

Elżbieta Pilecka¹
Mirosława Bazarnik²

ZNACZENIE ROZPOZNANIA GEOLOGICZNO-GEOFIZYCZNEGO W CELU UTRZYMANIA STATECZNOŚCI PODŁOŻA TRAS KOLEJOWYCH

Streszczenie

W artykule zwrócono uwagę na znaczenie projektowania i wykonywania badań geologicznych ze szczególnym uwzględnieniem metod geofizycznych rozpoznania podłoża gruntowego przy realizacji posadowień obiektów infrastruktury kolejowej. Przedstawiono przykłady wykorzystania metod geofizycznych do lepszego rozpoznania warunków geologiczno - inżynierskich dla ochrony tras kolejowych. Prezentowane przykłady dotyczą rozpoznania deformacji nieciągłych na terenach górniczych stwarzających ogromne ryzyko dla bezpiecznej eksploatacji linii kolejowych.

Słowa kluczowe: deformacje nieciągłe, stateczność podłoża tras kolejowych

1. Wstęp

Usytuowanie tras kolejowych na terenach o złożonych warunkach geologiczno-inżynierskich np. terenach osuwiskowych, gruntach słabonośnych, czy w zasięgu wpływów eksploatacji górniczej może spowodować utratę stateczności podłoża. Wymusza to konieczność prawidłowego rozpoznania podłoża gruntowego, które zostanie uwzględnione w projekcie wykonania budowli z zastosowaniem odpowiednich sposobów wzmocnienia podłoża i zabezpieczenia samej budowli.

¹ dr hab. inż.; Politechnika Krakowska, e-mail: epilecka@pk.edu.pl

² dr. inż.; Politechnika Krakowska, e-mail: mbazarnik@pk.edu.pl

Skomplikowana budowa geologiczna oraz specyfika transportu kolejowego generującego duże obciążenia dynamiczne przekazywane na podłoże wymaga stosowania specjalnych metod rozpoznania i oceny podłoża, a także wprowadzania nowych technologii posadowień.

W artykule zwrócono uwagę na znaczenie projektowania i wykonywania badań geologicznych ze szczególnym uwzględnieniem metod geofizycznych rozpoznania podłoża gruntowego przy realizacji posadowień obiektów infrastruktury kolejowej. Wzajemne dopełnienie metod stwarza możliwość dokładnego rozpoznania ośrodka gruntowo-skalnego, oraz analizy zmian zachodzących w ośrodku skalnym lub obiekcie infrastruktury w trakcie eksploatacji.

2. Badania geologiczne

Badania geologiczne (jako podstawowe) prowadzone są metodami wierceń punktowych oraz sondowań geotechnicznych, których ujemną stroną jest inwazyjność i wyrywkowy charakter uzyskanych informacji. Dla obiektów liniowych, jakimi są szlaki komunikacyjne, powszechne staje się wykorzystanie metod geofizycznych, jako uzupełnienia prac geologiczno-inżynierskich. Szczególnie przy projektowaniu linii kolejowych na terenach zagrożonych występowaniem gruntów słabonośnych oraz deformacji nieciągłych wynikających z obecności np. nieudokumentowanych pustek pogórnicych i krasowych.

Przed przystąpieniem do określenia stopnia złożoności warunków geologiczno-inżynierskich podłoża, oraz ustalenia kategorii geotechnicznej zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 24 września 1998 r. (Dz. U. nr 126 poz. 839), należy określić wyraźnie cel i zakres prac geologicznych.

Cel oraz zakres prac geologicznych powinien uwzględniać wymagania techniczno-budowlane, parametry ekonomiczne, analizę obecnego stopnia rozpoznania geologicznego podłoża, stopnia złożoności podłoża oraz zagrożeń (np. obecność uskoków, krasu, pustek poeksploatacyjnych), rozmiar lokalizowanego obiektu, a także wymaganą dokładność i głębokość rozpoznania. Rodzaj prac polowych prowadzących do ustalenia parametrów geotechnicznych podłoża pod konstrukcję budowli kolejowej ustala się w oparciu o wstępne rozpoznanie warunków geologiczno-inżynierskich terenu. Podstawą rozpoznania jest przeprowadzenie:

- 1) Analizy materiałów archiwalnych, takich jak:
 - a) karty otworów wiertniczych (geologiczne, geologiczno-inżynierskie, hydrogeologiczne, surowcowe i inne),
 - b) dokumentacje geologiczne (geologiczno-inżynierskie, hydrogeologiczne, surowcowe),
 - c) techniczne badania podłoża gruntowego, dokumentacje geotechniczne, opinie, ekspertyzy dotyczące przedmiotu badań,
 - d) mapy geologiczne (geologiczne, hydrogeologiczne, geologiczno-inżynierskie, surowcowe, geomorfologiczne, sozologiczne),
 - e) publikacje naukowe,
 - f) mapy topograficzne;
- 2) Wizji lokalnej terenu, interpretacji zdjęć lotniczych lub satelitarnych (szczególnie przy wyborze przebiegu trasy linii kolejowej);
- 3) Kontrolnego badania ręcznymi sondami penetracyjnymi do głębokości 3,0÷5,0 m, sondami rdzeniowymi do głębokości 10,0 m;
- 4) Obserwacji i pomiarów dotyczących wód gruntowych i powierzchniowych.

Po wstępnym rozpoznaniu terenu i ustaleniu zakresu prac, przystępuje się do wykonania badań podstawowych (Rybak i Stilger-Szydło 2010), uwzględniających rozpoznanie podłoża na odcinkach:

- wykopów (dotyczy to oceny trudności w odspajaniu gruntu, stateczności skarp, wykorzystania gruntów do robót ziemnych);
- nasypów (zwłaszcza posadowionych na gruntach ściśliwych i słabonośnych);
- występowania osuwisk w strefie bezpośredniego oddziaływania obciążeń nawierzchni kolejowej)

Podstawowymi badaniami polowymi są profilowania geologiczne prowadzone dla wszystkich odsłoneń naturalnych oraz tzw. wyrobisk badawczych zwanych punktami obserwacyjnymi.

Wyrobiska w zależności od warunków geologicznych wykonuje się w postaci: odkrywek, szybków, wykopów, wierceń, dołów próbnych, sond penetracyjnych, sond rdzeniowych. Wszystkie wyrobiska badawcze należy wytyczyć w terenie metodami geodezyjnymi zgodnie z rozporządzeniem dotyczącym zasad sporządzania dokumentacji geologiczno-inżynierskiej (Bażyński i in. 1999).

Liczba podstawowych punktów obserwacyjnych i ich usytuowanie w terenie zależą od stopnia złożoności budowy podłoża oraz obciążenia

ruchem. W przypadku obszarów o bardziej skomplikowanej budowie geologicznej np. stref zaburzeń glaciektonicznych, terenów osuwiskowych, oraz zjawisk krasowych i stref krawędziowych dolin rzecznych, występowania cienkich warstw gruntów o zmiennym układzie, przewarstwień lub soczewek gruntów ściśliwych, zwiększa się ilość wyrobisk o tzw. wyrobiska pomocnicze. Głębokość otworów badawczych determinowana jest wartością obciążeń przekazywanych na podłoże oraz rodzajem budowli i warunkami gruntowymi.

Punkty obserwacyjne powinny umożliwić wydzielenie warstw geotechnicznych z dokładnością odpowiadającą wymaganiom wynikającym z obliczeń projektowych.

Przyjmuje się następujące wymagania minimalne (PN-B-02479):

- 1) Dla obiektów liniowych rozstaw punktów obserwacyjnych nie powinien przekraczać 100 m - w przypadku prostych oraz 50 m w przypadku złożonych warunków gruntowych. Jeżeli podczas badań stwierdzone zostanie występowanie gruntów słabych, mogących wpływać w istotny sposób na wartości osiadań i nośności podłoża, liczbę punktów badawczych należy zwiększyć tak, aby można było jednoznacznie ustalić rozciągłość i miąższość warstw geotechnicznych obejmujących te grunty. W przypadku lokalizacji projektowanych budowli w bezpośrednim sąsiedztwie budowli istniejących, należy wykonać odkrywki istniejących fundamentów w celu określenia ich stanu, rodzaju, wymiarów i głębokości posadowienia. A następnie zbadać możliwość wzajemnego niekorzystnego oddziaływania nowych i starych budowli.
- 2) Wiercenia i sondowania powinny obejmować sferę podłoża, w której właściwości gruntów mają istotny wpływ na projektowanie, wykonywanie i eksploatację budowli. W obszarach występowania gruntów antropogenicznych głębokość zależy od ich miąższości, ściśliwości i strefy oddziaływania budowli. Należy ustalić również miąższość nasypów.
- 3) W uzasadnionych przypadkach, np. gdy dane geologiczne lub wcześniejsze badania wskazują na występowanie warstw o dużej nośności i miąższości - głębokość badań można ograniczyć do poziomu około 0,5 m poniżej stropu warstwy nośnej występującej w podłożu.
- 4) W czasie wykonywania prac terenowych konieczne jest bieżące analizowanie wyników. W przypadku stwierdzenia istotnych róż-

nic budowy geologicznej w porównaniu z przewidywaną w programie badań, zakres badań należy uaktualnić, a nawet zmienić kategorię geotechniczną.

Podstawową metodą profilowania wyrobisk są badania makroskopowe skał i gruntów na podstawie których wydziela się warstwy i określa profil wyrobiska. Następnie w oparciu o badania laboratoryjne pobranych próbek określa się parametry geotechniczne.

W konsekwencji przeprowadzone badania podstawowe prowadzą do określenia szczegółów budowy geologicznej a przede wszystkim:

- litologii, biegu i upadu warstw skalnych,
- jakościowego i ilościowego określenia szczelinowatości skał podłoża (szczególnie w przypadku płytkiego występowania skał litych),
- określenia profilu wietrzeniowego skał,
- ustalenia przebiegu stref poślizgu na obszarach zagrożonych wystąpieniem osuwisk,
- określenia właściwości fizycznych i mechanicznych skał oraz gruntów,
- ustalenia warunków hydrogeologicznych (obecności powierzchniowych cieków wodnych, oraz ustalenie aktualnego stanu wód gruntowych jak również zmianę poziomu lustra wód w zależności od pory roku).

Opracowanie profilu otworu wiertniczego przedstawiane jest w postaci karty dokumentacyjnej, w której poza geologicznym profilem słupkowym, opisem litologicznym, informacjami dotyczącymi genezy i stratygrafii, podaje się dane dotyczące warunków hydrogeologicznych, cech fizyczno-mechanicznych gruntów, charakteru i głębokości pobrania próbek, przebiegu wiercenia.

Kolejnym etapem prac geologicznych jest kartowanie geologiczno-inżynierskie mające na celu odwzorowanie przestrzenne warunków geotechnicznych w postaci mapy oraz przekroi geologiczno-inżynierskich.

- 1) Mapy zestawiane są na podkładzie topograficznym, o dokładności uzależnionej od liczby punktów badawczych. Mapy geologiczno-inżynierskie, mogą być opracowywane na różnych głębokościach od powierzchni terenu (np. 1,5 m, 2 m, 3 m, itp.).
- 2) Przekroje geologiczno-inżynierskie ilustrują budowę geologiczną, warunki hydrogeologiczne i układ wydzielonych warstw. Zwykle sporządzone na podstawie wierceń. Z punktu widzenia obliczeń

stateczności skarp najkorzystniejsze jest wykonanie przekroju w skali 1:1, gdzie skala pionowa odpowiada skali poziomej.

3. Badania geofizyczne

W przypadku terenów o skomplikowanej budowie geologicznej wyżej opisane procedury badań są niewystarczające ze względu na punktowy charakter otrzymywanych informacji. Niezbędne staje się zastosowanie metod geofizycznych pozwalających uzyskać ciągle odwzorowanie zmian strukturalnych oraz parametrów geomechanicznych w badanym ośrodku, bez konieczności wykonywania dodatkowych robót geologicznych takich jak: wiercenia, sondowania czy odkrywki.

Zakres możliwości stosowania badań geofizyczny jest dosyć szeroki obejmuje wyznaczanie: granic geologicznych, warstw wietrzenia oraz głębokości podłoża, zapadlisk, pustek, krasu, kawern, uskoków, stref spękań i osłabienia, zwierciadła wód gruntowych, urabialności skał, zmian zagęszczenia ośrodka i osiadań gruntu, płaszczyzn poślizgu, parametrów geomechanicznych: dynamicznego modułu sprężystości E_d i współczynnika Poissona, a na ich podstawie dynamicznych modułów: sprężystości postaciowej G_d i objętościowej K_d .

Do bezinwazyjnych metod ciągłych, które oferuje geofizyka należą min. metody:

- 1) elektrooporowe,
- 2) sejsmiczne,
- 3) georadarowe,
- 4) elektromagnetyczne,
- 5) grawimetryczne.

Metoda elektrooporowa wykorzystuje zmiany oporności właściwej badanego ośrodka, wywołane przez obiekty pochodzenia naturalnego lub antropogenicznego.

Badania mogą być wykonywane technikami:

- tomografii elektrooporowej 2D ERT,
- sondowania elektrooporowego 1D SGE,
- profilowania elektrooporowego 1D.

Wyniki badań elektrooporowych przedstawiane są w formie pionowych profili, przekrojów i map zmian oporności z interpretacją geofizyczną lub geologiczno - inżynierską.

Metoda elektrooporowa (geoelektryczna) daje możliwość określenia:

a) granic:

- między warstwami zróżnicowanymi litologicznie,
- stref zawodnionych, - oddzielających strefy różnego stanu wie-

trzenia,

- między podłożem a nadkładem,

b) stref uskokowych, osłabienia, osuwiskowych (przebieg powierzchni poślizgu),

c) określenia właściwości mechanicznych.

Metoda sejsmiczna bazuje na zmianach parametrów sprężystych badanego ośrodka i jest wykonywana technikami pomiarowymi:

a) refrakcyjną,

b) wielokanałowej analizy MASW 1D/2D,

c) tomografii refrakcyjnej.

Wyniki badań sejsmicznych przedstawiane są w formie przekrojów i map sejsmicznych wraz z interpretacją geologiczno - inżynierską.

Badania metodą sejsmiczną oparte są na pomiarze i analizie sztucznie wygenerowanych fal sejsmicznych w ośrodku skalnym. Każda zmiana w budowie ośrodka oraz jego właściwościach (np. spękania, zwietrzenie, uskoki, zmiana gęstości i parametrów sprężystych: moduł Younga, współ. Poissona) wpływa na zmianę parametrów fal sejsmicznych.

Metoda sejsmiczna może być stosowana do lokalizacji i określenia:

- stropu niezwiertzałego litego masywu skalnego np. granitu, wapieni, dolomitów, diabazów w kamieniołomach,

- granic oddzielających strefy/warstwy o różnym stopniu zwietrzenia,

- stref uskokowych, stref spękań i osłabienia,

- pustek górniczych, kawern i zapadlisk, nieczynnych szybów, szybków, chodników, sztolni

- zwierciadła wód gruntowych,

- rozpoznania stref osuwiskowych, a zwłaszcza przestrzennego odwzorowania głębokości i przebiegu powierzchni poślizgu,

- parametrów geomechanicznych np. dynamicznych modułów sprężystości (modułu ścinania G_0); dynamicznego współczynnika Poissona, anizotropii spękań, na bazie wartości prędkości fal sprężystych,

- wstępnej oceny klas geomechanicznych górotworu np dla potrzeb budownictwa tunelowego

Ciągłe profilowania nadkładu i podłoża pozwala skorelować informacje otrzymane z otworów wiertniczych, a także umożliwia określenie parametrów geomechanicznych i klas jakości górotworu. Również podczas eksploatacji tuneli stosuje się geofizyczne badania sejsmiczne do oceny wzajemnego oddziaływania pomiędzy masywem skalnym a obudową tunelu. Metody sejsmiczne mogą być także wykorzystywane do wykrywania stref osłabienia przy budowie tuneli oraz oceny destrukcji górotworu w strefie oddziaływania robót tunelowych.

Metoda georadarowa (GPR) wykorzystuje zmiany parametrów elektrycznych ośrodka. Odzworowuje szczegółowo strukturę ośrodka do kilkunastu metrów głębokości. Wyniki badań georadarowych przedstawiane są w formie przekrojów głębokościowych z interpretacją geofizyczną lub geologiczno - inżynierską.

GPR stosuje się min. w problematyce diagnostyki nawierzchni. Metoda georadarowa pozwala na szybką i efektywną ocenę stanu technicznego nawierzchni i podbudowy szlaków kolejowych, pasów startowych, płyt postojowych lotnisk, autostrad, dróg, mostów, itp. Badania takie dostarczają w sposób ciągły i nieinwazyjny szczegółowych informacji o strukturze ośrodka pod kątem ciągłości granic geotechnicznych oraz występujących defektów w warstwach konstrukcyjnych.

Metoda georadarowa znajduje zastosowanie przy:

- identyfikacji ciągłości płyt betonowych,
- oceny grubości warstw bitumicznych (asfaltowych) na drogach,
- oceny miąższości jednocześnie wielu warstw podbudowy,
- monitoringu w czasie zachodzących zmian podczas eksploatacji warstwach nawierzchni i podłoża,
- określeniu mieszania się warstw podbudowy,
- ocenie konstrukcji żelbetowych i murowych,
- obrazowaniu osiadań, zagęszczenia,
- lokalizacji podcieków, wymycia, sufozji pod nawierzchnią,
- identyfikacji pustek, stref wybić, pęknięć, szczelin,
- kontroli jakości w budownictwie (zbrojenie płyt, posadowienie posadzek).

Geofizyczne badania georadarowe dla obiektów liniowych takich jak szlaki kolejowe mają na celu rozpoznanie zmian w miąższości tuczni, podsypki oraz wszelkich zmian strukturalnych w podtorzu i podłożu nasypów kolejowych. Badania takie są bardzo szybkie, nieinwazyjne oraz niewymagające reorganizacji ruchu kolejowego w trakcie ich wy-

konywania. W zależności od celu pomiarów badania są wykonywane w osiach torów oraz w półkach i poboczach. Pomiarów są wykonywane w klasyczny sposób w formie profilowania po powierzchni, a także poprzez zamontowaną na drezynach lub lokomotywach aparaturę pomiarową. W zależności od charakteru prac badawczych wykonuje się:

- Profilowania georadarowe – wzdłuż linii tyczonych w terenie, dla celów rozpoznania geologicznego lub geotechnicznego. Przekroje georadarowe wykorzystuje się do interpretacji geologiczno-inżynierskiej korelując badania punktowe pochodzące z wierceń geotechnicznych.
- Mapowania georadarowe - mają na celu stworzenie map głębokościowych. Wykonuje się wówczas szereg profili równoległych, które po złożeniu w bryłę geometryczną ukazują przestrzenny obraz 3D badanego obszaru. Badania stosuje się do okonturowań zanieczyszczeń lub wycieków. Technika ta doskonale nadaje się do rozpoznawania sieci infrastruktury podziemnej oraz określania lokalizacji obiektów takich jak: pustki pogórnice i krasowe, tunele, płytkie wyrobiska górnicze i innych rodzajów struktur podziemnych (kanały, kolektory, zbiorniki, betonowe płyty i kolumny, fundamenty, pale itp.),
- Badanie struktur mostów, wiaduktów, stropów i murów;
- Diagnostykę nawierzchni i podłoża linii kolejowej, drogi;
- Ocenę rozmieszczenia warstw podkładowych np. żwiru;
- Wykrywanie zapadlisk i osiadań;
- Klasyfikację podłoża, rozwarstwienia i segmentacja pokładów;
- Analizę położenia zwierciadła wód gruntowych;
- Płytkie analizy litologiczne i stratygraficzne;
- Charakterystykę systemu ścięć i spękań skał i betonu;
- Profilowanie warstw wodoszczelnych;
- Badanie terenów przemysłowych i skażonych.

Badania elektromagnetyczne EM (Electromagnetic Methods) w formie dipolowych profilowań indukcyjnych polegają na analizie przewodności elektrycznej ośrodka. Zasada działania polega na wzbudzeniu (wyindukowaniu) przez nadajnik pierwotnego pola elektromagnetycznego. Generuje ono wtórne pole elektromagnetyczne w badanym ośrodku, które jest proporcjonalne do przewodnictwa ośrodka. Reaguje ono na zmiany litologii, wody podziemne czy zanieczyszczenia.

Na podstawie pomiarów zostaje opracowana powierzchniowa mapa przewodności z okonturowanymi anomaliami, która jest podstawą interpretacji geologicznej i inżynierskiej.

Metoda elektromagnetyczna techniką indukcyjną jest wykorzystywana do:

- okonturowania obszaru występowania zanieczyszczenia wody gruntowej (aureoli skażeń),
- poszukiwanie wody gruntowej,
- lokalizacji przecieków grobli, tam i kanałów,
- stwierdzenia korozji
- lokalizacji kabli elektrycznych.

Badania grawimetryczne bazują na zmienności pola grawitacyjnego Ziemi, w zależności od jej budowy. Istotą metody jest to, że każda niejednorodność w rozkładzie gęstości ośrodka skalnego generuje swoje własne pole grawitacyjne. Tym samym rozkład wartości siły ciężkości uzależniony jest przede wszystkim od różnicy gęstości objętościowych skał ją budujących oraz otoczenia. Rozkład ten zależy także od rozmiarów, kształtu i głębokości występowania tej niejednorodności (inaczej ciała zaburzające). Takimi ciałami są np. różne struktury geologiczne i formy antropogeniczne jak: uskoki, pustki, wymycia i deformacje nieciągłe powierzchni terenu. Zastosowanie metody w wersji inżynierskiej zwanej mikrogravimetrią daje szczególnie pozytywne rezultaty w wykrywaniu pustek występujących w górotworze wraz z prognozowaniem ich ekspansji ku powierzchni terenu i zagrożeniu powstawaniem deformacji nieciągłych w postaci lejów zapadliskowych i progów. W rejonach występowania takich pustek i stref spękań i rozluźnień generowane są ujemne anomalie grawimetryczne.

Badania grawimetryczne wykonywane są najczęściej w wersji:

- zdjęć profilowych,
- zdjęć powierzchniowych.

Wynikiem badań grawimetrycznych jest mapa rozkładu anomalii siły ciężkości w redukcji Bouguera oraz mapa anomalii resztkowych. Metoda mikrogravimetryczna jest powszechnie wykorzystywana do:

- oceny zagrożenia powierzchni deformacjami na terenach pogórnich,
- wykrywania „wędrujących” pustek naturalnych i antropogenicznych,
- lokalizacji uskoków,
- lokalizacji podziemnych tuneli i korytarzy.

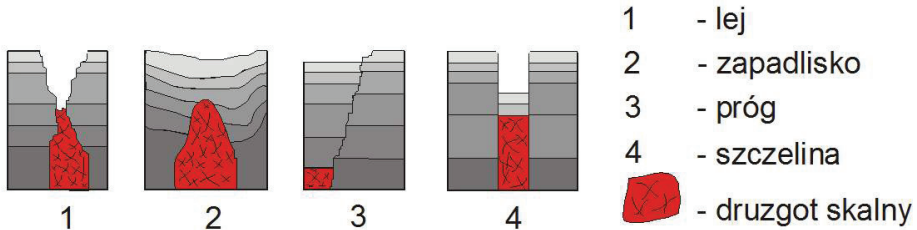
Niewątpliwą zaletą nieniszczących metod geofizycznych (czasem nazywanych NDT - Non Destructive Testing) jest fakt, iż są to badania bezinwazyjne, o wysokiej dokładności, pozwalające na ciągłe rozpoznanie ośrodka. Ponadto relatywnie niski koszt wykonania badań, szybkość prowadzonych pomiarów oraz duża wydajność sprawiają, że zyskują coraz większą popularność. Od kilkunastu lat badania geofizyczne metodami elektrooporową, sejsmiczną i georadarową są wskazywane w różnych krajowych rozporządzeniach, instrukcjach, wytycznych jako narzędzie do rozpoznania struktury gruntów i skał dla potrzeb budownictwa przemysłowego. Przykładowo w „Instrukcji Badań Podłoża Gruntowego Budowli Drogowych i Mostowych” (Instytut Badawczy Dróg i Mostów Warszawa 1998 r.), w budowie tuneli badania sejsmiczne są wskazane jako umożliwiające określenie geologicznych elementów strukturalnych jak: strefy spękań, uskoki, itp. W trakcie budowy tunelu geofizyczne metody: sejsmiczna akustyczna elektrooporowa i pomiarów temperatury pozwalają na wydzielenie stref osłabień w górotworze a także stref naprężeń i stref krążenia wód podziemnych. Ponadto badania geofizyczne znajdują praktyczne zastosowanie w analizie stateczności skarp i nasypów pod kątem określenia płaszczyzn poślizgu, dotyczy to również obszarów zagrożonych ruchami osuwiskowymi. Pozwalają na ocenę zagrożenia związanego z obecnością stref osłabienia podłoża, rozpoznanie ciągłości pokładów, ocenę zagrożenia tąpnięciami, podziemnymi pustkami będącymi np. efektem płytkiej eksploatacji górniczej czy występowaniem zjawisk krasowych.

4. Przykłady wykorzystanie metod geofizycznych dla ochrony tras kolejowych

Przykładów wykorzystania metod geofizycznych do lepszego rozpoznania warunków geologiczno - inżynierskich dla ochrony tras kolejowych można znaleźć bardzo wiele. Najbardziej przemawiające są przykłady z terenów górniczych, gdzie można spotkać się z deformacjami nieciągłymi.

Aktualnie nie ma alternatywy dla badań geofizycznych w zastosowaniu do wykrywania i prognozowania zagrożeń wynikających z deformacji nieciągłych w środowisku skalnym. Deformacje niecią-

głe występują w formie: lejów, progów, szczelin i zapadlisk (rys. 1). Teoretycznymi rozważaniami omawiającymi procesy geomechaniczne prowadzące do powstania w górotworze deformacji nieciągłych zajmowało się w kraju i na świecie wielu badaczy szeroko cytowanych w pracy (Kwiatek 1997). W Polsce, tym zagadnieniem od strony rozważania geofizycznego, najszerzej zajmowali się Fajkiewicz (19825, 1992, 2008), Goszcz (1985, 1996), Marczak (1999), Pilecki (2002), Pilecki i Kotyrba (2007).



Rys. 1. Formy deformacji nieciągłych (Goszcz 1996)

Deformacje nieciągłe mogą propagować ku powierzchni terenu, stwarzając ogromne zagrożenie dla infrastruktury powierzchniowej. Zastosowanie metod geofizycznych pozwala na wykrywanie deformacji nieciągłych oraz prognozowanie możliwości ich wystąpienia w najbliższym czasie. Szczególnie ważne jest to w kontekście ochrony tras kolejowych na terenach górniczych i pogórnich.

Do najbardziej efektywnych z punktu widzenia oceny zagrożenia deformacjami nieciągłymi należy zaliczyć metody: grawimetryczną, sejsmiczną, elektrooporową i georadarową. W warunkach rozpoznania za pomocą otworów badawczych przydatne mogą też być metody geofizyki otworowej.

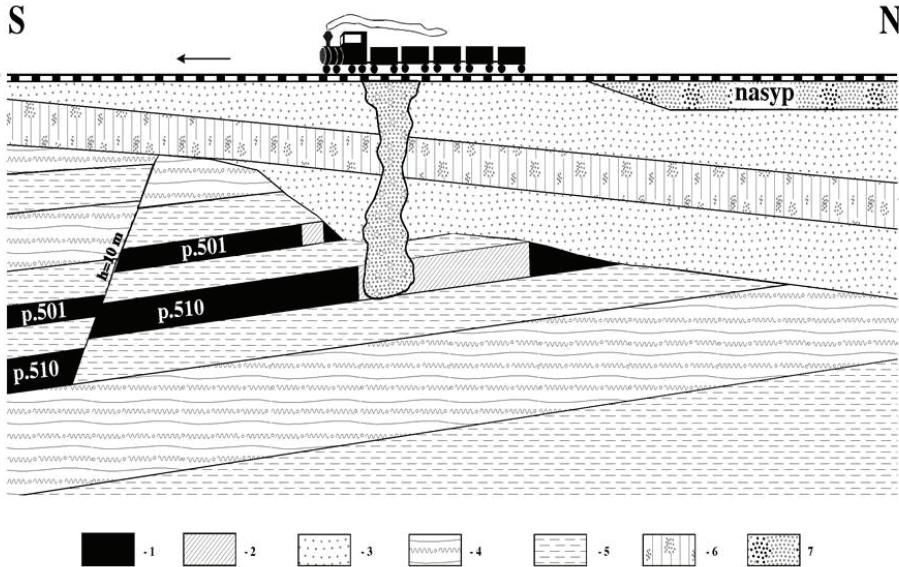
Najwięcej problemów związanych z zagrożeniem deformacjami nieciągłymi stwarza eksploatacja prowadzona z pozostawieniem pustych, nie podsadzonych i nie zawalonych wyrobisk poeksploatacyjnych. Okres i miejsce wystąpienia deformacji nieciągłych są trudne do przewidzenia. Obserwowane deformacje występowały zarówno w krótkim czasie po eksploatacji jak i po 100 latach i więcej. Obecność w górotworze nie podsadzonej pustki, stwarza stałe, nieokreślone w czasie, zagrożenie terenu, grożące często wypadkami. Znaczna ilość takich płytkich starych wyrobisk górniczych

np. w rejonach płytkiej eksploatacji rud żelaza w okolicach Bytomia i Tarnowskich Gór nie jest udokumentowana na istniejących, dostępnych mapach.

O typie deformacji i jej wymiarach decyduje zespół czynników geologiczno-górnicznych, zwłaszcza zawodnienie skał i związany z nim proces sufozji. Szczególnie niebezpieczny stan powstaje wówczas, gdy występuje podziemny przepływ wody i istnieje możliwość infiltracji tych wód do zrobów. Pustka poeksploatacyjna może zostać wypełniona wodą, która pełni rolę podsadzki. Jeżeli jednak pustka taka zostanie odwodniona, np. na skutek prowadzonych w pobliżu prac górniczych, wówczas może zostać uruchomiony proces sufozji oraz postępujący proces zniszczenia w górotworze (Goszcz 1996). Wpływ oddziaływania wody jest częstą przyczyną reaktywacji starych pustek w górotworze. Dotyczy to także pustek częściowo lub nawet całkowicie podsadzonych materiałem drobnoziarnistym lub ilastym. Materiał ten może ulegać wymywaniu wskutek migracji wód poprzez szczeliny górotworu i stare zroby. Wymywanie materiału ze szczelin w górotworze, może być także przyczyną aktywacji uskoków, a w efekcie tworzenia się nieciągłych deformacji na powierzchni terenu.

Odrębnym zagadnieniem, związanym z oddziaływaniem wody jest zjawisko infiltracji wód w głąb górotworu przez szczeliny powstałe nad eksploatacją. W ten sposób nawet stosunkowo głęboko prowadzona eksploatacja może być przyczyną powstania pustki położonej znacznie wyżej od poziomu prowadzenia robót górniczych. Pustki takie mogą ulegać zawałom. W przypadku ich płytkiego zalegania skutki zawałów mogą ujawnić się na powierzchni również w postaci deformacji nieciągłych.

Skuteczne zastosowanie metod geofizycznych dla ochrony linii kolejowych można pokazać na przykładzie rejonu Mieszko w Mysłowicach, przez który biegnie linia kolejowa z Muchowca do Sosnowca i Zawiercia (Fajkiewicz 2008). W dniu 8 września 1968 roku powstało tam katastrofalne zapadlisko terenu pod linią kolejową. Na rys. 2 przedstawiono przekrój geologiczny biegnący wzdłuż linii kolejowej przedstawiający hipotetyczny przebieg powstania zapadliska (Rosikoń 1979).



Rys. 2. Przekrój geologiczny wykonany w płaszczyźnie pionowej szlaku kolejowego Muchowiec-Zawiercie. Rejon Mieszko, KWK Myslowice (Fajkiewicz i in. 1997)

1 – węgiel, 2 – stare zroby, 3 – piasek, 4 – piaskowiec, 5 – łupek, 6 – , glina, 7 – nasyp

Linia kolejowa przechodzi przez obszar górniczy Kopalni Węgla Kamiennego „Mysłowice”. W rejonie tym w latach 1893-1896 prowadzona była eksploatacja pokładów węgla kamiennego 501 i 510. W wyniku prowadzonej eksploatacji pozostały w nich niezlikwidowane krawędzie, wyrobiska i pustki poeksploatacyjne. Taki stan rzeczy spowodował utratę stateczności podłoża linii kolejowej. Mimo przeprowadzonych prac wiertniczo-podsadzkowych w roku 1970 nastąpiła reaktywacja tego zapadliska. Zwiększyła się jego średnica do 20 m i zniszczony został budynek nastawni przylegający do tej linii (rys. 3). Zapadlisko pierwsze oznaczono literami Z-1. Prawie w tym samym czasie powstało zapadlisko Z-2. Usytuowanie obu zapadlisk przedstawione jest na rys. 4.

W całym okresie formowania się tych zapadlisk trwały intensywne prace wiertniczo-podsadzające, zabezpieczające eksploatację szlaków kolejowych, o czym bliżej mowa w pracy Rosikon (1979).

Badania geofizyczne, prowadzone dla wykrywania występujących w górnictwie pustek i stref rozluźnień masywu skalnego oraz później w celu potwierdzenia ich stopnia podsadzenia, miały tu szczególne znaczenie.



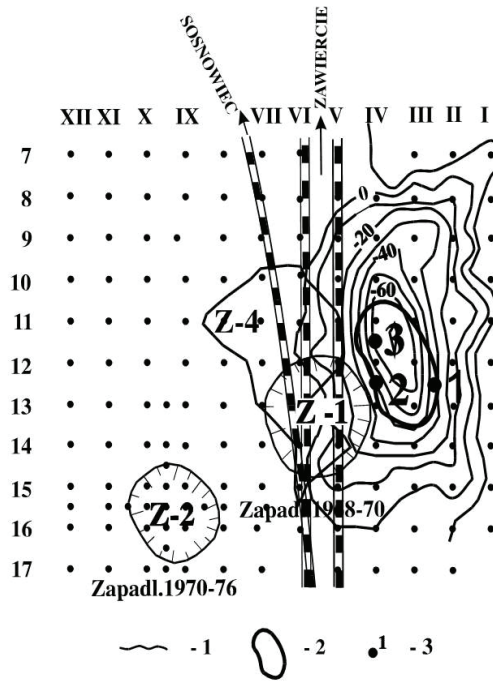
Rys. 3. Zapadlisko pod torami linii kolejowej Muchowiec-Zawiercie, powstałe w 1968 roku na posterunku odgałęźnym Mieszko KWK Mysłowice (fot. F.Grabowski w (Fajklewicz 2008))

W latach 1970-77 w omówionym rejonie wykonywane były głównie prace sejsmiczne i elektrooporowe, które od roku 1978 zastąpione zostały badaniami grawimetrycznymi, w ujęciu metody mikrograwimetrycznej. Osiągnięte wyniki tą metodą w latach 1978 i 1980, potwierdzone wierceniami wskazywały na możliwość śledzenia pustek powydobywczych ku powierzchni terenu (Fajklewicz 1982).

Od roku 1983 badania mikrograwimetryczne w przedmiotowym rejonie, prowadzone są w sposób systematyczny, początkowo – czterokrotnie w roku, a potem dwukrotnie. Ich celem było prognozowanie możliwości wystąpienia deformacji nieciągłych powierzchni terenu w wyniku ekspansji pustek poeksploatacyjnych, a tym samym w celu ochrony bezpiecznej eksploatacji szlaków kolejowych, oraz wyeliminowaniem kosztów związanych z usuwaniem skutków tego rodzaju awarii.

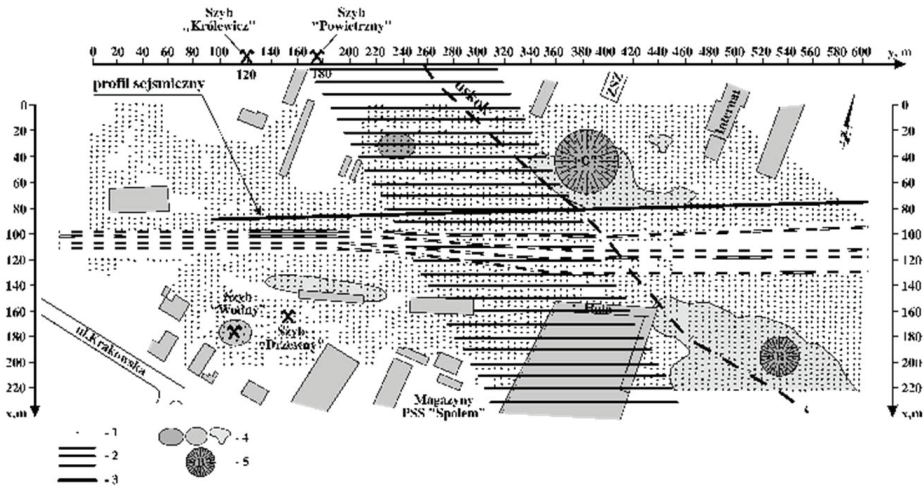
Dzięki systematycznej kontroli terenu wykonywanymi badaniami mikrograwimetrycznymi wykryta została ujemna mikroanomalia siły ciężkości i wykonane na jej obszarze trzy wiercenia (1,2,3 na rys. 4) wykryły występowanie pustek na głębokości od 41 do 48 metrów, które przyjęły 640 m³ emulgatu, tzn. substancji podsadzającej.

Kolejnym przykładem skutecznej prognozy grawimetrycznej jest ocena zagrożenia ekspansją pustek powydobywczych linii kolejowej Kraków-Katowice w rejonie stacji PKP Katowice-Szopienice (Fajklewicz 2008). W obszarze tym z inicjatywy Dyrekcji KWK Wieczorek wykonane były badania mikrograwimetryczne we wspomnianym wyżej rejonie w celu wykrycia ekspansji pustek poeksploatacyjnych z pokładów 501 i 510 ku powierzchni terenu ujawniających się na powierzchni jako jej deformacje nieciągłe (Fajklewicz 1992; Fajklewicz i zespół 1989, 1995, 1997, 1998).



Rys. 4. Prognozowana ekspansja pustki w rejonie Mieszko, KWK Mysłowice na podstawie pomiarów grawimetrycznych (Fajkiewicz, Radomiński 1994)

1 - izolinie różnic mikroanomalií wykreślone, co 10 μGal , 2 - obszar zagrożony, 3 - lokalizacja otworów



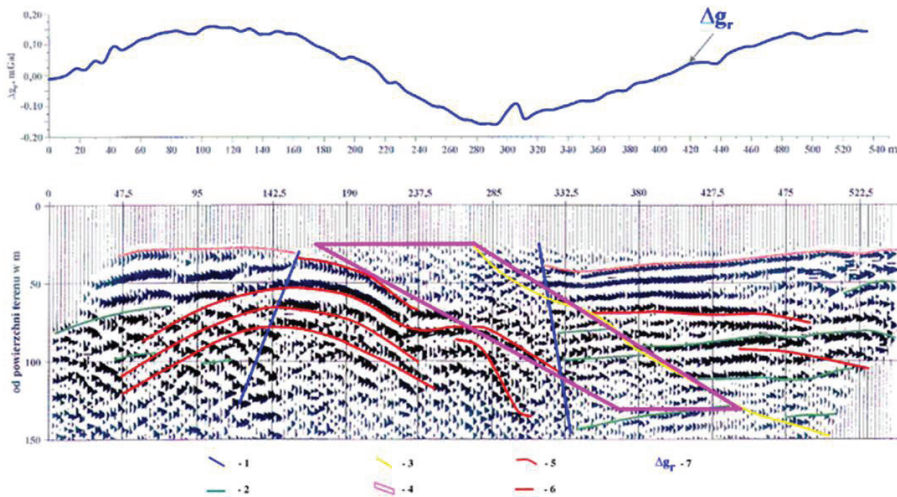
Rys. 5. Strefy zagrożenia powierzchni terenu deformacjami nieciągłymi w rejonie linii PKP w Katowicach-Szopienicach, opracowane przez C. Ostrowskiego na podstawie rozkładu anomalii siły rezydualnych siły ciężkości (Fajkiewicz 1992);

1 - mikrogravimetryczny punkt pomiarowy, 2 - strefa uskokowa, 3 - profil sejsmiczny, 4 - deformacje nieciągłe powierzchni terenu, 5 - zapadlisko

Na obszarze badań występują dwa stare szyby: „Wodny” i „Drzewny”. Łatwo spostrzec po koncentrycznej ujemnej anomalii, że szczyb „Wodny” nie został podsadzony prawidłowo. Inna ujemna anomalia związana jest z występowaniem podziemnego zbiornika wody.

Obszar zniszczonego górotworu: występowanie uskoku, pustek poeksploatacyjnych i spękań, których występowanie wynika z analizy anomalii rezydualnych siły ciężkości przedstawiono na rys. 5.

Na rysunku 6 przedstawiono wyniki badań sejsmicznych wykonanych w profilu, którego bieg zaznaczony jest na rys. 5 (Ślusarczyk i zespół 1996). Na rysunku przedstawiony jest również rozkład mikroanomalii siły ciężkości w tym profilu, łącznie z wynikiem ich interpretacji ilościowej. Jak widać rozkład mikroanomalii siły ciężkości generowany jest przez ciało o podanej gęstości i kształcie odpowiadającym szczelinie uskokowej wypełnionej brekcją tektoniczną. Badania sejsmiczne ujawniają w tym miejscu strefę zniszczonego górotworu (rys. 6).



Rys.6. Rozkład anomalii rezydualnych siły ciężkości wraz z odpowiadającym mu modelem grawimetrycznym strefy uskokowej i wynikami badań sejsmicznych w profilu biegnącym wzdłuż linii kolejowej PKP Katowice-Szopienice (Fajklewicz i zespół 1996);

1 - granica strefy zdeformowanej, 2 - horyzonty karbońskie, 3 - uskoki, 4 - model grawimetrycznej strefy uskokowej, 5 - dyfrakcje, 6 - strop karbonu, 7 - anomalia rezydualna siły ciężkości

Wyniki badań geofizycznych stanowiły podstawę do wykonania prac geotechnicznych uzdatniających podłoże pod szlakiem kolejowym biegnącym przez stację Katowice-Szopienice.

Wśród różnych metod badań geofizycznych wykorzystywanych na trasach kolejowych na uwagę zasługuje metoda georadarowa.



Rys. 7. Badania georadarowe podłoża linii kolejowej (www.geopartner.pl)

Wynikiem badania georadarowego jest obraz strukturalny podłoża i podłoża linii kolejowej. Zaletą badań georadarowych jest ciągły pomiar, czyli profilowanie, które może być przeprowadzone w wersji powierzchniowej lub otworowej. Profilowanie georadarowe wykonuje się tzw. powierzchniową metodą refleksyjną – gdzie nadajnik i odbiornik w stałej odległości od siebie przemieszczają się regularnie po powierzchni terenu, a punkt odbicia i pojedyncza trasa pomiarowa echa leży w połowie odległości nadajnik odbiornik. Refleksyjna metoda pomiarów georadarowych polega na odwzorowaniu granic litologicznych ich nieciągłości i niejednorodności badanego ośrodka. Badania georadarowe są w stanie wykryć zmiany w strukturze nasypów kolejowych spowodowane niestabilnością nasypów, pustki, uskoki, litologiczne soczewki, a także kanały spowodowane przez zwierzęta (krety, lisy).

Badania radarowe prowadzone wzdłuż linii kolejowych nie są łatwe w interpretacji szczególnie ze względu na efekty pochodzące od podkładów, towarzyszącej infrastruktury oraz od możliwych nietypowych składników podsypki. Aby zapewnić wysoko rozdzielczy, czysty i jednoznacznie interpretowalny obraz struktury podsypki i jej podłoża, wypracowano metodykę badań opartą na najlepszym dostępnym

5. Podsumowanie

Badania geologiczno-geofizyczne powinno się wykonywać na każdym etapie: projektowania, wykonywania i eksploatacji linii kolejowej. Ustalenie metodyki pomiarowej, interpretacyjnej oraz analizy wyników wymaga specjalnej wiedzy i dużego doświadczenia. Przy projektowaniu i ustalaniu metodyki prac geofizycznych podstawową rolę odgrywa optymalizacja doboru metod badawczych w danych warunkach budowy geologicznej i znajomość czynników zaburzających stan równowagi w ośrodku. Bardzo istotnymi zagadnieniami związanymi z analizą anomalii geofizycznych, jest poznanie mechanizmu procesów niszczenia. Stąd bierze się również potrzeba wykonywania pomiarów czasowych zmian właściwości fizycznych. Pomiaru takie wykonywane przez dłuższy czas mogą stanowić formę „monitoringu geofizycznego”.

Metody geofizyczne pozwalają na przeprowadzenie badań w sposób nieniszczący, dla większych fragmentów ośrodka geologicznego, stosunkowo szybko i ekonomicznie. Dostarczają one użytecznych danych, które mogą być wykorzystane dla oceny współpracy konstrukcji linii kolejowej z podłożem. Do najbardziej efektywnych z punktu widzenia takiej oceny należy zaliczyć metody grawimetryczną, sejsmiczną, elektrooporową i georadarową. W warunkach rozpoznania za pomocą otworów badawczych przydatne mogą też być metody geofizyki otworowej.

Metody geofizyczne mają duże znaczenie we wstępnym rozpoznaniu warunków geologiczno-inżynierskich dla potrzeb projektowania linii kolejowych. Niejednokrotnie rezygnacja z dokładniejszego rozpoznania podłoża skutkuje wysokimi kosztami usuwania awarii, napraw, modernizacji, itp.

Bibliografia

- [1] Bażyński J., Dragowski A., Frankowski Z., Kaczyński R, Rybicki S., Wysokiński L.: *Zasady Sporządzania Dokumentacji Geologiczno-Inżynierskiej*. Warszawa, 1999r., Państwowy Instytut Geologiczny.
- [2] Fajkiewicz Z. 1982: Prognozowanie metodą mikrograwimetryczną gwałtownych zaburzeń powierzchni terenów górniczych. *Ochrona Terenów Górniczych* nr 60, rok XVI, 10-15.

- [3] Fajkiewicz Z., Radomiński J. 1994: *Prognozowanie grawimetryczne możliwości wystąpień deformacji nieciągłych powierzchni terenu, w wyniku ekspansji pustek i wyrobisk górniczych*. Konferencja: „Ekologia w górnictwie, a geofizyka”, Ustroń-Zawodzie, 19-21 październik 1994, 143-152.
- [4] Fajkiewicz Z. 1992: *Udział mikrograwimetrii w badaniu i prognozowaniu zagrożeń wywołanych eksploatacją górniczą*. Konferencja Naukowo-Techniczna n.t.: Nowoczesne technologie w geodezji górniczej, Kraków, 8-9 maj, 65-82.
- [5] Fajkiewicz Z. i zespół 1989: *Interpretacja badań mikrograwimetrycznych w Katowicach-Szopienicach na terenie przylegającym do linii kolejowej Katowice-Warszawa w celu wyznaczenia możliwości powstania deformacji nieciągłych powierzchni terenu i śledzenie mikroanomalii w czasie – etap I*. Arch. ZZG KWK „Wieczorek”, Katowice.
- [6] Fajkiewicz Z. i zespół 1995: *Badania mikrograwimetryczne w Katowicach-Szopienicach na terenie przyległym do linii PKP Katowice-Warszawa 1994-1995, II etap*. Arch. KWK „Wieczorek”.
- [7] Fajkiewicz Z. i Zespół 1996: *Badania mikrograwimetryczne w Katowicach-Szopienicach na terenie przyległym do linii kolejowej Katowice - Warszawa, w celu kontroli ekspansji pustek poeksploatacyjnych ku powierzchni terenu - Etap III*. Arch. ZG AGH, Kraków.
- [8] Fajkiewicz Z. i Zespół 1997: *Uzupełniające do etapu III badania geofizyczne w Katowicach-Szopienicach obejmujące obszar ograniczony uskokami $h=60-100$ m i $h=30-50$ m w celu określenia ich wpływu na linię kolejową Katowice-Warszawa oraz na możliwość powstawania pustek – Etap IV*.
- [9] Fajkiewicz Z. i Zespół 1998: *Badanie przestrzennej struktury górotworu w rejonie Dworca kolejowego Katowice - Szopienice we wschodniej części intersekcji szczeliny uskokuwej $h=60-100$ m metodą sejsmicznych prześwietlań międzyotworowych – etap V*.
- [10] Fajkiewicz Z. i zespół 1999: *Projekt likwidacji zagrożenia dla linii PKP Katowice-Warszawa i Kraków-Oświęcim w rejonie dworca kolejowego w Katowicach Szopienicach ze strony pustek poeksploatacyjnych w pokładach 501 i 510 KWK „Wieczorek” w oparciu o kompleksową analizę dotychczasowych prac*

- badawczych i podszkawkowych*. Dokumentacja w archiwum Katowickiego Holdingu Węglowego S.A. oraz Kopalni Węgla Kamiennego „Wieczorek”.
- [11] Fajkiewicz Z., 2008: *Znaczenie badań geofizycznych w procesie przywracania wartości użytkowych terenom naruszonym dokonaną eksploatacją górniczą*. Mat. Konfer. Warsztaty 2008, Wyd. IGSMiE PAN, Kraków, 45-86.
- [12] Goszcz A.: *Powstawanie zapadlisk i innych deformacji nieciągłych powierzchni na obszarach płytkiej eksploatacji górniczej*. Mat. Konf. Szkoła Eksploatacji Podziemnej '96. Wyd. CPPGS-MiE PAN, Kraków, 1996, 119 – 137.
- [13] Goszcz A.: *Metody geofizyczne w problemach ochrony powierzchni i innych zagadnieniach technicznych kopalń*. Mat. I Kraj. Konf. Nauk. Techn. „Zastosowanie metod geofizycznych w górnictwie kopalni stałych: t. II, Wyd. AGH, Kraków, 1985, 9 – 22.
- [14] Instrukcji Badań Podłoża Gruntowego Budowli Drogowych i Mostowych, Warszawa 1998 r., Instytut Badawczy Dróg i Mostów
- [15] Kwiatek J. (red.): *Ochrona obiektów budowlanych na terenach górniczych*. Wyd. GIG, Katowice 1997.
- [16] Łątka T., Czarny R., Krawiec K., Kudyk M., Pilecki Z., 2010: *Eksperymentalne badania położenia nieciągłości, pustek i stref rozluźnień w górotworze za pomocą georadaru otworowego*. Zeszyty Naukowe IGSMiE PAN 77, 67-75.
- [17] Marcak H.: *Powstawanie zapadlisk i innych form deformacji nieciągłych powierzchni spowodowanych występowaniem pustek*. Mat. Symp. „Warsztaty '99”, 1999, 71 – 84.
- [18] Pilecki Z. 2002: *Ocena przydatności do zabudowy terenów zagrożonych deformacjami nieciągłymi za pomocą metod geofizycznych*. Mat. Konferencji dot. „Ochrona terenów górniczych”, Główny Instytut Górnictwa, Ustroń, 373-382.
- [19] Pilecki Z., Kotyrba A. 2007: *Problematyka rozpoznania deformacji nieciągłych dla potrzeb projektowania konstrukcji drogowych na terenie płytkiej eksploatacji rud metali*. Prace Naukowe GIG III/2007, 379-392.
- [20] PN-B-02479. Geotechnika. Dokumentowanie geotechniczne. Zasady ogólne

- [21] Rosikoń A. 1979: *Budownictwo komunikacyjne na terenach objętych uszkodzami górnictwymi*. Wyd. Komunikacji i Łączności - Warszawa, 118-125.
- [22] Rozporządzeniem Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 24 września 1998 r. (Dz. U. nr 126 poz. 839).
- [23] Rybak, J., Stilger-Szydło, E.: *Znaczenie i błędy rozpoznania podłoża gruntowego przy posadowieniach obiektów infrastruktury transportu lądowego*. Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne 2010, Nr 4, s. 60—65.
- [24] Ślusarczyk R. i zespół 1996: *Szczegółowe badania sejsmiczne w rejonie Katowice-Szopienice w celu rozpoznania stref występowania deformacji nieciągłych zagrażających linii kolejowej Katowice-Warszawa oraz kompleksowa interpretacja wyników badań mikrograwimetrycznych i sejsmicznych wykonanych w tym rejonie*. Arch. Katowicki Holding Węglowy KWK „Wieżorek”.
- [25] Materiały archiwalne IGSMiE PAN: wyniki badań georadarem otworowym; budowa Autostrady A1, Węzeł Piekary, Kraków 2011.

Wykorzystane strony internetowe:

www.geopartner.pl

SIGNIFICANCE OF GEOLOGICAL AND GEOPHYSICAL RECOGNITION IN THE AIM OF RAILWAY TRACK SUBGRADE STABILITY MAINTENANCE

Summary

The significance of designing and execution of geological survey including geophysical methods of subgrade recognition while realization of foundations for railway infrastructure objects have been presented in the paper. The examples of geophysical methods usage for better recognition of geological and engineering conditions for railway tracks protection have been presented. The presented examples have concerned recognition of non-contiguous deformations on mining areas that cause enormous risk for safe exploitation of railway lines.

Keywords: *non-contiguous deformations, railway tracks subgrade stability*