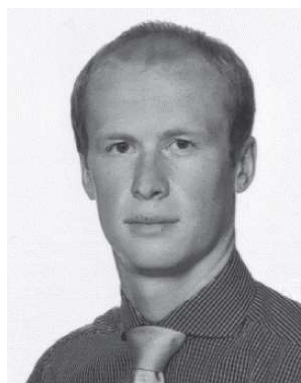


Ruchy powierzchni terenu w rejonie pól geotermalnych obserwowane z zastosowaniem Satelitarnej Interferometrii Radarowej

Land surface displacement in the area of geothermal fields observed by Satellite Radar Interferometry



Mgr inż. Magdalena A. Łukosz^{)}*



Dr inż. Wojciech T. Witkowski^{)}*



Mgr inż. Anna Lisowska^{)}*



Dr hab. inż. Agnieszka A. Malinowska^{)}*

Treść: W związku ze zmieniającą się polityką energetyczną w Europie, coraz częściej poszukiwane są odnawialne źródła energii. Jednym z nich jest geotermia, której zasoby zlokalizowane są również na znacznym obszarze Polski. W artykule przedstawiono wyniki badań dotyczące ruchów powierzchni terenu w rejonie dwóch poligonów badawczych zlokalizowanych w Meksyku (Cerro Prieto) oraz Niemczech (Bawaria). Do określenia wartości przemieszczeń zastosowano metodę interferometrii różnicowej DInSAR. Prezentowane wyniki dowodzą, że satelitarna interferometria radarowa pozwala na monitorowanie przemieszczeń powierzchni terenu generowanych podczas pozyskiwania energii geotermalnej, szczególnie w rejonach pól wysokotemperaturowych.

Abstract: As the energy policy in Europe changes, renewable sources of energy are sought. One of them is geothermal energy and its resources are located in a large area of Poland as well. In this article, an estimation of ground surface displacement is presented. The research was carried out for two areas located in Mexico (Cerro Prieto) and Germany (Bavaria). To assess displacement values, differential interferometry DInSAR was applied. The presented results prove that radar interferometry allows the observation of ground surface displacement caused by the extraction of geothermal resources, especially in areas of high-temperature geothermal fields.

Słowa kluczowe:

DInSAR, geotermia, kompaktacja, osiadania, Sentinel-1

Keywords:

DInSAR, geothermal, compaction, subsidence, Sentinel-1

^{*)} AGH, Akademia Górniczo-Hutnicza, WGGiŚ

1. Wprowadzenie

Zwiększająca się liczba ludności na świecie, a także ciągły rozwój technologiczny powodują wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną i ciepłą. Dotychczas ich głównym źródłem były nieodnawialne źródła energii, takie jak węgiel kamienny czy gaz ziemny. Wraz ze wzrostem świadomości ekologicznej wśród ludności i stopniowym wyczerpywaniem się złóż, coraz częściej stosuje się jednak pozyskiwanie energii ze źródeł odnawialnych, w tym wiatru, słońca czy wody. Jednym z nich jest również energia geotermalna, która wykorzystuje bardzo wysokie temperatury wód i pary gromadzących się we wnętrzu Ziemi. Proces pozyskiwania energii cieplnej, a nawet elektrycznej z geotermii może jednak nieść ze sobą zagrożenia, w tym ryzyko występowania przemieszczeń terenu w okolicach wydobywania zasobów (Keiding i in. 2010, Li in. 2016). W artykule skupiono się na badaniu skali ruchów powierzchni terenu towarzyszących eksploatacji pól geotermalnych. W tym celu zastosowano metodę interferometrii różnicowej DInSAR, wykorzystując satelitarne zobrazowania radarowe pochodzące z misji Sentinel-1.

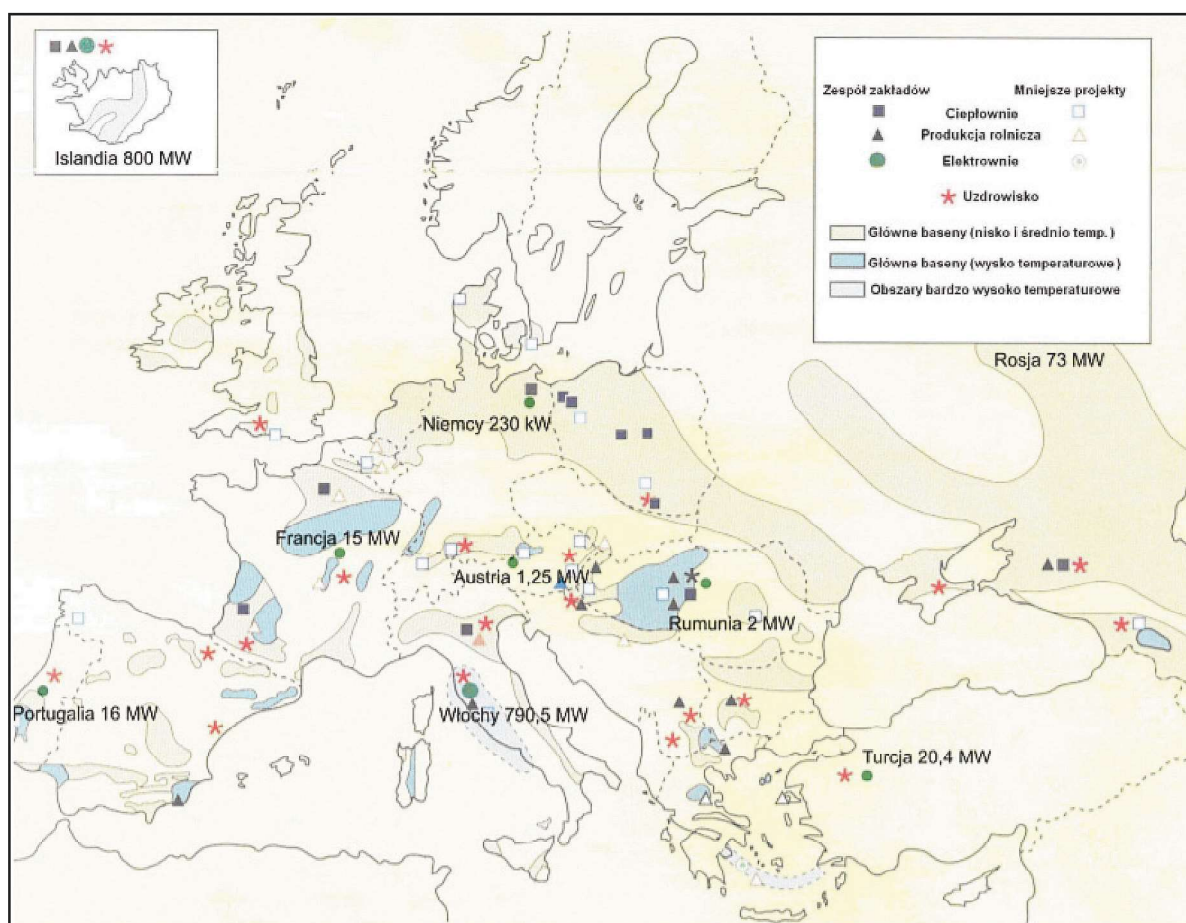
2. Energia geotermalna

2.1. Potencjał geotermalny źródeł energii w wybranych rejonach świata

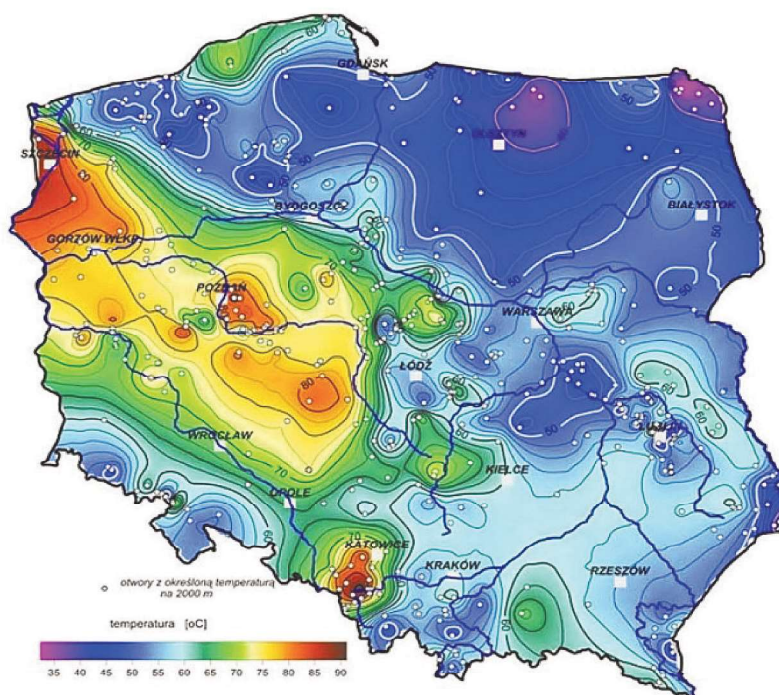
Geotermia klasyfikowana jest jako jeden z rodzajów odnawialnych źródeł pozyskiwania energii. Pochodzi z gorących

skał, wody oraz pary, które ogrzewają się pod powierzchnią terenu poprzez ciepło Ziemi. Złoża o wysokich temperaturach zlokalizowane są na sporych głębokościach, natomiast ich zasoby są niewyczerpywalne przy odpowiednim zarządzaniu wydobyciem (Górecki 2010). Obecnie energia geotermalna wykorzystywana jest już w kilkudziesięciu krajach świata, a ponad 20 z nich przetwarza ją na energię elektryczną. W pozyskiwaniu energii w ten sposób dominują takie kraje jak Salwador, Kostaryka, Filipiny, Kenia czy też Islandia. Również w Europie występują potwierdzone badaniami zasoby geotermalne (rys. 1). Złoża znajdują się w różnych rejonach kontynentu, natomiast przeważają baseny nisko oraz średniotemperaturowe. Największą i najstarszą elektrownią geotermalną w Europie jest Lardarello we Włoszech, gdzie występują złoża o bardzo wysokich temperaturach, natomiast swoje elektrownie mają również takie kraje jak Turcja, Portugalia czy Niemcy, w których wykorzystywane są zasoby o stosunkowo niskich temperaturach (Kepińska 2016). Wiele europejskich krajów ma możliwość wsparcia swojego przemysłu energetycznego za pomocą geotermii.

Polska w 80% położona jest na polach geotermalnych (rys. 2) (Sala 2018). Tym samym ten sposób pozyskiwania energii może okazać się dobrym uzupełnieniem na rynku energetycznym zważywszy na proponowany kierunek zmian w energetyce opartej na węglu kamiennym. W rejonie dwóch niecek: szczecińskiej oraz mogileńsko-lódzkiej, zlokalizowane są zasoby geotermalne, które mogłyby posłużyć w przyszłości do stworzenia elektrowni lub elektrociepłowni (Sowizdział 2016). Jednak duża część pól geotermalnych zlokalizowanych na terenie Polski posiada niską temperaturę.



Rys. 1. Mapa zasobów geotermalnych oraz istniejących ciepłowni i elektrowni geotermalnych w Europie (Zimny 2010)
Fig. 1. Map of geothermal resources and existing heating plants and geothermal power plants in Europe (Zimny 2010)



Rys. 2. Mapa rozkładu temperatury na głębokości 2 km dla Polski (Szewczyk 2010)
 Fig. 2. Map of temperature distribution at a depth of 2 km for Poland (Szewczyk 2010)

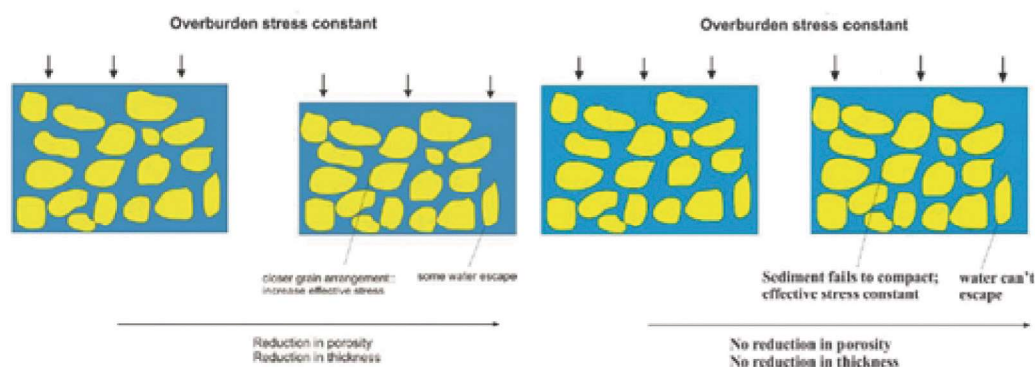
Może być wykorzystywana na potrzeby turystyki uzdrowiskowej poprzez bezpośrednie wykorzystanie wód podziemnych. Warto jednak zwrócić uwagę, że pod względem geotermii płytkiej Polska ma bardzo duży potencjał, więc w sporej części kraju ekonomicznie uzasadnionym rozwiązaniem mogłoby być zastosowanie pomp ciepła do ogrzewania pojedynczych budynków (Kłonowski i in. 2018).

2.2. Kompakcja w rejonie pól geotermalnych i jej skutki

Wydobywanie wód termalnych, szczególnie w sposób nieracjonalny, może prowadzić do przemieszczeń powierzchni terenu nad polami geotermalnymi (rys. 3). W wyniku eksploatacji wód dochodzi do zmniejszenia ciśnienia w porach skał, co powoduje powstawanie zjawiska kompaktacji. Dodatkowym negatywnym czynnikiem jest zmiana rozkładu temperatury w masywie skalnym skutkująca zmianą stanu naprężenia pierwotnego. Pod wpływem ciężaru materiału zgromadzonego w nadkładzie, dochodzi do zmniejszenia objętości skał porowatych. Obserwowanym skutkiem są przemieszczenia powierzchni terenu (Sektianwan i in. 2016).

Powstawanie przemieszczeń coraz częściej jest ograniczane poprzez zatłaczanie wody pod powierzchnię terenu w taki sposób, aby objętość skał utrzymywała się na podobnym poziomie. Monitorowanie przemieszczeń powierzchni terenu jest ważne ze względów zarówno ekonomicznych, jak i bezpieczeństwa. Elektrownie geotermalne często zlokalizowane są w pobliżu zbiorników wodnych ze względu na konieczność zamknięcia obiegu wody. Powstanie obniżen w takim rejonie może prowadzić do zalania sąsiadujących obszarów. W przypadku większych wartości osiadań może dojść do uszkodzenia budynków, w tym również samej elektrowni, co wiąże się z dodatkowymi kosztami napraw, a także przerwami w dostawie energii.

Problem obniżen terenu na obszarach eksploatowanych pól geotermalnych został zauważony w kilku rejonach świata i na przestrzeni lat przeprowadzono pomiary przemieszczeń m.in. w Islandii (Eysteinnsson 2000), Nowej Zelandii (Koros i in. 2016), Etiopii (Temtimea i in. 2018) i Stanach Zjednoczonych (Alia i in. 2016). Wielkość tych ruchów utrzymuje się na poziomie kilkunastu do maksymalnie kilkudziesięciu mm/rok. Skrajnym przykładem negatywnych skutków eksploatacji pól



Rys. 3. Schematycznie przedstawione zjawisko kompaktacji w warstwie skalnej (Sektianwan i in. 2016)
 Fig. 3. Schematically presented phenomenon of compaction in the rock layer (Sektianwan i in. 2016)



Rys. 4. Obniżenia wyrażone w [m] w rejonie pól geotermalnych zlokalizowanych w Nowej Zelandii na przestrzeni 50 lat (Stewart 2006)

Fig. 4. Subsidence in [m] in the area of geothermal fields located in New Zealand over 50 years (Stewart 2006)

geotermalnych jest rejon Taupo Volcanic Zone zlokalizowany w Nowej Zelandii (Stewart 2006). Największe zaobserwowane obniżenia osiągnęły wartość 15 m w okresie blisko 50 lat prowadzonych obserwacji (rys. 4).

3. Rejon badań

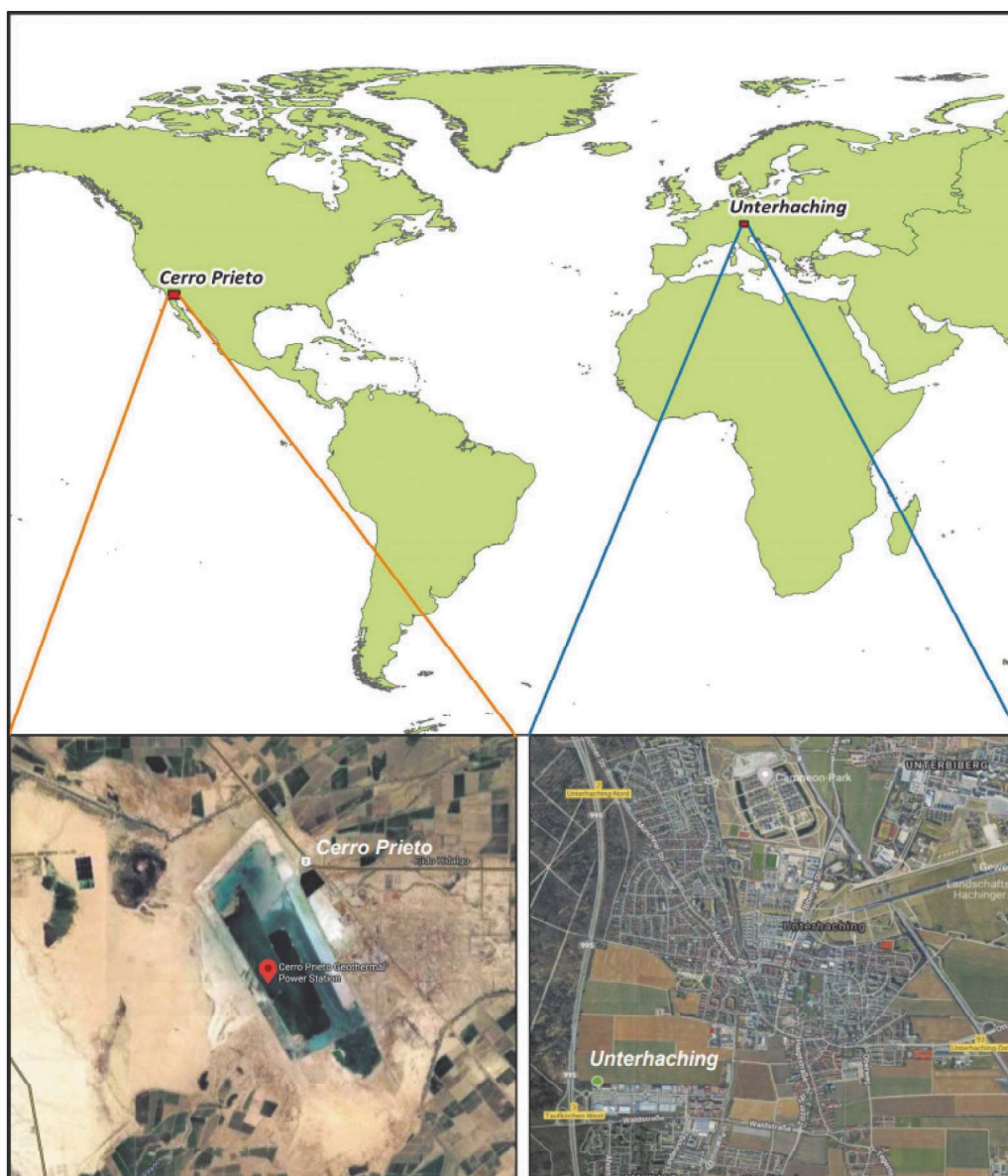
Badania przemieszczeń powierzchni terenu spowodowanych wydobyciem wód termalnych przeprowadzono na dwóch odmiennych poligonach: Cerro Prieto oraz Unterhaching. Pierwszy z obszarów położony jest w Meksyku, około 30 km na południe od granicy ze Stanami Zjednoczonymi (rys. 5). Jest to jedno z głównych pól geotermalnych tego kraju, a także jedna z największych i najbardziej wydajnych elektrowni geotermalnych na świecie. Kompleks obejmuje swoim zasięgiem około 40 km², z czego połowę stanowią baseny ewaporacyjne. Elektrownia Cerro Prieto zawdzięcza swoją wysoką wydajność między innymi zasobom geotermalnym o bardzo wysokich temperaturach, które osiągają wartości 280 – 350°C (Prol-Ledesma i in. 2016). Czynnikiem, który sprzyja powstawaniu tak gorących złóż jest budowa geologiczna masywu skalnego w rejonie kontaktu płyt tektonicznych. Cerro Prieto położone jest bowiem w zasięgu Pacyficznego Pierścienia Ognia, będącego obszarem o wzmożonej aktywności wulkanicznej.

Drugim obszarem badań jest elektrociepłownia zlokalizowana w niemieckiej miejscowości Unterhaching. Obiekt zlokalizowany jest na południe od Monachium, w jego bezpośrednim sąsiedztwie (rys. 5). Unterhaching jest jedną z najbardziej wydajnych instalacji geotermalnych w Niemczech.

Obszar ten różni się jednak od Cerro Prieto, przede wszystkim temperaturą wykorzystywanych złóż. Unterhaching znajduje się w basenie molasowym przedgórza Alp, a temperatury tych złóż mogą być zakwalifikowane jako pozwalające na pozyskiwanie energii (Machóń 2012). Działająca na tym obszarze elektrociepłownia bazuje na zasobach określanych jako niskotemperaturowe, czyli osiągające temperatury do 150°C. Wykorzystanie złóż o takich temperaturach jest wciąż bardzo rzadkie, zarówno na skalę Europy, jak i całego świata.

4. Metodyka

Do wyznaczenia ruchów powierzchni terenu nad polami geotermalnymi wykorzystano satelitarne zobrazenia radarowe pochodzące z misji Sentinel-1 Europejskiej Agencji Kosmicznej. Satelity te obrazują w paśmie radarowym C o częstotliwości 5,405 GHz. Do przetwarzania wybrano pary produktów SLC o rozdzielczości terenowego piksela ok. 5 m x 20 m. W badaniu zastosowano metodę interferometrii różnicowej DInSAR. Uwzględniono orbity precyzyjne dla każdego z obrazów SAR, dokonano współrejestracji par zobrażeń, który posłużyły do formowania interferogramów. Do usunięcia wpływu topografii terenu zastosowano numeryczny model terenu pochodzący z SRTM (ang. *Shuttle Radar Topography Mission*) o rozdzielczości 1". Dodatkowo zastosowano filtr Goldsteina do uczytelnienia danych, a w celu rozwinięcia fazy interferogramów wykorzystano algorytm SNAPHU, pozwalający na pozyskanie informacji o pełnym zakresie ruchów badanego obszaru. Pozyskane w ten sposób informacje przeliczono na metryczne wartości przemieszczeń w kierunku LOS



Rys. 5. Położenie poligonów badawczych
Fig. 5. Location of areas of interest

(ang. *Line of Sight* – kierunek padania wiązki fali emitowanej przez radar). Analizie poddano 3 interferogramy przetworzone dla poligonu Cerro Prieto oraz 1 dla obszaru Unterhaching, bazujące na zdjęciach opisanych poniżej (tabela 1).

5. Analiza wyników

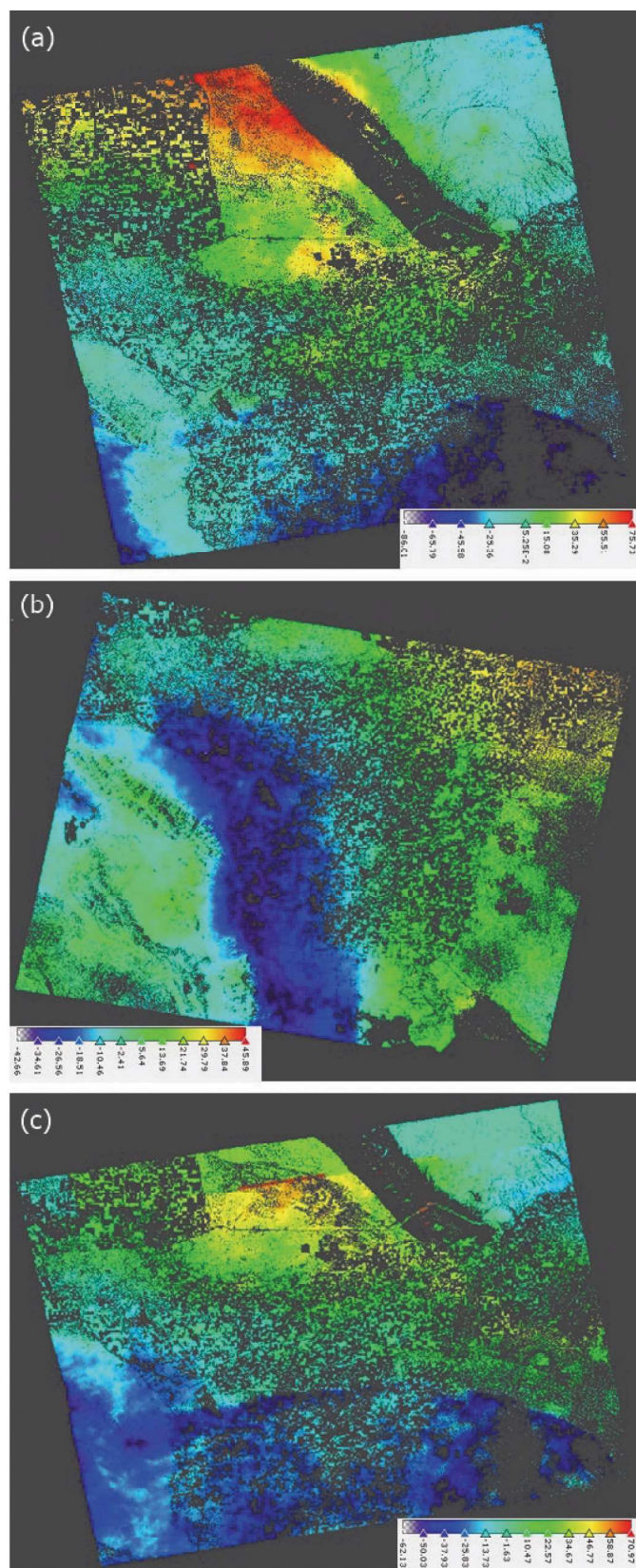
W ramach badań analizowano przemieszczenia w kierunku obrazowania satelity LOS (*Line Of Sight*), a także ruchy pionowe dla obu poligonów. Dla poligonu Cerro Prieto zapre-

Tabela 1. Wykaz zobrażeń radarowych wykorzystanych w badaniach
Table 1. List of radar images used in the research

Poligon Cerro Prieto (Meksyk)				
Data wykonania zobrażenia		Typ orbity	Numer orbity	Odstęp czasu [dni]
Obraz referencyjny (master)	Obraz dostosowywania (slave)			
18.09.2015	30.09.2015	Wstępująca	166	12
30.09.2015	12.10.2015	Zstępująca	173	12
30.09.2015	12.10.2015	Wstępująca	166	12
Poligon Unterhaching (Niemcy)				
14.11.2016	20.12.2016	Wstępująca	44	36

zestawiono interferogramy przedstawiające przemieszczenia w kierunku LOS (rys. 6). Dodatkowo naniesiona została maska koherencji o wartości progowej równej 0.4, dzięki czemu zaprezentowane rastry obrazują wyłącznie piksele charak-

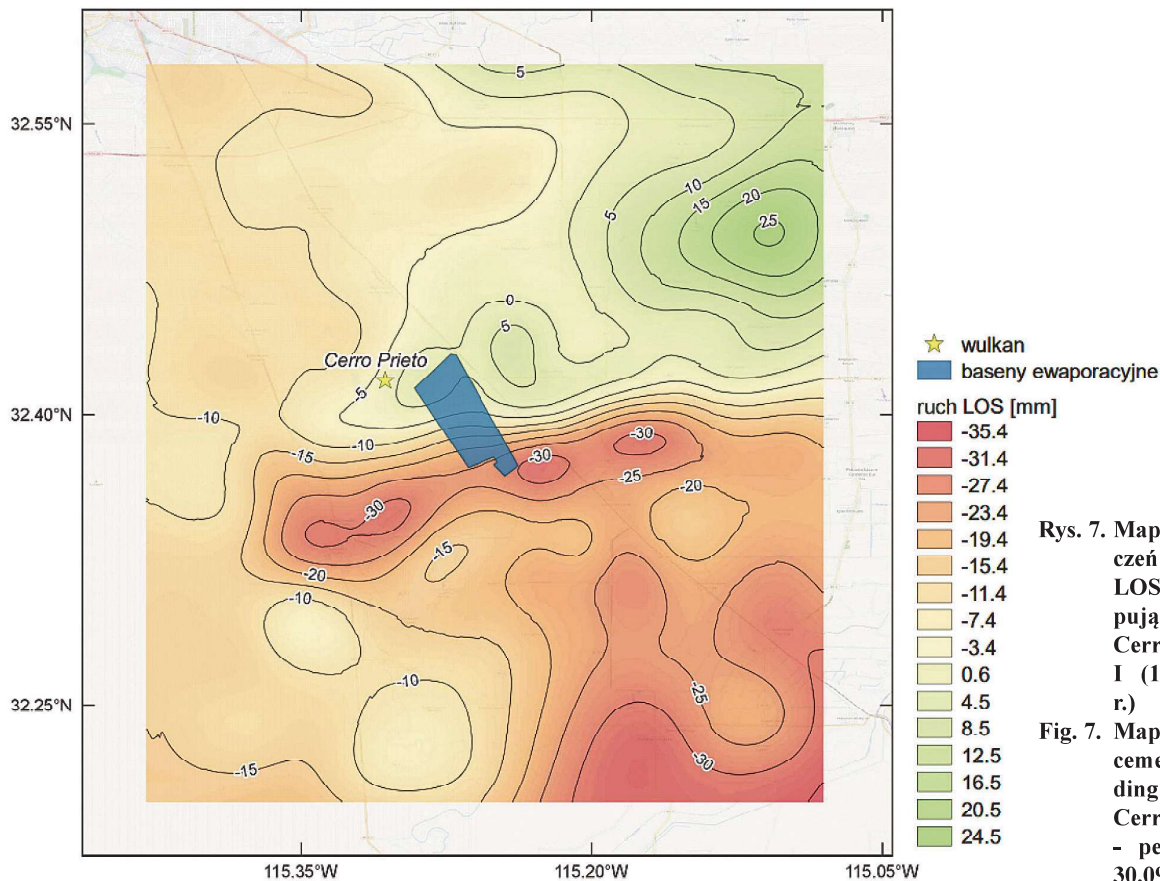
teryzujące się dobrym odbiciem wiązki radarowej. Z uwagi na dość krótki odstęp czasowy pomiędzy obrazowaniami, wynoszący 12 dni, ilość pikseli o wysokiej wartości koherencji jest znacząca, również w obszarze samej elektrowni.



Rys. 6. Przemieszczenia LOS dla poligonu Cerro Prieto z nałożoną maską koherencji: (a) dla orbity wstępującej w okresie 18.09-30.09.2015 r., (b) dla orbity zstępującej w okresie 30.09-12.10.2015 r. oraz (c) dla orbity wstępującej w okresie 30.09-12.10.2015 r.
Fig. 6. LOS displacements for the Cerro Prieto area with masked low coherence: (a) from ascending orbit in period 18.09-30.09.2015, (b) descending orbit in period 30.09-12.10.2015 and (c) ascending orbit in period 30.09-12.10.2015

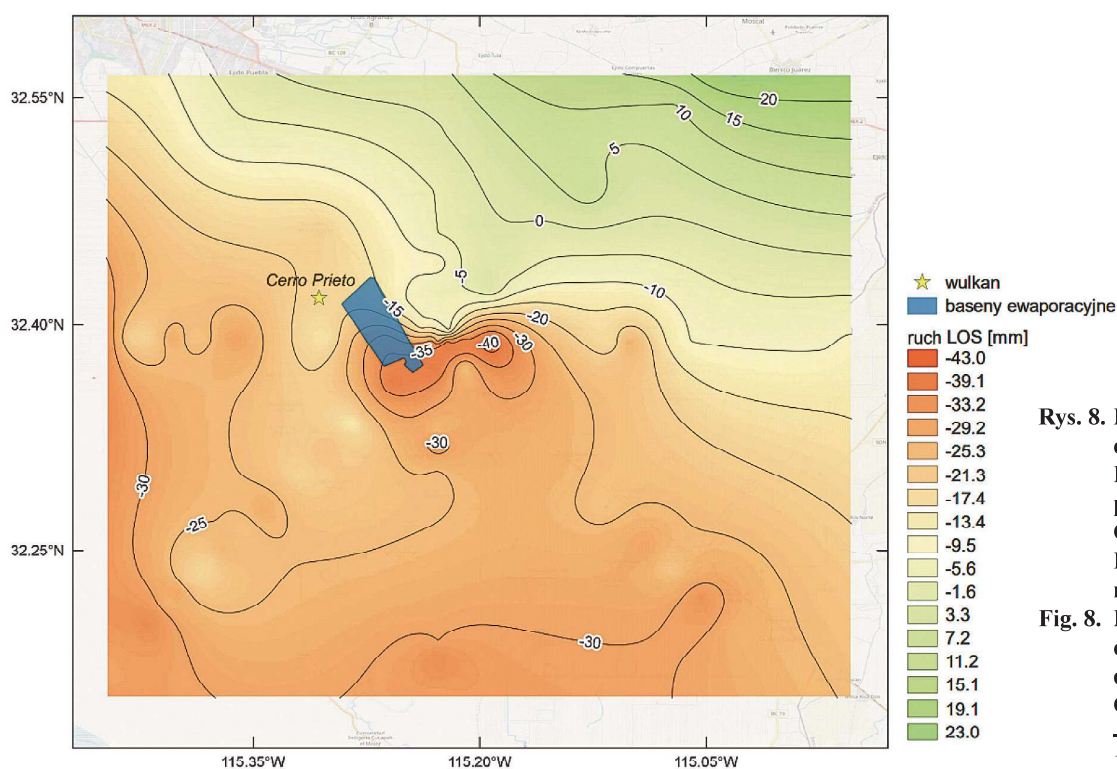
Pozyskane informacje pozwoliły na utworzenie map przemieszczeń w kierunku LOS dla dwóch okresów badań, które przedstawiono zarówno dla orbity zstępującej, jak i wstępującej (rys. 7, rys. 8 oraz rys. 9). Obszar elektrowni geotermalnej znajduje się w środkowej części każdego z zaprezentowanych rozkładów wartwicowych. Na mapach z orbity wstępującej zarówno w okresie 18.09–30.09, jak

i późniejszym: 30.09–12.10, wartwice układają się w zbliżony sposób, skupiając się w centralnej części opracowania. We wcześniejszym okresie badań maksymalna wartość ruchów LOS w rejonie elektrowni geotermalnej wyniosła około -30 mm (rys. 7). Kolejny z okresów badawczych ukazuje maksymalne przemieszczenie w zbliżonym rejonie wynoszące około -40 mm (rys. 8).



Rys. 7. Mapa przemieszczeń w kierunku LOS z orbity wstępującej dla poligonu Cerro Prieto – okres I (18.09–30.09.2015 r.)

Fig. 7. Map of LOS displacements for ascending orbit in the Cerro Prieto area - period I (18.09–30.09.2015)

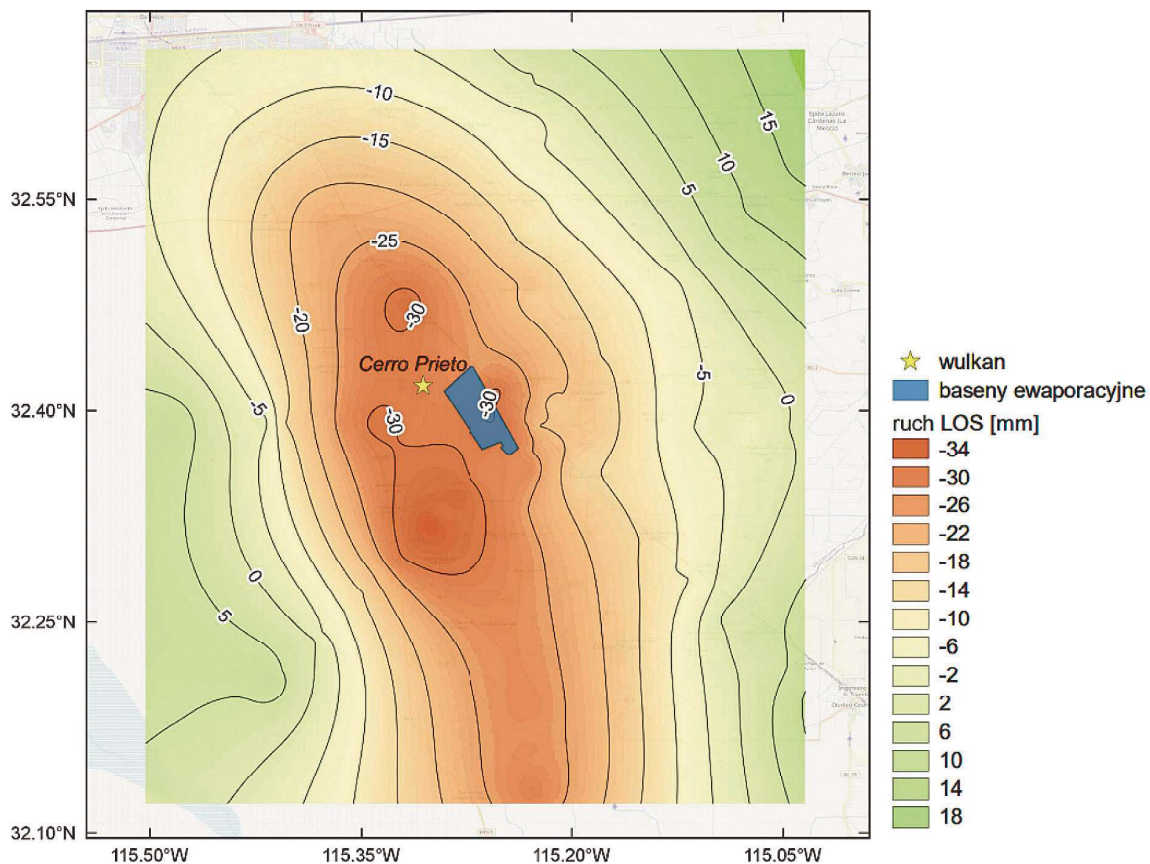


Rys. 8. Mapa przemieszczeń w kierunku LOS z orbity wstępującej dla poligonu Cerro Prieto – okres II (30.09–12.10.2015 r.)

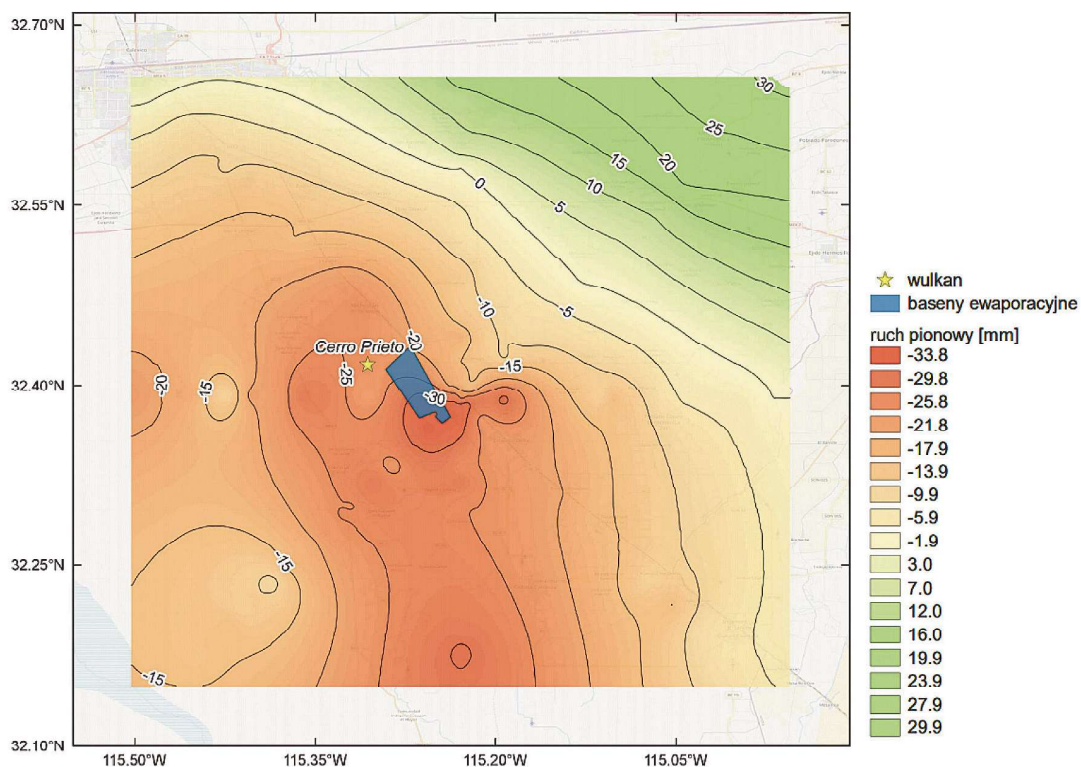
Fig. 8. Map of LOS displacements for ascending orbit in the Cerro Prieto area - period II (30.09–12.10.2015)

Dla danych z orbity zstępującej, warstwicę obrazującą przemieszczenia LOS układają się na kształt niecki osiadań o maksymalnej wartości skupiającej się w centrum opracowania

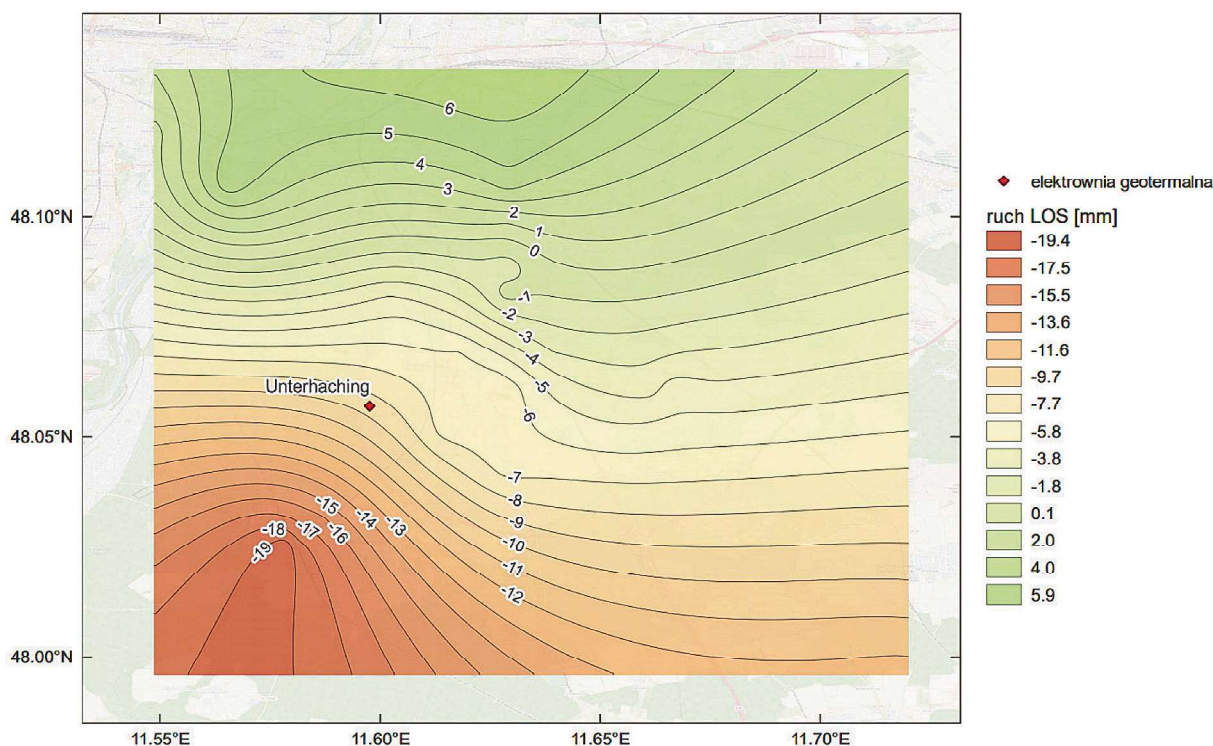
(rys. 9). Obniżenia terenu zaobserwowane za pomocą tej pary zobrazowań dochodzą do -36 mm, a nachylenia mają bardziej regularny kształt.



Rys. 9. Mapa przemieszczeń w kierunku LOS z orbity zstępującej dla poligonu Cerro Prieto – okres II (30.09-12.10.2015 r.)
 Fig. 9. Map of LOS displacements for descending orbit in the Cerro Prieto area - period II (30.09-12.10.2015)



Rys. 10. Mapa przemieszczeń pionowych dla Cerro Prieto – okres II
 Fig. 10. Map of vertical displacements in the Cerro Prieto area - period II



Rys. 11. Mapa przemieszczeń w kierunku LOS dla okolic elektrowni Unterhaching
Fig. 11. Map of LOS displacements for Unterhaching area

W okresie 30.09–12.10.2015 r. pozyskano interferogramy pochodzące z obu orbit, stąd możliwe było przeanalizowanie ruchów pionowych w obserwowanym rejonie (rys. 10). Przemieszczenia pionowe formują się częściowo w formie niecki, a maksymalne wartości zlokalizowane są w bezpośrednim sąsiedztwie elektrowni Cerro Prieto. W badanym okresie 12 dni ruchy pionowe w rejonie obiektu wyniosły niemal -34 mm.

W przypadku poligonu Unterhaching przeanalizowano przemieszczenia LOS dla 36-dniowego okresu badań (rys. 11). Warstwice układają się niemal równoległe do siebie, ukazując znaczny wpływ atmosfery na pozyskane wyniki. W rejonie południowo-zachodnim kształtuje się obszar, gdzie przemieszczenia LOS dochodzą do -19 mm w okresie 36 dni. W rejonie występowania samej elektrowni geotermalnej brak jest znaczących przemieszczeń powierzchni terenu wynikających z procesu deformacji. Analiza ruchów terenu przy tak dużym wpływie atmosfery jest utrudniona. Można stwierdzić, że przy 36-dniowym interwale obserwacji w rejonie niskotemperaturowych pól geotermalnych skala przemieszczeń powierzchni terenu mieści się w zakresie wpływu czynników atmosferycznych rejestrowanych na interferogramie.

6. Podsumowanie

W artykule przedstawiono analizy ruchów powierzchni terenu w otoczeniu elektrowni geotermalnych dla rejonu Cerro Prieto (Meksyk) oraz Unterhaching (Niemcy) z wykorzystaniem metodologii DInSAR. Celem tych badań było rozszerzenie pracy poprzednich naukowców w kartowaniu ruchów powierzchni terenu nad eksploatowanymi polami geotermalnymi występującymi w różnych lokalizacjach świata. Badania dotyczyły rejonów intensywnie zabudowanych (okolice Monachium) oraz położonych w bliskim sąsiedztwie większych miast (Cerro Prieto).

Z regionalnego punktu widzenia większość obszarów poddanych przemieszczeniom pionowym wynikającym z oddziaływania geotermii nie wykazuje znaczących przemieszczeń powierzchni terenu. Badania prezentowane w niniejszym artykule mają zatem bardziej charakter badań podstawowych, dążących do pokazania pewnej specyfiki zjawiska, które może być modelowane i weryfikowane w oparciu o obserwacje wsparte satelitarną interferometrią radarową.

Osiadanie powierzchni terenu obserwowane w poligonach badawczych jest bardzo zróżnicowane pod względem powierzchni. W przypadku pola wysokotemperaturowego - koncentruje się w jednym obszarze. Przykład pola niskotemperaturowego nie wykazał ruchów, co związane jest z zaszumieniem wyników atmosferą. Brak bezpośredniej korelacji między osiadaniami gruntu i wydobywaniem wody a miąższością osadów sugeruje, że deformacja gruntu jest spowodowana budową geologiczną podłoża związaną z istnieniem osadów o predyspozycjach do kompaktacji. Stanowi to wyzwanie w zarządzaniu eksploatacją warstwy wodonośnej w celu zminimalizowania i kontrolowania deformacji powierzchni terenu. Niemniej jednak prezentowane badania dowodzą, że satelitarna interferometria radarowa pozwala na monitorowanie przemieszczeń pionowych generowanych przez pozyskiwanie energii geotermalnej w rejonie pól wysokotemperaturowych. Dalsze badania nad weryfikacją i oceną dokładności tej metody, a także jej zastosowaniem w rejonie pól niskotemperaturowych trwają.

Literatura

ALI S., AKERLEY J., BALUYUT E.C., CARDIFF M., DAVATZSES N.C., FEIGL K.L., FOXALL W., FRATTA D., MELLORS R.J., SPIELMAN P., WANG H.F., ZEMACH E. 2016 - Time-series analysis of surface deformation at Brady Hot Springs geothermal field (Nevada) using interferometric synthetic aperture radar. *Geothermics*. vol. 61, 114-120.

- EYSTEINSSON H. 2000 - Elevation and gravity changes at geothermal fields on the Reykjanes Peninsula, SW Iceland. *Proceedings World Geothermal Congress*.
- GÓRECKI W. 2010 - Wody geotermalne na Niżu Polskim. „Przeгляд Geologiczny”. t. 58, nr 7.
- KEIDING M., ÁRNADOTTIR T., JONSSON S., DECRIEM J., HOOPER A. 2010 - Plate boundary deformation and man-made subsidence around geothermal fields on the Reykjanes Peninsula, Iceland. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. vol. 194(4), 139-149.
- KĘPIŃSKA B. 2016 - Przegląd stanu wykorzystania energii geotermalnej na świecie i w Europie w latach 2013 – 2015. „Technika Poszukiwań Geologicznych” nr 1/2016, 5-13.
- KŁONOWSKI M. R., KOCYŁA J., RYŻYŃSKI G., ŻERUŃ M. 2018 - Ocena potencjału geotermii niskotemperaturowej na podstawie analizy, interpretacji i reklasifikacji danych geologicznych na terenach zurbanizowanych. „Technika Poszukiwań Geologicznych” nr 2/2018.
- KOROS W., O’SULLIVAN J., POGACNIK J., O’SULLIVAN M. 2016 - Modelling of Subsidence at the Wairakei Geothermal Field, New Zealand. *Proceedings 38th New Zealand Geothermal Workshop*.
- LI Y., ZHANG J., LUO Y., JIANG Q., TIAN Y. 2016 - Measurement of subsidence in the Yangbajing geothermal fields, Tibet, from TerraSAR-X InSAR time series analysis. *International Journal of Digital Earth*. vol. 9(7), 697-709.
- MACHOŃ K. 2012 - Ciepłownictwo geotermalne w Niemczech. „Technika Poszukiwań Geologicznych”. t. 51, nr 1, 11-22.
- PROL-LEDESMA R.M., ARANGO-GALVAN C., TORRES-VERAM. 2016 - Rigorous Analysis of Available Data from Cerro Prieto and Las Tres Virgenes Geothermal Fields with Calculations for Expanded Electricity Generation. *Natural Resources Research*. vol. 25(4), 445-458.
- SALAK. 2018 - Przemysłowe wykorzystanie energii geotermalnej w Polsce na przykładzie geotermalnego zakładu ciepłowniczego w Bańskiej Niznej. *Prace Komisji Geografii Przemysłu Polskiego Towarzystwa Geograficznego*. t. 32(2), 73-82.
- SEKTIAWAN A., PRASETYO G., PATERA ADLI D., YUANTORO E. 2016 - Subsidence: Causes, Effects, and Mitigations in Geothermal Field. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. vol. 42(1).
- SOWIŹDŻAŁ A. 2016 - Potencjał geotermalny zbiorników mezozoicznych Niżu Polskiego do produkcji energii elektrycznej. „Technika Poszukiwań Geologicznych”. vol. 55(2), 105-115.
- STEWART C. - Geothermal energy - Effects on the environment. *TeAra - the Encyclopedia of New Zealand* [online]. <http://www.TeAra.govt.nz/en/map/5438/subsidence-around-wairakei-geothermal-field> (Dostęp: 14.10.2020 r.)
- SZEWczyk J. 2010 - Geofizyczne oraz hydrogeologiczne warunki pozyskiwania energii geotermicznej w Polsce. „Przeгляд Geologiczny”. vol. 58, nr 7, 566-573.
- TEMIME T., BIGGS J., LEWI E., HAMLING I., WRIGHT T., AYELE A. 2018 - Spatial and temporal patterns of deformation at the Tendaho geothermal prospect, Ethiopia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. Vol. 357, 56-67.
- ZIMNY J. 2010 - Elektrownie geotermalne. Szansa rozwoju energetyki Europy i Polski. „Energetyka Ciepła i Zawodowa”. nr 4/2010.

Artykuł wpłynął do redakcji – marzec 2021
Artykuł akceptowano do druku – 15.05.2021