



## Ocena zagrożenia zapadliskami metodą GPR 4D dla potrzeb uzdatnienia podłoża budowlanego na terenach pogórnich

### Estimation of sinkhole hazard by GPR 4D method for the purpose of foundation treatments on post-mining areas

Dr hab. inż. Sylwia Tomecka-Suchoń<sup>\*)</sup>

**Treść:** W artykule przedstawiono wynik badań georadarowych prowadzonych w rejonie zapadlisk pochodzenia górniczego w Trzebinii-Siersza. Czasoprzestrzenne badania georadarowe, tzw. 4D pozwoliły na śledzenie zmian zachodzących w górotworze i na przewidywanie wystąpienia zapadlisk. Na podstawie badań georadarowych stwierdzono, że w analizowanym rejonie obserwuje się ciągle zmiany deformacji w górotworze, które mogą skutkować występowaniem deformacji nieciągłych w kolejnych latach. Wykazano potrzebę prowadzenia badań geofizycznych przed podjęciem prac naprawczych, jak również badań potwierdzających prawidłowość wykonanych prac uzdatniających podłoże. Badania prowadzone przez pracowników AGH miały charakter badań naukowych, ale okazało się, że mają one duże znaczenie użytkowe.

**Abstract:** This paper describes the subject of georadar (GPR) studies were carried out in the Trzebinia-Siersza area. Time-spatial GPR 4D studies allowed to control changes in the geological medium and to predict mining-origin deformations. Basing on GPR studies, it was concluded that permanent deformation changes may result in the occurrence of discontinuities in the future. This paper proves the usefulness of such studies for the prediction of mining-origin deformations. It also demonstrates the need for carrying out geophysical reconnaissance before undertaking preventive and reparative measures and studies confirming the correctness of the repairs that are to be carried out. Scientific studies performed by AGH scientists were found to be extremely useful especially in urban areas.

#### Słowa kluczowe:

metoda GPR, pustki i strefy rozluźnień, zapadliska, płytko eksploatacja górnicza

#### Key words:

Ground Penetrating Radar method, voids and loosened zones, sinkholes, shallow exploitation

## 1. Wprowadzenie

Znacząca część Małopolski Zachodniej była objęta płytką eksploatacją górniczą złóż rud cynku i ołowiu oraz pokładów węgla [9, 10, 8]. Pozostawione pustki i strefy rozluźnień skutkują rozwojem procesów zapadliskowych i w efekcie ujawnieniem się na powierzchni terenu różnego rodzaju deformacji nieciągłych. Przykładem takiego terenu jest gmina Trzebinia-Siersza, dawny ośrodek górniczy. Jest to teren pogórnich KWK „Siersza” prowadzącej eksploatację od końca XVIII wieku do 2001 roku. Efektem prowadzonej działalności górniczej są występujące na powierzchni terenu do czasów obecnych deformacje nieciągłe. Obserwuje się liczne szkody górnicze, zarówno na terenach prywatnych, jak i publicznych. Deformacje nieciągłe prowadzą często do uszkodzenia budynków.

Uzdatnienie terenów zagrożonych zapadliskami najczęściej prowadzi się za pomocą otworowego zatłaczania zaczynu popiołu z cementem. Zgodnie z ogólnie stosowaną metodyką tych prac, uzdatnieniu podłoża powinny towarzyszyć właściwie zaprojektowane i wykonane prace geofizyczne [5, 6, 7]. Brak takich badań lub niewłaściwe ich wykonanie może spowodować nieskuteczne uzdatnienie podłoża.

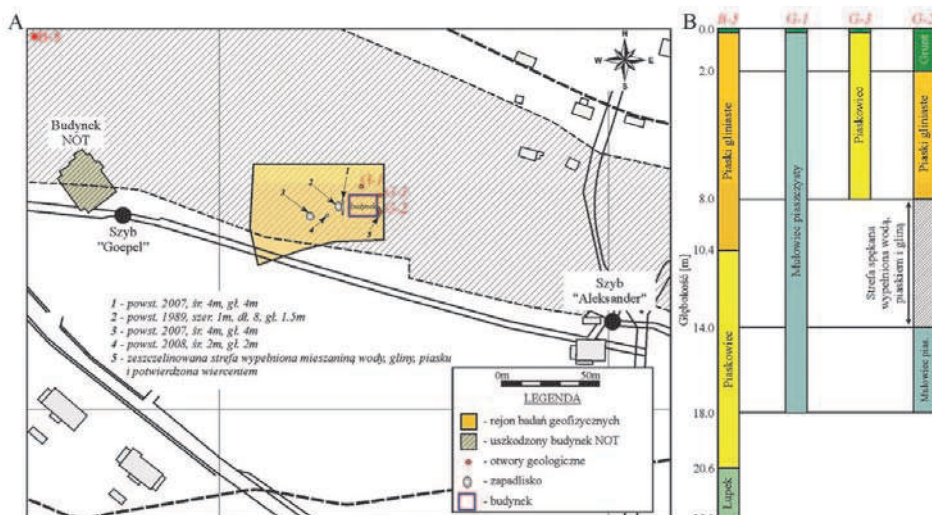
Kluczowym zagadnieniem skutecznego uzdatnienia podłoża jest również poznanie mechanizmu procesów zapadliskowych [2]. Rozwój deformacji niesprężystych w otoczeniu pustek poeksploatacyjnych związany jest najczęściej z przepływem wody przez ośrodek porowaty. W wyniku rozwoju procesu niszczenia fragmenty stropu opadają na dno pustki. Powstała pustka wtórna wyjaśnia przemieszczanie się procesu zapadliskowego w kierunku powierzchni terenu.

W związku z tym, że strefa spękań ma większą porowatość, a często większe zawilgocenie od otaczającego ośrodka, skutkuje to zmianą właściwości dielektrycznych ośrodka skalnego. Zmiana taka powoduje powstanie anomalii georadarowej. Na tej podstawie czasoprzestrzenne badania georadarowe pozwalają rozróżnić rejon, który jest stabilny od tych, które anomalnie rozwijają się i skutkują powstaniem zapadliska.

## 2. Położenie rejonu badań

Rejon badań znajdował się nad wyrobiskami zamkniętej kopalni KWK „Siersza” (rys. 1). W rejonie tym eksploatację pokładu węgla kamiennego 207 rozpoczęto pod koniec XVIII wieku na głębokości ok. 26 m. Wybrano do badań ten teren, ponieważ od 1980 roku zaczęły pojawiać się tam zapadliska (rys. 2). Spowodowały one, między innymi uszkodzenie znaj-

<sup>\*)</sup> AGH w Krakowie



Rys. 1. Rejon badań geofizycznych w Sierszy nad obszarem eksploatacji pokładu 207; głębokość eksploatacji: 26 m, lata eksploatacji: 1808-1853, miąższość pokładu: 4,20 m [4]

Fig. 1. Mining and geological information from the site of GPR measurements in Siersza exploitation area of coal seam no. 207; depth: 26 m; years: 1808-1852; coal thickness: 4.20 m



Rys. 2. Zapadlisko na terenie badań w marcu 2007 roku (Fot. S.Tomecka-Suchoń)

Fig. 2. Sinkhole in the teseted area in March 2007

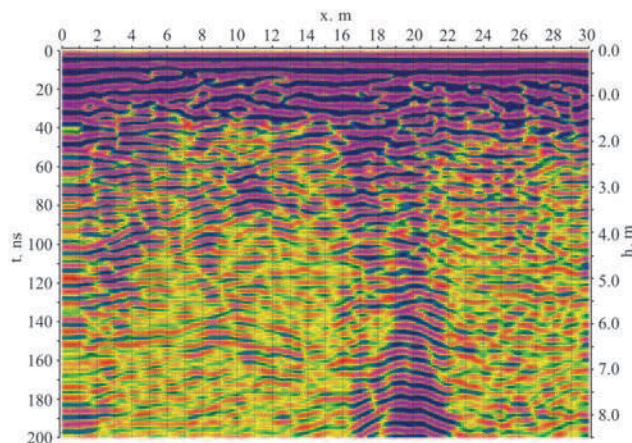
dującego się w sąsiedztwie budynku Naczelnej Organizacji Technicznej.

3. Metodyka badań georadarowych

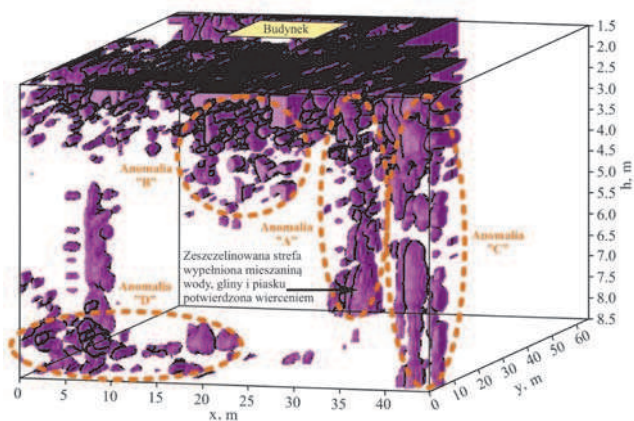
Pomiary georadarowe w rejonie badań na terenie pogórnym KWK „Siersza” prowadzono wielokrotnie od 1997 roku. Badania te wykonywano wzdłuż tych samych profili. Pomimo, że na powierzchni terenu nie zaobserwowano żadnych oznak, które wskazywałyby na rozwój deformacji nieciągłych, pierwsze pomiary GPR wykonane w 1997 roku pozwoliły wyznaczyć silną anomalię na profilu przebiegającym bezpośrednio przy budynku mieszkalnym pomiędzy 16 a 22 m (rys. 3) [11]. Strefy wysokich energii sygnałów na echogramie (rys. 3) można korelować ze strefami pustek i rozluźnień w gruncie. Obszar zwiększonych amplitud zaznacza się na echogramie bardziej intensywnym kolorem fioletowym. W tym czasie, ze względu na brak odpowiedniego oprogramowania, interpretację prowadzono tylko w

układzie 2D. W wyniku wykonanych otworów kontrolnych przez Kopalnię „Siersza” okazało się, że anomalia ta pochodzi od strefy silnych rozluźnień. Ponadto stwierdzono obecność mieszaniny wody i piasku.

Dalszy rozwój oprogramowania pozwolił na zaawansowane, cyfrowe przetwarzanie danych pomiarowych oraz trójwymiarową wizualizację stref o anomalnym rozkładzie właściwości dielektrycznych [1]. Dzięki takiej interpretacji uzyskano z tych samych danych znacząco bardziej informatywny obraz wyników z pierwszej sesji pomiarowej z 1997 roku (rys. 4) [4]. Wyinterpretowano nowe strefy anomalne, które przyczyniły się do zainicjowania systematycznych prac badawczych w tym rejonie. Kolejne badania wykonywano w kilku seriach, zawsze wzdłuż tych samych równoległych profili przy użyciu anten ekranowanych o częstotliwościach 250 i 500 MHz oraz nieekranowanych o częstotliwościach 50 MHz i 200 MHz.



Rys. 3. Echogram pomiarowy dla profilu z zaznaczającą się strefą anomálną w postaci wzrostu amplitudy  
Fig. 3. Radargram of profile with anomalous zone in the form of amplitude increase



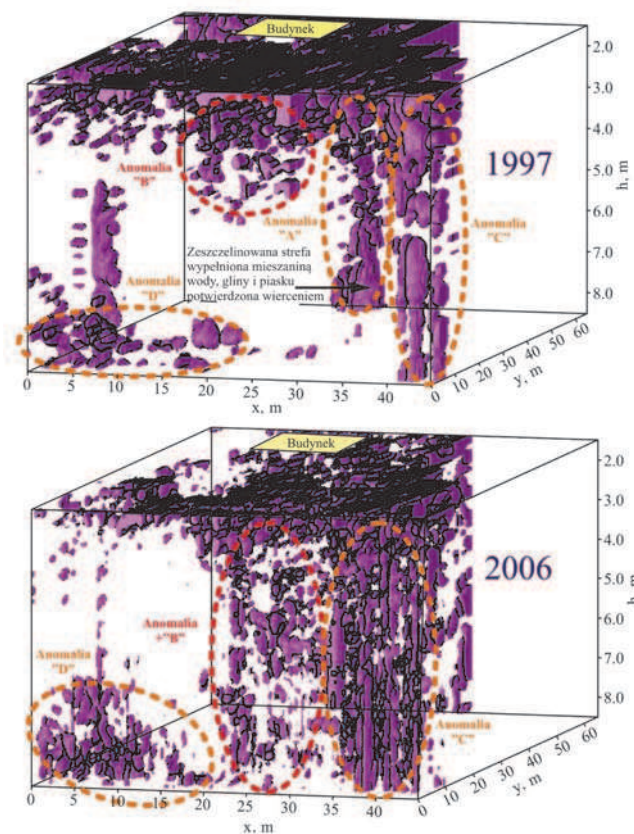
Rys. 4. Trójwymiarowy rozkład amplitud chwilowych sygnałów georadarowych dla pierwszej serii pomiarowej w 1997 roku [4]

Fig. 4. 3D distribution of GPR signal envelopes after first measurement session in 1997

#### 4. Wyniki badań i ich analiza

Na rysunku 5 przedstawiono porównanie zapisów georadarowych z 1997 i 2006 roku. Interpretację rozkładów amplitud dokumentującą rozwój pustki przedstawiono na rysunku 6 [1].

Wewnątrz badanego obszaru (rys. 4) zaznacza się wyraźna anomalia B pochodząca od strefy pustek i rozluźnień górotworu. Anomalia taka nie została zarejestrowana w badaniach z roku 1997. Widać wyraźnie, że rozbudowała się ona w kierunku pionowym. Analiza porównawcza [1] obydwu wyników

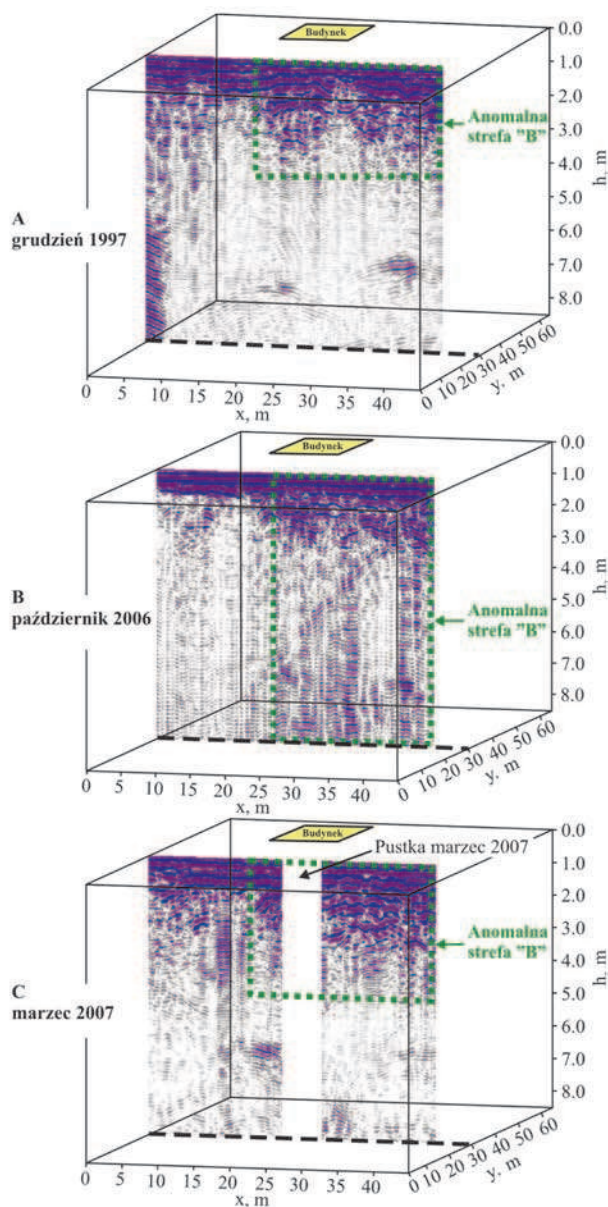


Rys. 5. Porównanie rozkładu anomalii georadarowych w latach 1997 i 2006 [4]

Fig. 5. Comparison of 3D distribution of GPR signal envelopes in the tested area in 1997 and 2006

z 1997 i 2006 roku wykazała przypuszczalnie niebezpieczny rozwój deformacji, wskazujący na prawdopodobieństwo powstania zapadliska. Jak się okazało, w miejscu tym 5 marca 2007 roku pojawiło się zapadlisko o średnicy i głębokości równej 4 m, co zostało odnotowane w „Gazecie Małopolskiej” w 2007 roku w artykule *Zapadła się ziemia*. Na rysunku 6 A w środkowej części profilu widać strefę anomálną rozciągającą się do głębokości ok. 3 m. Na rysunku 6 B widać, że nastąpiło poszerzenie obszaru anomalii w wyniku rozwoju procesu zapadliskowego ku powierzchni terenu, który najprawdopodobniej spowodował powstanie w marcu 2007 roku zapadliska powierzchniowego. Na rysunku 6 C obserwujemy zanik części głębszej strefy rozluźnień gruntu po powstaniu zapadliska. Fakt ten związany jest przypuszczalnie z kompaktacją gruntu.

Wyniki naszych badań zostały przekazane do Urzędu Miasta Trzebinia. Pojawienie się zapadliska dokładnie w pół roku po opracowaniu wyników badań potwierdziło, że interpretacja wyników była prawidłowa, a tym samym i przydatność badań geofizycznych.



Rys. 6. Cięcia przestrzenne poprowadzone przez środek anomalii B [4]

Fig. 6. Cross-section through the centre of anomaly B

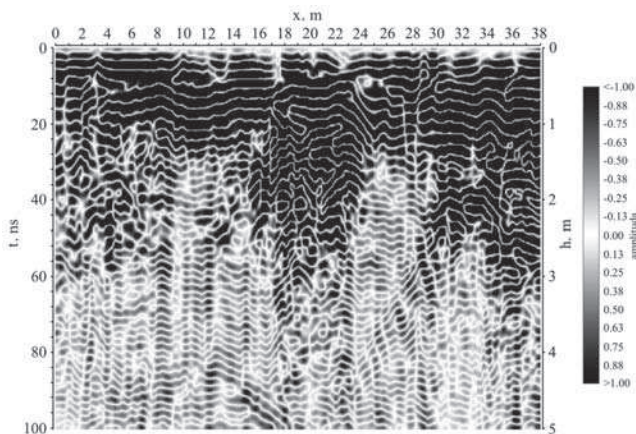
W kwietniu 2008 roku powstało kolejne zapadlisko o średnicy i głębokości 2 m (rys. 7), które również zostało poprzedzone stwierdzoną anomalią w wyniku badań georadarowych przeprowadzonych w 2007 roku (rys. 8).

Podjęte prace uzdatniające metodą zatłoczenia zaczynu cementowo-popiołowego w 2013 roku pokazały, że zagrożenie zapadliskowe jest poważne. Po ich zakończeniu, w miejscu uzdatnienia wystąpiło zapadlisko (rys. 9 i 10).



Rys. 7. Zapadlisko, które powstało w kwietniu 2008 roku (Fot. S. Tomecka-Suchoń)

Fig. 7. Sinkhole that appeared in April 2008



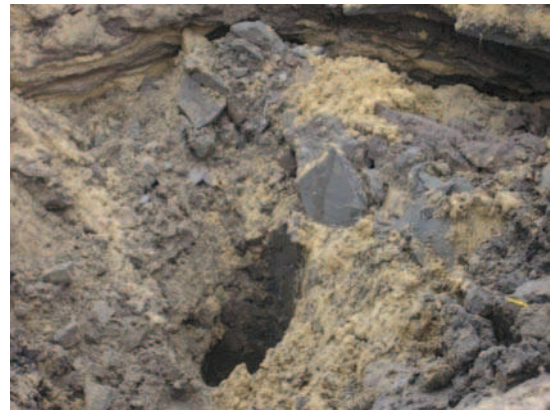
Rys. 8. Echogram dla profilu nr 16 wykonanego w 2007 roku. Anomalna strefa znajduje się pomiędzy 15 a 24 metrem profilu

Fig. 8. Radargram of profile no. 16 in 2007. The anomaly zone is located between the 15 and 24 meter of the profile



Rys. 9. Wiercenie otworu dla potrzeb uzdatnienia podłoża w 2013 r. (Fot. S. Tomecka-Suchoń)

Fig. 9. Drilling of the hole for the needs of foundation treatment in 2013 (Photo: S. Tomecka-Suchoń)



Rys. 10. Powstanie nowego zapadliska po zakończeniu uzdatnienia podłoża w 2013 r. (Fot. Maryla Pleskacz)

Fig. 10. New sinkhole which occurred after the foundation treatment in 2013 (Photo: M. Pleskacz)

## 5. Podsumowanie

Czasoprzestrzenne badania georadarowe, tzw. 4D pozwoliły na śledzenie zmian zachodzących w górotworze i na przewidywanie wystąpienia zapadlisk. Interpretacja tego rodzaju wyników badań daje możliwość pełnego wykorzystania informacji zawartych w georadarowych danych pomiarowych i pozwala na ocenę rozwoju procesów zapadliskowych.

Na podstawie dotychczasowych badań georadarowych można stwierdzić, że w analizowanym rejonie obserwuje się ciągle zmiany deformacji w górotworze, które mogą skutkować występowaniem deformacji nieciągłych w kolejnych latach.

Wyniki badań przedstawione w pracy pokazują, że uzdatnianiu podłoża powinny towarzyszyć badania geofizyczne. Występowanie zapadlisk w miejscach wskazanych anomalią geofizycznych potwierdza ich efektywność.

Badania prowadzone przez pracowników AGH miały charakter badań naukowych, ale okazało się że mają one duże znaczenie użytkowe.

*Projekt został sfinansowany ze środków Umowa nr: UMO-2011/01/B/ST7/06178 Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji numer DEC-2011/01/B/ST7/06178.*

## Literatura

1. Marcak H., Tomecka-Suchoń S.: Zastosowanie metod georadarowych do lokalizacji pustek. Miesięcznik WUG 2006, nr 12 s.10-14.
2. Marcak H., Gołębiowski T., Tomecka-Suchoń S.: Zastosowanie metod georadarowych do lokalizacji pustek. Materiały konferencji „Ochrona środowiska na terenach górniczych”. Organizator Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Górnictwa, Szczyrk, 319-329. Abstrakt: miesięcznik WUG - „Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie”, Katowice 2006.
3. Marcak H., Gołębiowski T., Tomecka-Suchoń S.: Analiza przestrzenno-czasowa danych georadarowych dla oceny ryzyka wystąpienia pustek poeksploatacyjnych. Materiały konferencji „Warsztaty Górnictwa 2007”. Organizator: Instytut GSMiE PAN, Ślesin, 309-324; Abstrakt: miesięcznik WUG - „Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie”, 2007, nr 6, s. 323-324.
4. Marcak H., Gołębiowski T., Tomecka-Suchoń S.: Geotechnical Analysis and 4D GPR Measurements for the Assessment of the Risk of Sinkholes occurring in a Polish Mining Area. Near Surface Geophysics, 2008 233-243.

5. *Pilecki Z.*: The role of geophysical methods in the estimation of sinkhole threat in the post-mining areas of shallow exploitation in the Upper Silesian Coal Basin, Poland. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, t. 24, z. 3/1, 2008, 27-40.
  6. *Pilecki Z.*: Methodology for A-1 motorway basement treatment effectiveness improvement by means of geophysical methods in the areas of metal ores shallow mining threatened with the sinkhole occurrence in the Upper Silesia. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, t. 25, z. 3, 2009, 319-331.
  7. *Pilecki Z.*: Uzdatnienie podłoża autostrady A-1 na terenach pogórnich płytkiej eksploatacji rud metali. *Studia, Rozprawy, Monografie* 184. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków 2014.
  8. *Pilecki Z., Pilecka E., Psonka J., Stanisław J., Morman J.*: Zagrożenia deformacjami nieciągłymi na obszarze górnym Jaworzno III. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków 2012.
  9. *Pilecki Z., Popiołek E.*: Wpływ eksploatacji rud na zagrożenie powierzchni deformacjami nieciągłymi i jego badanie za pomocą metod geofizycznych. *Studia, Rozprawy, Monografie* 84, Wyd. IGSMiE PAN, Kraków 2000.
  10. *Popiołek E., Pilecki Z.* (red.): Ocena przydatności do zabudowy terenów zagrożonych deformacjami nieciągłymi za pomocą metod geofizycznych. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków 2005.
  11. *Ziętek J., Karczewski J., Tomecka-Suchoń S., Carcione J., Padano D., Denis C.*: Observations and Results of GPR Modelling of Sinkholes in Upper Silesia (Poland). *Acta Geodetica Geophysica Hungarica*, vol. 36(4) 2001, 377-389.
- 
-