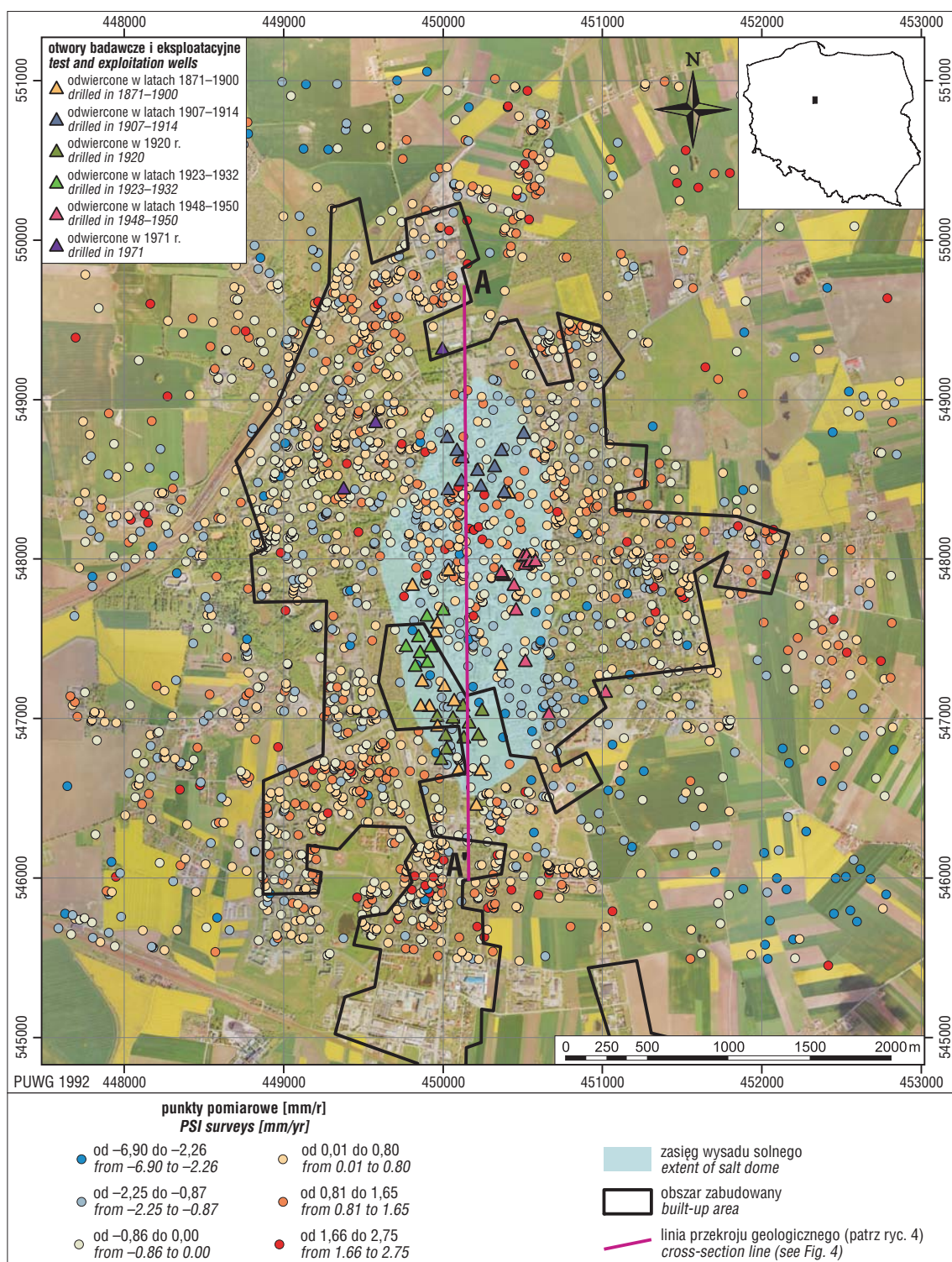
Fig. 1. Terrain model of the area above the Inowrocław salt dome (exaggerated 15 times), which illustrates influence of the salt dome on the morphology. **A** – top view, **B** – view from the south (short-axis view of dome)

z południa (od 45 m) ku północy (miejscami nawet do 5 m; Hus i in., 1996; Brzeziński, 2009). W „kieszeni” tektoniczno-erozyjnej w stropie czapy gipsowej zachowały się ilaste osady triasu (z fragmentami czerwonych piaskowców). Od północy i od wschodu wysad otacza kompleks margli, wapieni i dolomitów środkowej i górnej jury. Od zachodu przeważają piaski i słabo zdiagenezowane piaskowce dolnej jury, często zawodnione. Kredowe osady margliste zalegają bezpośrednio na osadach jury i w części północnej znajdują się w pewnej odległości od wysadu.

Kompleks soli cechsztyńskich i eksploatowane do 1991 r. poziomy serii solnej są silnie pofałdowane, a osie fałdów mają głównie kierunek NW-SE. Wiercenia wykonano do głębokości 3026 m i nie stwierdzono innych osadów poza kompleksami solnymi. Kompleks cechsztyński sięga prawdopodobnie do ok. 6000 m i z tej głębokości zostały wyniesione poziomy solne, które obserwowano w wyrobiskach kopalni w pozycji prawie pionowej (Hus i in., 1996; Marek & Pajchłowa, 1997).

### METODYKA OPRACOWANIA MODELU

Opracowany model stanowi przestrzenną wizualizację koncepcji budowy geologicznej wysadu solnego Inowrocław i jego pobliskiego otoczenia ujętej w postaci klasycznych wydziałów kartograficznych, wyznaczonych głównie



**Ryc. 2.** Rozkład punktów PS na tle obrysu wysadu solnego Inowrocław. Punkty są zaznaczone w skali barwnej w zależności od wartości prędkości ich ruchu w milimetrach na rok

**Fig. 2.** Distribution of the PSI points against the salt dome outline. Points are shown on a scale of colour values depending on the velocity of movement in millimetres per year

na podstawie dokumentacji geologiczno-złożowej (Tatka & Jałocha, 1983). Wyboru powierzchni stanowiących osnowę strukturalną modelu dokonano, opierając się na zgromadzonych materiałach dotyczących regionalnego rozwoju budowy geologicznej. Wyróżniono powierzchnie stropowe czapy gipsowej, zwierciadła solnego, utworów triasu i jury oraz powierzchnie niezgodności spągu paleogenu, neogenu i czwartorzęd. Każdą z powierzchni konstruowano niezależnie, jednak podczas opracowywania modelu bry-

łowego reguły narzucone poprzez charakter wymienionych wcześniej powierzchni i ich pozycję stratygraficzną pozwoliły na stworzenie spójnego pod względem geologicznym modelu 3D. Podstawę konstrukcji powierzchni stanowiły uprzednio opracowane mapy izoliniowe, linie interpretacyjne z przekrojów geologicznych i hydrogeologicznych oraz profile stratygraficzne otworów badawczych. Jednocześnie, aby zachować pełną spójność z danymi zawartymi w dokumentacji, posłużono się mapami miąższości

kompleksów stratygraficznych. Przestrzenny rozkład miąższości wykorzystano jako ograniczenie narzucające minimalną jej wartość na obszarach o niedostatecznym pokryciu danymi, co uniemożliwiło wzajemne przecięcia powierzchni stratygraficznych.

Aby przedstawić powierzchnię zinterpolowanych wartości prędkości ruchu PS (w milimetrach na rok), wykorzystano wyniki przetworzeń wybranych radarowych scen satelitarnych ERS i Envisat (ryc. 2).

## OPROGRAMOWANIE

Wstępne przygotowanie, obejmujące georeferencję podkładów rastrowych, cyfrowanie niezbędnych warstw informacyjnych oraz uzupełnianie ich bazy danych, wykonano w aplikacjach ArcGIS i QGIS. Tak opracowane dane wykorzystano do konstrukcji statycznego modelu geologicznego w aplikacji Paradigm GOCAD. Zastosowane oprogramowanie jest wyjątkowo skuteczne przy opracowywaniu skomplikowanych struktur tektonicznych, takich jak wysady solne, dzięki wykorzystaniu algorytmu DSI, który pozwala na dowiązanie wielu wartości zmiennej wysokości/głębokości dla tej samej pary współrzędnych płaskich X, Y.

Do szybkiego przeglądania wykonanego modelu służy aplikacja Geo3D. Autorzy artykułu uzyskali zgodę na wykorzystanie jej do zaprezentowania wyników swoich prac.

## MOŻLIWOŚCI PREZENTACJI DANYCH

Model wysadu solnego Inowrocław opracowano, aby wskazać wzajemne zależności między wglębną budową geologiczną, morfologią terenu i przestrzenną zmiennością średnich prędkości przemieszczeń PS. W tym celu zestawiono wzduż arbitralnie wybranych linii przekrojów geologicznych wyniki wspomnianych wcześniej obserwacji. Aby ułatwić lokalizację przestrzenną, przygotowano warstwy sieci głównych dróg. Ze względu na magnitudę pomiarów PS, jak również deniwelację terenu uchwycenie ogólnych zależności między morfologią terenu a osiadaniem w kontekście budowy geologicznej było możliwe jedynie dzięki zastosowaniu pionowego przewyższenia.

Przygotowana i przetworzona odpowiednio na wartości dodatnie i ujemne powierzchnia PS ułatwia wychwycenie związków przemieszczeń pionowych terenu z budową geologiczną. Przy użyciu aplikacji Geo3D można wizualizować przestrzenne rozmieszczenie kompleksów geologicznych i ich litologii oraz wartości przemieszczeń zarejestrowanych na powierzchni. Dodatkowo obszary o ujemnych wartościach PS i ich związek z dużą miąższością czwartorzędu w stosunku do pozostałego terenu (PS-; *thick Q*) można wyświetlić w dowolnym zestawieniu informacji geologicznej (ryc. 3). Wyraźne podwyższenie wartości PS można zauważyć w zasięgu zdiagnozowanych wapieni triasu (PS+; zasięg triasu).

W celu uwypuklenia zależności między morfologią terenu a zarysem całej formy wysadu solnego powierzchnię terenu przewyższono 15-krotnie.

Podczas opracowywania modelu napotkano liczne trudności wynikające z niedociągnięć przy przygotowywaniu podkładów topograficznych do map dokumentacyjnych i nanoszeniu linii przekrojów geologicznych. Po rektyfikacji podkładów rastrowych, a następnie przekrojów geologicznych w aplikacji Paradigm GOCAD widoczne były niedociągnięcia intersekcyjne i niezgodności miąższości

jednostek stratygraficznych na przecięciach powierzchni przekrojów.

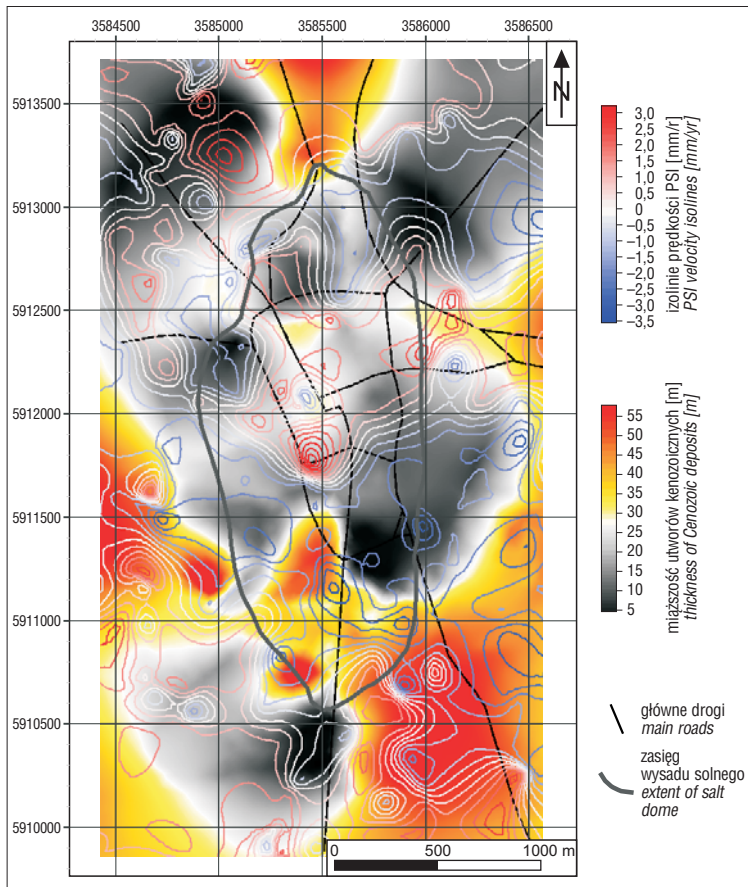
Na etapie interpretacji głównym problemem, a jednocześnie ograniczeniem, była zupełnie odmienna skala obserwacji powierzchniowych (pomiaru PS i morfologia terenu) i przestrzennego modelu wglębnej budowy geologicznej wysadu Inowrocław i jego otoczenia. Z uwagi na to, że niepewność geologiczna jest wynikiem jedynie niekompletnej wiedzy badacza o zjawisku objętym analizą, obserwacje autorów podano w formie ogólnych trendów.

## DANE INTERFEROMETRYCZNE

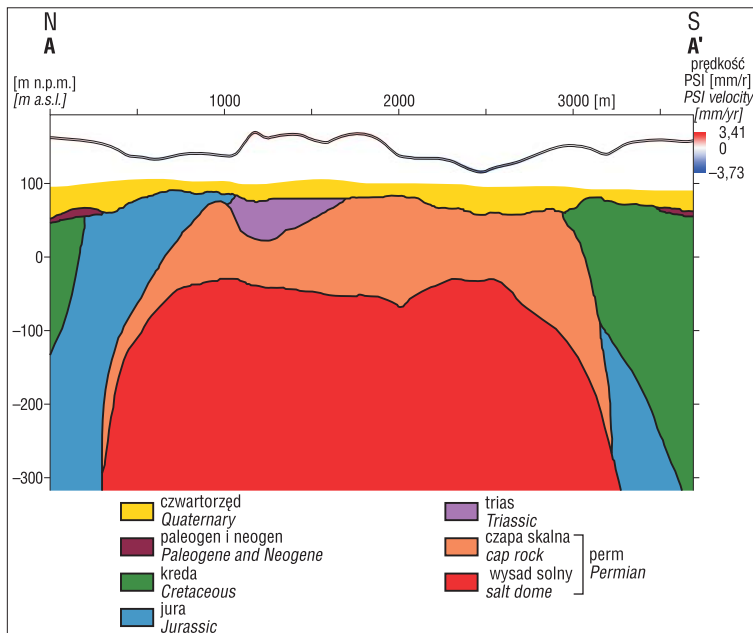
Do analizy niewielkich przemieszczeń gruntu występujących na terenie wysadu solnego Inowrocław wykorzystano wspomnianą wcześniej technikę interferometrii radarowej stabilnych rozpraszaczy.

Satelitarna interferometria radarowa jest techniką przetwarzania obrazów zarejestrowanych w technologii SAR pozwalającą na pomiar deformacji gruntu. Polega ona na tworzeniu interferogramów, będących złożeniem obrazów tego samego obszaru wykonanych w różnym czasie. Poprzez obliczenie różnicy fazy odbitej fali między odpowiadającymi sobie pikselami dwóch obrazów następuje identyfikacja wielkości deformacji, jaka zaszła na badanym terenie w czasie pomiędzy rejestracją tych obrazów. Pomiar deformacji gruntu na interferogramach różnicowych jest obarczony błędami, a dokładność jest ograniczona ze względu na wpływ atmosfery, błędy wyznaczenia orbit i charakter zmian zaistniałych w środowisku (np. zmiana roślinności). Niemniej jednak jest to technika powszechnie wykorzystywana do pomiarów deformacji gruntu, szczególnie tam, gdzie prędkość zmian jest dość duża, np. na obszarach wydobywania węgla lub miedzi (m.in. Popiołek i in., 2002; Krawczyk i in., 2007; Perski, 2010; Yue i in., 2011) lub dużych deformacji tektonicznych związanych z silnymi trzęsieniami ziemi (Perski & Hanssen, 2005).

Do identyfikacji niewielkich przemieszczeń gruntu (kilkumilimetrowych w skali rocznej) bardziej adekwatna jest metoda stabilnych rozpraszaczy (*Persistent Scatterers Interferometry*, PSI), będąca rozszerzeniem metody InSAR (Perski & Mróz, 2007; Perski, 2010). Do pomiaru małych, zachodzących w długim czasie przemieszczeń gruntu wykorzystuje się zbiór kilkunastu–kilkudziesięciu obrazów radarowych tego samego obszaru wykonanych na przestrzeni wielu lat. Stabilne rozpraszacze są obiektami charakteryzującymi się stałością fazy i amplitudy odbitej fali radarowej, takimi jak wychodnie skał, mosty, słupy, tory kolejowe, dachy budynków itp. W wyniku przetworzenia zbioru scen satelitarnych otrzymuje się zbiór (kilkadziesiąt–kilkaset tysięcy) punktów PS, z których każdy ma przypisaną wartość prędkości przemieszczenia w kierunku obrazowania satelity (*line of sight*, LOS) podaną w milimetrach na rok. Prędkość ta jest wartością względną, obliczoną na podstawie kilku punktów referencyjnych, dla których zakłada się brak deformacji. Punkty są rozmieszczone w zależności od pokrycia terenu – najczęściej punktów identyfikuje się na obszarach zurbanizowanych, najmniej na obszarach pokrytych wyłącznie roślinnością. Oprócz wartości prędkości przemieszczenia każdemu punktowi przypisano informację o względnych przemieszczeniach zarejestrowanych dla poszczególnych scen w stosunku do sceny referencyjnej. Dzięki temu możliwe jest stworzenie wykresu ilustrującego tendencję zmiany ruchu danego punktu w czasie, tzw. szeregu czasowego (*time series*). Metoda ta pozwala



**Ryc. 3.** Wizualizacja zależności między prędkością ruchów pionowych powierzchni terenu nad wysadem solnym Inowrocław a miąższością utworów kenozoicznych  
**Fig. 3.** Visualization of the relationship between the velocity of vertical movement of the ground level above the Inowrocław salt dome and the thickness of Cenozoic deposits



**Ryc. 4.** Przekrój geologiczny przez wysad solny Inowrocław wzdłuż dłuższej osi (N-S) i liniowy wykres trendów wynoszenia i osiadania (w milimetrach na rok) dla uśrednionych wartości w latach 1992–2006 (przekrój wykonany przy użyciu opcjonalnej funkcji w aplikacji Paradigm GOCAD)  
**Fig. 4.** Geological cross-section through the Inowrocław salt dome along the long axis (N-S) and the plot of linear trends of uplift and subsidence (in millimeters per year) for the average values in 1992–2006 (based on the optional feature in the Paradigm GOCAD application)

na pomiar przemieszczeń nie większych niż kilkanaście centymetrów na rok, co jest związane z długością propagowanej fali. Mimo to dokładność wyznaczonych prędkości jest bardzo duża – 0,1 mm/r (Graniczny i in., 2006; Perski & Mróz, 2007; Graniczny i in., 2011; Kühn, 2011; Refice i in., 2011).

W opisywanych badaniach posłużono się wynikami przetworzenia satelitarnych scen radarowych z europejskich satelitów ERS-1 i ERS-2 oraz dodatkowo Envisat. Wykorzystano naukowe oprogramowanie StaMPS (Hooper, 2008). Przetworzenie obejmowało 30 obrazów z lat 1992–2006 z obszaru  $40 \times 40$  km rozciągającego się pomiędzy Gniewkowem a Mogilnem. Uzyskano 31 773 punktów PS, dla których wielkości prędkości przemieszczenia wahają się między  $-11,6$  mm/r a  $19,0$  mm/r, przy czym prędkości przemieszczenia 90% punktów mieszczą się w przedziale od  $-5$  mm/r do  $5$  mm/r.

Do porównania z przestrzennym modelem wysadu solnego Inowrocław wykorzystano tylko część punktów PS zlokalizowanych na badanym obszarze. Podzbiór ten zawiera 2161 punktów z prędkościami przemieszczenia od  $-6,9$  mm/r do  $2,75$  mm/r (ryc. 2). W celu ułatwienia interpretacji deformacji gruntu zachodzących na obszarze wysadu solnego wykonano interpolację punktów PS, tworząc w ten sposób powierzchnię odzwierciedlającą prędkości zachodzących zmian, dla której każdemu pikselowi przypisano wartość prędkości przemieszczenia w milimetrach na rok. Interpolację wykonano metodą *Natural Neighbor* z wykorzystaniem oprogramowania ArcGIS.

## WNIOSKI

Dzięki wizualizacji przestrzennej modelu formy solnej można uzyskać szybką odpowiedź na pytanie, czy istnieje związek między budową geologiczną, litologiczną i tektoniczną formy a mobilnością powierzchni terenu. Powierzchnia interpolacyjna przemieszczeń powierzchni terenu nad wysadem solnym Inowrocław wyznaczona na podstawie wyników badań interferometrycznych prowadzonych w latach 1992–2006 wskazuje na następujące cechy przemieszczeń:

1. Morfologia powierzchni terenu nad wysadem solnym przedstawiona w cięciu poziomowym co 1 m (ryc. 1) sugeruje, że w północnej części nastąpiło podwyższenie powierzchni terenu, a w południowej – obniżenie. W północnej części badanego obszaru znajduje się wzniesienie z najwyższym punktem morfologicznym. Fakt zgodności ukształtowania powierzchni stropowej wysadu z morfologią powierzchni terenu świadczy o współczesnej ruchliwości formy solnej.

2. Analiza wartości ruchu zarejestrowanego na powierzchni terenu (ryc. 2, 3) za pomocą punktów PS pozwala stwierdzić, że północna część wysadu solnego wykazuje tendencję do wynoszenia (por. przykładową krzywą na ryc. 4), natomiast w południowej części zarejestrowano wyraźną tendencję do obniżania.

3. Na podstawie korelacji między wykształceniem litologicznym a wynikami modelowania odnotowano tendencję do wynoszenia w strefach, w których występują osady ilaste triasu (ryc. 4). Prawdopodobnie jest to związane z dynamiką wód gruntowych i reakcją na zawodnienie skał ilastych.

4. Obszary, na których eksploatację górnictwem prowadzono do końca XIX w., wykazują tendencję do wynoszenia, pozostałe zaś, gdzie sól eksploatowano do końca XX w., przemienne ruch pulsacyjny z tendencją do osiadania (ryc. 2).

Opisany w artykule model wysadu solnego Inowrocław jest modelem uproszczonym, wykonanym w celu pogłównego przedstawienia zależności ruchu powierzchni terenu bezpośrednio nad wysadem solnym od budowy geologicznej. Przestrzenne zobrazowanie wewnętrznych struktur fałdowych poziomów solonośnych oraz stworzenie modelu całego wysadu, aż do jego podstawy, będzie celem przyszłych prac nad uszczegółowieniem powstałego modelu wysadu.

Następnym etapem prac będzie ustalenie zależności między mobilnością terenu w szerszym otoczeniu wysadu a regionalnymi strukturami tektonicznymi. Wstępne analizy map tektonicznych i strukturalnych wykazały bowiem istotne związki wyników badań PS np. z wynoszeniem terenu w rejonie antykliny Barcina na skutek odprężenia mas skalnych.

Autorzy dziękują recenzentom za cenne uwagi i komentarze. Autorzy dziękują również twórcom programu Geo3D, Zbigniewowi Małolepszemu i Krzysztofowi Wróblowi z Katedry Geologii Podstawowej Wydziału Nauk o Ziemi Uniwersytetu Śląskiego w Sosnowcu, za możliwość wykorzystania aplikacji do prezentacji wyników badań, które ułatwiają zrozumienie problemu ruchów powierzchni terenu. Program został stworzony w ramach finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego tematu badawczego nr 4 T12B 046 27 pt. „Interaktywny system wielowymiarowej wizualizacji wgłębnych danych i struktur geologicznych”, realizowanego w latach 2004–2007.

## LITERATURA

- ALSOP G.I., BLUNDELL D. & DAVISON I. (red.) 1996 – Salt tectonics. Geol. Soc. London Spec. Publ., 100: 120–128.
- BRZEZIŃSKI M. 2009 – Objasnienia do Szczegółowej mapy geologicznej Polski 1 : 50 000, ark. Inowrocław. Narod. Arch. Geol. PIG-PIB.
- DADLEZ R. (red.) 1980 – Mapa tektoniczna cechsztyńsko-mezozoicznego kompleksu strukturalnego na Niżu Polskim 1 : 500 000. Wyd. Geol., Warszawa.
- DADLEZ R. 2001 – Przekroje geologiczne przez bruzdę śródpolską w skali 1 : 200 000. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- DADLEZ R. & MAREK S. 1974 – Niż Polski. [W:] Pożaryski W. (red.) Budowa geologiczna Polski. Tektonika. PIG Warszawa, s. 478.
- DADLEZ R., MAREK S. & POKORSKI J. 2000 – Mapa geologiczna Polski bez utworów kenozoiku 1 : 1 000 000. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- GRANICZNY M., BOVENGA F., KOWALSKI Z., PERSKI Z., PIĄTKOWSKA A., SURAŁA M., UŚCINOWICZ S., WASOWSKI J. & ZDANOWSKI A. 2011 – Problematyka wykorzystania interferometrii satelitarnej w badaniach geologicznych. Biul. Państw. Inst. Geol., 446 (1): 53–64.
- GRANICZNY M., KOWALSKI Z., JURECZKA J. & CZARNOGÓRSKA M. 2006 – TerraFirma Project – monitoring of subsidence of the northeastern part of the Upper Silesian Coal Basin. [W:] Proceedings of the conference „Mass movement hazard in various environments”, October 20–21, 2005, Kraków, Poland. Pol. Geol. Inst. Spec. Pap., 20: 59–63.
- HOOPER A. 2008 – A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches. Geophys. Res. Lett., 35: L16302, s. 5 [doi:10.1029/2008GL034654].
- HUS M., JABŁOŃSKI S., JASIŃSKI Z. & LEPIARZ J. 1996 – Działalność górnictwa na złożu „Inowrocław” w latach 1871–1995. Inowrocław: 24–38 [materiały archiwalne Kopalni Solino].
- KRAWCZYK A., PERSKI Z. & HANSEN R. 2007 – Application of ASAR interferometry for motorway deformation monitoring. [W:] Lacoste H. & Ouwehand L. (red.) Proceedings of Envisat Symposium 2007, Montreux, Switzerland, April 23–27, 2007. ESA Communication Production Office, ESTEC, Noordwijk, s. 4.
- KÜHN F. 2011 – Ground motion detection using persistent scatterer interferometry – Berlin case study. TerraFirma User Workshop, Essen, March 22, 2011.
- LEŚNIAK A. & PORZYCKA S. 2009 – Impact of tectonics on ground deformations caused by mining activity in the north-eastern part of the Upper Silesian Coal Basin. Gosp. Sur. Min., 25: 227–238.
- LEŚNIAK A., PORZYCKA S. & GRANICZNY M. 2007 – Detekcja długookresowych pionowych przemieszczeń gruntu na obszarze terenów górnictwa kopalni Zagłębia Dąbrowskiego z zastosowaniem technologii PSInSAR. [W:] Warsztaty Górnicze 2007 z cyklu „Zagrożenia naturalne w górnictwie”, Ślesin k. Konina, 4–6 czerwca 2007. WUG, Katowice: 283–295.
- MAREK S. & PAJCHŁOWA M. (red.) 1997 – Epikontynentalny perm i mezozoik w Polsce. Pr. Państw. Inst. Geol., 153: 6–9, 410–415.
- PERSKI Z. 2010 – Kompleksowa analiza interferogramów. [W:] Zubecek W.M. & Jochemczyk K. (red.) Geneza i charakterystyka zagrożenia sejsmicznego w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym. Wyd. UŚ, Katowice: 41–45.
- PERSKI Z. & HANSEN R. 2005 – The interpretation of Bam Fault kinematics using Envisat SAR interferometric data. [W:] Proceedings of FRINGE05 Workshop, ESA ESRIN, Frascati, Italy, 28 November–2 December 2005 [CD-ROM], s. 6.
- PERSKI Z., KRAWCZYK A. & MARINKOVIC P. 2008 – Satelitarna interferometria radarowa (InSAR) wysokiej rozdzielczości z wykorzystaniem danych TerraSAR-X. Arch. Fotogram. Kartogr. Teledet., 18a: 499–508.
- PERSKI Z. & MRÓZ M. 2007 – Zastosowanie metod interferometrii radarowej InSAR do badania naturalnych ruchów powierzchni terenu w Polsce. Projekt Geo-In-SAR. Arch. Fotogram. Kartogr. Teledet., 17b: 613–624.
- PIĄTKOWSKA A. 1989 – Analiza fotogeologiczna rejonu Kujaw. Narod. Arch. PIG-PIB, Warszawa, s. 30.
- PIĄTKOWSKA A. 2003 – Cechsztyńsko-mezozoiczny kompleks strukturalny Kujaw w świetle cyfrowej analizy danych teledetekcyjnych. Instr. Met. Bad. Geol., 57: 1–59.
- PIĄTKOWSKA A. 2006 – Remote Sensing methods for morphotectonic analysis of salt structures. [W:] Abstracts, 1<sup>st</sup> MELA Conference „Living morphotectonics of the European Lowland”, August 28–30, 2006, Cedynia, Poland. Pol. Geol. Inst., Szczecin, s. 50.
- PIĄTKOWSKA A. & SURAŁA M. 2011 – Application of SAR interferometric methods to identify the mobility of the area above salt diapir in Inowrocław City, Kujawy region (Poland). [W:] Fringe 2011 Workshop – Advances in the Science and Applications of SAR Interferometry and Sentinel-1 Preparatory Workshop, Abstract Book, 19–23 September 2011, ESA-ESRIN, Frascati (Rome), Italy: 217–218.
- PIĄTKOWSKA A., SURAŁA M., PERSKI Z. & GRANICZNY M. 2012 – Application of the SAR interferometric methods to identify the mobility of the area above the salt diapir in Inowrocław and the regional salt structures in central Poland. Geol. Geophys. Env., 38: 209–220.
- POPIOŁEK E., HEJMANOWSKI R., KRAWCZYK A. & PERSKI Z. 2002 – Application of Satellite Radar Interferometry to the examination of the areas of mining exploitation. Surf. Min. Braunkohle Other Miner., 54 (1): 74–82.
- REFICE A., BOVENGA F., PASQUARIELLO G., DENORA D., FIDELIBUS D. & SPILOTRO G. 2011 – Bulging of the salt dome of Lesina Marina (Gargano, Southern Italy) revealed by DInSAR techniques. Geophys. Res. Abs., 13: EGU2011-7954.
- SENI S.J. & JACKSON M.P.A. 1983 – Evolution of salt structures, East Texas Diapir Province, Part 1, Sedimentary record of halokinesis. AAPG Bull., 67 (8): 1219–1244.
- TARKA R. 1992 – Tektonika wybranych złóż soli w Polsce na podstawie badań mezostrukturalnych. Pr. Państw. Inst. Geol., 137: 1–47.
- TATKA E. & JAŁOCHA L. 1983 – Dokumentacja geologiczna złoża soli kamiennej „Inowrocław” w kategorii A+B+C1+C2, woj. bydgoskie. Ośr. Bad.-Rozw. Sur. Chem., Kraków [dokumentacja archiwalna].
- YUE H., LIU G., PERSKI Z. & GUO H. 2011 – Satellite radar reveals land subsidence over coal mines. SPIE Newsroom, s. 3 [doi:10.1117/2.1201110.003898].  
www.model3d.pgi.gov.pl.

Praca wpłynęła do redakcji 8.10.2012 r.  
Akceptowano do druku 10.10.2013 r.