



**Referat wygłoszony w dniu 17 stycznia 2024r. na posiedzeniu
Komisji Nauk Geologicznych PAN Oddział w Krakowie**

Polska Akademia Nauk
Oddział w Krakowie
Komisja Nauk Geologicznych

Prof. dr hab. inż. Zenon Pilecki

Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN

ul. J. Wybickiego 7A, Kraków 31-261,

e-mail: pilecki@meeri.pl

ORCID: 0000-0002-0090-8743

**Identyfikacja pustek i stref rozluźnienia pochodzenia górniczego
za pomocą metod geofizycznych**

Wprowadzenie

Pustki i strefy rozluźnienia przypowierzchniowe pochodzenia górniczego mogą być przyczyną uaktywnienia się procesów zapadliskowych terenu (np. Goszcz, 1996; Popiołek i Pilecki, 2005). W niekorzystnych warunkach geologiczno-inżynierskich i górniczych procesy zapadliskowe mogą się ujawnić na powierzchni terenu tworząc różnego rodzaju deformacje o charakterze nieciągłym.

Wiele obszarów pogórnich i górniczych w Polsce jest zagrożonych wystąpieniem deformacji nieciągłych. Należą do nich tereny płytkiej eksploatacji:

- pokładów węgla na obszarze Górnego i Dolnego Śląska,
- rud cynku, ołowiu i srebra w śląsko-krakowskim obszarze złożowym,
- rud żelaza w rejonie częstochowsko-wieluńskim,
- soli kamiennej w rejonie Wieliczki i Bochni,
- rud miedzi na Dolnym Śląsku,
- węgla brunatnego w okolicach Zielonej Góry i Piły,
- różnych surowców mineralnych wydobywanych metodą podziemną, w tym szybikową, gdzie warunki eksploatacji sprzyjały występowaniu deformacji nieciągłych na powierzchni terenu.

Wiele czynników geologiczno-górnicznych decyduje o rodzaju deformacji nieciągłej i jej wymiarze. Infiltracja wody jest podstawową przyczyną reaktywacji rozwoju pustek i stref rozluźnień w górotworze. W wielu przypadkach do identyfikacji pustek i stref rozluźnień wykorzystuje się metody geofizyczne. Na podstawie dotychczasowych doświadczeń można przyjąć, że do najskuteczniejszych metod geofizycznych należą grawimetryczna, sejsmiczna, elektrooporowa i georadarowa.

W referacie przedstawiono przyczyny powstawania procesów zapadliskowych oraz ich mechanizm. Omówiono metodykę identyfikacji pustek i stref rozluźnienia z zastosowaniem metod geofizycznych opracowaną na podstawie badań prowadzonych przez kilkadziesiąt lat. Rezultatem tych badań jest również klasyfikacja zagrożenia powierzchni terenu deformacjami nieciągłymi (Pilecki i Kotyrba, 2007, Pilecki, 2014). W części końcowej przedstawiono kilka ciekawszych przykładów wyników badań geofizycznych.

Mechanizm procesu zapadliskowego

Modele powstawania deformacji nieciągłych wywołanych płytką eksploatacją rozważali m.in. Chudek i in. (1988), Whittaker i Reddish (1993), Goszcz (1996), Fajkiewicz (2001), Krawiec i Pilecki (2012), Strzałkowski (2015). Geofizyczny model pustki pochodzenia górniczego został przedstawiony przez Marcaka i Pileckiego (2006).

W bardzo ogólnym ujęciu, proces zapadliskowy odpowiadający za propagację pustki można przedstawić za pomocą teorii „sklepienia ciśnienia” (Sałustowicz, 1968). Im płycej pod powierzchnią terenu znajduje się pustka, tym bardziej wydłużony będzie jej kształt w kierunku pionowym dla zachowania równowagi z otaczającym ośrodkiem. W rzeczywistości, kształt pustki i zróżnicowany stan naprężenia, może spowodować pojawienie się sił rozciągających wokół pustki prowadzących do deformacji trwałych. Strefa spękań będzie się powiększać do momentu ustalenia się nowego stanu równowagi.

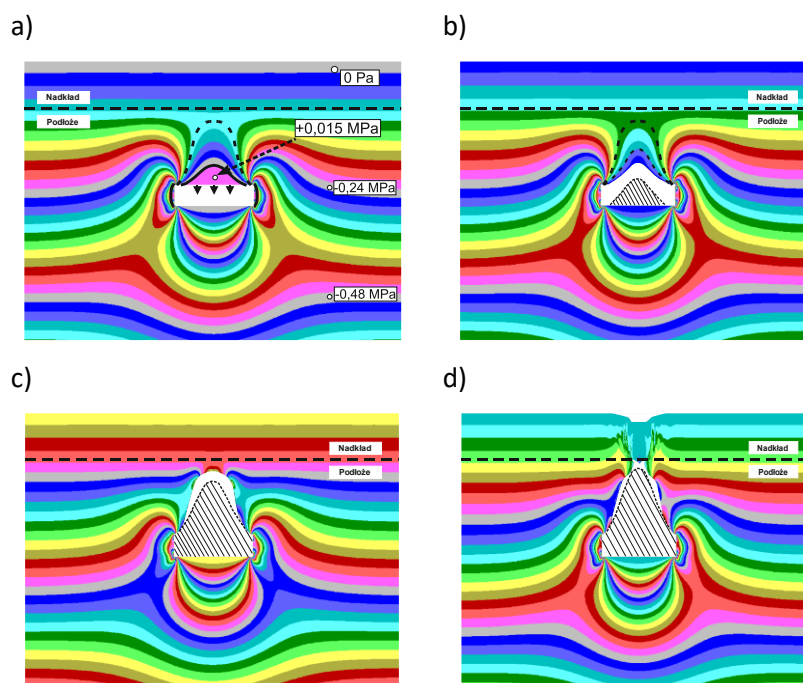
Obraz procesów zachodzących w pustce i jej otoczeniu, można przedstawić jako układ czterech stref:

- strefa pierwsza (I) – pustka, często wypełniona wodą oraz zawierająca luźny materiał skalny oraz gruntowy zdeponowany w części spągowej,
- strefa druga (II) – intensywnych spękań, głównie w stropie i ociosach pustki, o gęstości spękań malejących wraz z odległością od granicy pustki,
- strefa trzecia (III) – spękań otaczających pustkę, również w spągu, do granicy z ośrodkiem nie objętym wpływami wytworzonej pustki,
- strefa czwarta (IV) - ośrodka nienaruszonego wpływami propagującej pustki.

Geofizyczny obraz pustki z otaczającym spękanym ośrodkiem skalnym można uprościć do dwóch stref, najważniejszych z punktu widzenia rozpoznania geofizycznego:

- centralna strefa - pustka wraz ze zdeponowanym na jej spągu materiałem skalnym i gruntowym i ewentualnie wypełniona wodą, charakteryzująca się bardzo dużym kontrastem właściwości fizycznych w porównaniu z otaczającym ośrodkiem.
- zewnętrzna strefa - spękań od granicy z pustką do granicy z ośrodkiem nienaruszonym. Strefa ta jest dużo większa od strefy centralnej, a jej właściwości zależą od gęstości spękań. Charakteryzuje się ona mniejszą prędkością fal sejsmicznych, większą niejednorodnością parametrów sejsmicznych w zależności od gęstości spękań, większym tłumieniem fal sejsmicznych, wzrostem oporności ośrodka, mniejszą gęstością objętościową, lub zmianą parametrów elektromagnetycznych. Strefa ta wzmacnia anomalny efekt strefy centralnej w identyfikacji pustki metodami geofizycznymi.

Sposób propagacji pustki ku powierzchni terenu można zasymulować numerycznie, zakładając, że decydujący wpływ na rozwój spękań w stropie pustki mają naprężenia rozciągające wynikające z działania siły grawitacji (Rys. 1). Należy podkreślić, że mechanizm występowanie zapadlisk nad zlikwidowanymi szybami i szybkami jest odmienny od deformacji nieciągniętych nad pustkami i strefami rozluźnienia.



Rys. 1. Redystrybucja naprężenia pierwotnego i rozwój strefy spękań w stropie pustki (a); zawal stropu pustki obejmujący strefę naprężenia rozciągającego (b); wtórny zawal stropu pustki (c); przemieszczenie pustki do granicy z luźnymi utworami nadkładu oraz wystąpienie zapadliska na powierzchni terenu (d) (Krawiec i Pilecki 2012)

Metodyka identyfikacji pustek i stref rozluźnień pochodzenia górniczego z użyciem metod geofizycznych

W metodyce identyfikacji pustek i stref rozluźnień pochodzenia górniczego z użyciem metod geofizycznych przyjęto, że podstawową metodą badawczą jest mikrograwimetria. Z. Fajkiewicz (1956, 1967) był pionierem w zastosowaniu tej metody w badaniu deformacji nieciągłych w górnictwie. Wyniki badań grawimetrycznych są najczęściej korelowane z wynikami innych metod: sejsmicznej, georadarowej lub elektrooporowej. W szczególności metodyka obejmuje następujące etapy (na podstawie Pileckiego 2018):

- Etap I - kompleksowy przegląd danych górniczych, geologicznych i geodezyjnych, w tym zdjęć lotniczych i satelitarnych, rozpoznanie terenowe (kartowanie pogórnictwa infrastruktury historycznej), rozpoznanie możliwości zastosowania różnych metod badawczych i wstępne oszacowanie stopnia zagrożenia zapadliskowego,
- Etap II – pomiary metodą grawimetryczną położenia stref zagrożenia zapadliskowego,
- Etap III – weryfikacja anomalii grawimetrycznych innymi metodami geofizycznymi: sejsmiczną, georadarową lub elektrooporową (dobór metody powinien wynikać z warunków pomiarowych – na terenach występowania złóż rud metali nie zaleca się stosowania metody elektrooporowej),
- Etap IV – kompleksowa analiza zagrożenia zapadliskowego z uwzględnieniem wyników badań geofizycznych oraz rozpoznania geologiczno-górniczego na etapie wstępnym,
- Etap V – weryfikacja wyników rozpoznania za pomocą otworów kontrolnych i w razie potrzeby badań otworowych, w tym georadarem otworowym. Zaprojektowanie i wykonanie zabezpieczenia górotworu. W przypadku likwidacji pustek przez podsadzenie należy dokonać kontroli jakości ich wypełnienia jedną z metod geofizycznych uprzednio zastosowanych.

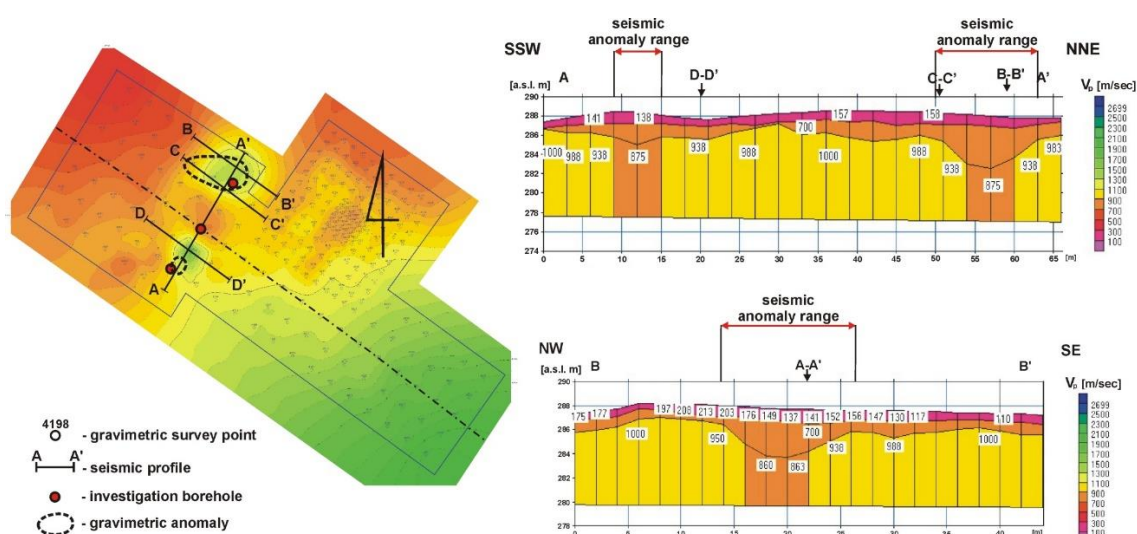
Metodyka ta została opracowana na podstawie badań na terenach o zróżnicowanym zagrożeniu zapadliskowym w okresie kilkudziesięciu lat. Rezultatem tych badań jest również klasyfikacja zagrożenia powierzchni terenu deformacjami nieciągłymi (Pilecki i Kotyrba 2007, Pilecki 2014).

Przykłady identyfikacji pustek i stref rozluźnień pochodzenia górniczego z użyciem metod geofizycznych

Skuteczność identyfikacji pustek i stref rozluźnień pochodzenia górniczego metodami geofizycznymi zależy od kontrastu konkretnych właściwości ośrodka właściwych dla danej metody

geofizycznej. Należy jednak zaznaczyć, że wykorzystywane są sposoby identyfikacji pustek i stref rozluźnień na podstawie np. zmian deformacyjnych w strukturze ośrodka (np. Pilecki i in., 2021).

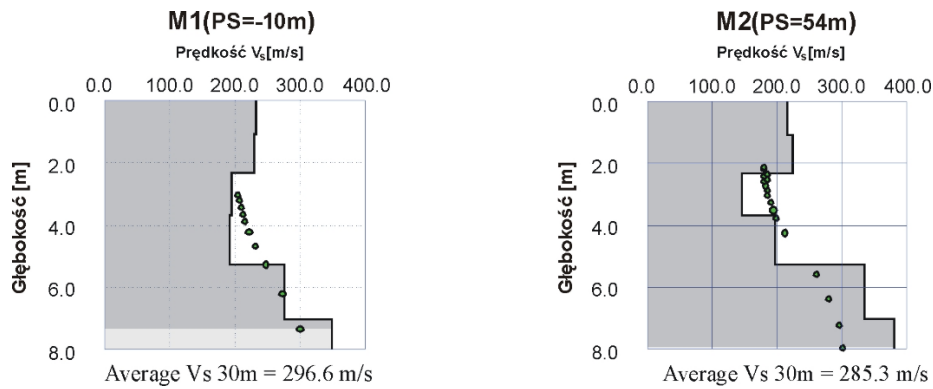
Zastosowanie metody grawimetrycznej jako podstawowej wynika z faktu, iż najbardziej kontrastowym parametrem fizycznym w badanym ośrodku jest gęstość objętościowa. Zróznicowanie gęstości objętościowej mające związek z istnieniem pustek i stref rozluźnień poeksploatacyjnych na niewielkiej głębokości w decydujący sposób wpływa na mierzony obraz anomalii grawimetrycznych (Rys. 2).



Rys. 2. Anomalne zmiany pola siły ciężkości towarzyszące anomaliiom sejsmicznym na terenie zagrożonym zapadliskami w rejonie Bytomia (Pilecki i Kotyrba 2007)

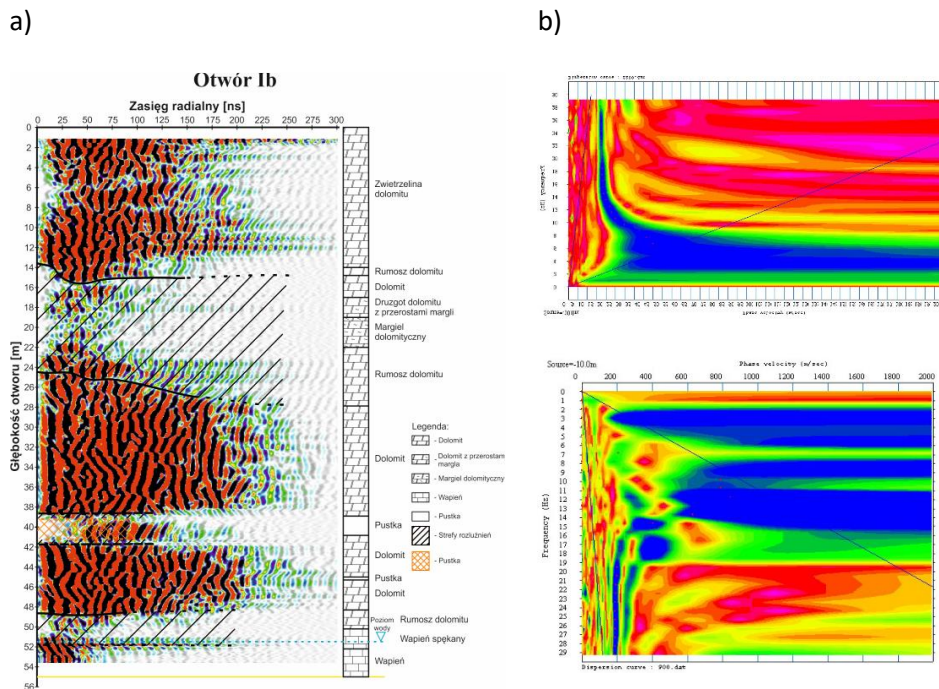
Zmiany właściwości fizycznych związane z pustką i strefą rozluźnień powodują na ogół wzrost oporności ośrodka, spadek prędkości fal sejsmicznych, oraz zmianę parametrów elektromagnetycznych dając anomalny efekt przy pomiarach elektrooporowych, sejsmicznych i georadarowych. Należy zaznaczyć, że w zależności od stopnia zawodnienia górotworu anomalne zmiany parametrów sejsmicznych mogą być nietypowe.

W przypadku badań sejsmicznych refrakcyjnych najczęściej określa się przebieg granicy nadkładu z podłożem, oraz zmiany prędkości fali refrakcyjnej w podłożu do głębokości poziomu prowadzonych prac górniczych. Sejsmiczne pomiary refrakcyjne mogą być uzupełnione innymi technikami sejsmicznymi, w tym pionowym profilowaniem zmian prędkości fali S (Rys. 3) z wykorzystaniem fal powierzchniowych (Rys. 4b).



Rys. 3. Widok pustek w profilowaniu pionowym prędkości fali S w otworach kontrolnych na terenie historycznej, płytkiej eksploatacji rud cynku i ołowiu k. Piekar Śl.; (Pilecki, 2018)

W przypadku badań georadarowych (Rys. 4a) lub elektrooporowych uzyskuje się zobrazowanie położenia stref osłabienia bazując na odmiennych parametrach w porównaniu do metod grawimetrycznej i sejsmicznej. Często pozwala to na uzyskanie korzystniejszego obrazu stref osłabienia.



Rys. 4. a) Widok pustek i stref rozluźnień na obrazie georadarowego profilowania pionowego na terenie historycznej, płytkiej eksploatacji rud cynku i ołowiu k. Piekar Śl.; (Pilecki, 2014);

b) Charakterystyczny obraz krzywej dyspersji dla fali Rayleigha: (górny rysunek) ośrodek bez strefy osłabienia; (dolny rysunek) ośrodek ze strefą osłabienia w przypadku obecności szybiku w rejonie Bytomia (kolory oznaczają amplitudę mody od 0 do 100 % od najmniejszej (czerwona) do największej (niebieska))

Podsumowanie

Nieciągłe deformacje na powierzchni terenu górniczego i pogórniczego są najczęściej efektem obecności pustek i stref rozluźnień na niewielkiej głębokości wytworzonych w wyniku dokonanej płytkiej eksploatacji górniczej. Większość deformacji związana jest z istniejącymi w górotworze pustkami, które mogą utrzymywać się przez dłuższy czas. Jeśli powstaną odpowiednie warunki, pustka zaczyna przemieszczać się ku górze i może spowodować powstanie nieciągłej deformacji na powierzchni terenu. Dynamika tego procesu zależy od wielu lokalnych warunków, a jednym z nich jest obecność odpowiednio dużej pustki, zdolnej pomieścić przemieszczający się materiał skalny i gruntowy.

W metodyce badań geofizycznych przyjmuje się, że podstawową metodą są pomiary mikrograwimetryczne (Pilecki, 2018). Wyniki pomiarów grawimetrycznych najczęściej są korelowane z wynikami pomiarów metodą sejsmiczną, lub metodą georadarową/elektrooporową. Anomalie geofizyczne należy zweryfikować wierceniami badawczymi oraz badaniami otworowymi, w tym georadarem otworowym dla potwierdzenia występowania pustek oraz innych nieciągłości w górotworze. Wyniki wierceń kontrolnych i badań otworowych są podstawą wnioskowania o potrzebie wykonania prac uzdatniających podłoże.

Literatura

- [1] Chudek M., Janusz W., Zych J., 1988: Studium dotyczące stanu rozpoznania tworzenia się i prognozowania deformacji nieciągłych pod wpływem podziemnej eksploatacji złóż. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, z. 141, Gliwice.
- [2] Fajkiewicz Z., 1956: O podziemnych pomiarach grawimetrycznych w zastosowaniu do górnictwa węglowego. Archiwum Górnictwa t.1, z.4, 345-355.
- [3] Fajkiewicz Z., 1967: Zastosowanie metod geofizycznych do wykrywania uskoków i pustek w górotworze. Ochrona Terenów Górniczych nr 2, 11-26.
- [4] Fajkiewicz Z., 2001: Znaczenie badań geofizycznych w procesie przywracania wartości użytkowych terenom naruszonym dokonaną eksploatacją górniczą. Mat. Warsztatów Górniczych 2001, Wyd. IGSMiE PAN, Kraków, 45-86.
- [5] Goszcz A., 1996: Powstawanie zapadlisk i innych deformacji nieciągłych powierzchni na obszarach płytkiej eksploatacji górniczej. Mat. Konf.: Szkoła Eksploatacji Podziemnej '96. Wyd. CPPGSMiE PAN, Kraków, 119-137.
- [6] Krawiec K., Pilecki Z., 2012: Numeryczna symulacja procesu zapadliskowego w warunkach geologicznych i górniczych niecki bytomskiej na terenie pogórnicznym płytkiej eksploatacji złóż rud metali. Technika Poszukiwań Geologicznych 1, 47-62.
- [7] Marcak H., Pilecki Z., 2006: Some Geophysical and Geomechanical Remarks on Recognition Sinkhole Processes in Post-Mining Areas. Proc. 12th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics. 4-6 September 2006, Helsinki, Finland.

- [8] Pilecki Z., 2014: Uzdatnienie podłoża autostrady A-1 na terenach pogórnich płytkiej eksploatacji rud metali. *Studia, Rozprawy Monografie 184*. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- [9] Pilecki Z., 2018: Geophysical identification of voids and loosened zones in the shallow subsurface of post-mining areas. *E3S Web of Conferences 66*, 01001 (2018), <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186601001>.
- [10] Pilecki Z., Kotyrba A. 2007: Problematyka rozpoznania deformacji nieciągłych dla potrzeb projektowania konstrukcji drogowych na terenie płytkiej eksploatacji rud metali. *Prace Naukowe GIG Nr III/2007*, 379-392.
- [11] Pilecki Z., Krawiec K., Pilecka E., Kotyrba A., Tomecka-Suchoń S., Łątka T., 2021: Identification of buried historical mineshaft using ground-penetrating radar. *Engineering Geology 294* (2021) 106400. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106400>.
- [12] Popiołek E., Pilecki Z. (red.), 2005: Ocena przydatności do zabudowy terenów zagrożonych deformacjami nieciągłymi za pomocą metod geofizycznych. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków 2005.
- [13] Sałustowicz A., 1968: *Zarys mechaniki górotworu*. Wyd. Śląsk, Katowice.
- [14] Strzałkowski P., 2015: Mathematical model of forecasting the formation of sinkhole using Sałustowicz theory. *Archives of Mining Science vol. 60* (2015), no. 1, 63-71.
- [15] Whittaker B.N., Reddish D.J., 1993: Subsidence behaviour of rock structure, in: *Comprehensive rock engineering – principles, practice and projects*, J.A. Hudson ed., Pergamon Press, Oxford, New York.