

Zbigniew FAJKLEWICZ

Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

Znaczenie badań geofizycznych w procesie przywracania wartości użytkowych terenom naruszonym dokonaną eksploatacją górniczą

Streszczenie

W pracy przedstawiono zarys rozwoju badań geofizycznych mających na celu wykrywanie jak również prognozowanie zagrożeń wynikających z wpływu podziemnej działalności górniczej na powierzchnię terenu. Wyniki badań geofizycznych w przedstawionym ujęciu wiążą się z ochroną życia ludzkiego, dążności do zmniejszenia uciążliwości zamieszkiwania w rejonach zagrożonych, ograniczenia, a nawet zapobiegania wystąpieniom niszczenia wytworów kultury materialnej w tym budowli i infrastruktury terenu. W pracy wzmiankowano lub omówiono szereg dokonanych zastosowań badań geofizycznych w celu wykrywania ekspansji pustek poeksploatacyjnych ku powierzchni terenu. Szczególnie ważne są te aplikacje, które wiążą się z ochroną szlaków komunikacyjnych, terenów zurbanizowanych lub uprzemysłowionych. W tym zakresie warto zwrócić uwagę na prezentowane rezultaty badań geofizycznych wykonanych na terenie miast: Wieliczka, Katowice, Bytom, Sosnowiec, Zabrze, Jaworzno, Olkusz, Bolesław, Mysłowice i inne. Nawiązano również do wyników badań wykonanych przez polskich geofizyków na terenie USA, Iraku, Indii, Wietnamu i Niemiec. Jak dotąd nie ma alternatywy dla badań geofizycznych w zastosowaniu do wykrywania i prognozowania zagrożeń wynikających z działalności człowieka w środowisku skalnym.

1. Wstęp

Wpływy eksploatacji górniczej oddziałują szkodliwie na powierzchnię terenu i na znajdujące się na niej obiekty. Powstające deformacje powierzchni terenu powodują, że konstrukcje budowlane doznają nie tylko przesunięć, pęknięć, ale również mogą ulec całkowitemu zniszczeniu.

Dotyczy to również infrastruktury terenu, podziemnych rurociągowych form transportu oraz linii transportu drogowego i kolejowego oraz zmiany stosunków wodnych w danym rejonie.

Z punktu widzenia zadań służących do zwalczania tego rodzaju zagrożeń najistotniejszą rolę odgrywają tworzące się tzw. deformacje nieciągłe powierzchni terenu. Występują one w formie: pustek, zapadlisk, lejów, progów i szczelin. Propagacja tego rodzaju zjawisk powoduje z punktu widzenia ochrony środowiska zagrożenia dla:

- życia ludzkiego,
- wytworów kultury materialnej, w tym budowli mieszkaniowych, naziemnych szlaków komunikacyjnych zasobów wody pitnej oraz infrastruktury terenu,
- komfortu życia.

Stosując metody geofizyczne można deformacje nieciągłe wykrywać oraz prognozować możliwość ich wystąpienia w najbliższej przyszłości.

Aktualnie w trwającym okresie poważnej redukcji wydobycia kopalin użytecznych w Polsce, w tym węgla kamiennego, zamykania kopalń, które szczyptały przysługujące im zasoby kopaliny użytecznej, geofizycy podjęli nowe wyzwanie polegające na twórczym udziale w przywracania wartości użytkowych terenom górniczym kopalń zlikwidowanych bądź będących w procesie likwidacji. Działalność taka możliwa jest również w przypadku naruszenia struktury górotworu innym rodzajem działalności antropogenicznej, jak również będącej wynikiem procesów przyrodniczych.

Stosując metody geofizyczne można wyodrębnić w tych terenach obszary nadające się zarówno do budownictwa mieszkalnego jak i przemysłowego oraz budowy dróg bez lub po uzdatnieniu badanego górotworu.

2. Deformacje powierzchni terenu i modele procesów zachodzących w skałach otaczających pustkę

Podziemna eksploatacja złóż powoduje deformacje powierzchni terenu, których wielkość, zasięg, charakter oraz przebieg z wpływem czasu zależą od wielu czynników natury geologicznej, fizycznej i górniczej (Knothe 1975; Kwiatek 1999). Deformacje powierzchni terenu mogą również wystąpić w wyniku zmiany stosunków wodnych w górotworze.

Podobne skutki dla powierzchni terenu może wywoływać działalność inżynierska np. budowa tuneli, autostrad, wiaduktów itp.

Równie szkodliwe skutki dla powierzchni terenu mogą być wywołane przyczynami naturalnymi zachodzącymi w ośrodku geologicznym. Z tego względu wyróżnia się deformacje wywołane procesami przyrodniczymi i działalnością antropogeniczną.

Mając na uwadze charakter zmian, jakie one powodują wyróżnia się:

- deformacje ciągłe – niecki osiadania,
- deformacje nieciągłe – progi, zapadliska, leje, szczeliny.

Oba rodzaje deformacji powierzchni terenu oddziałują szkodliwie na znajdujące się na niej obiekty oraz na psychikę osób zamieszkujących tereny objęte deformacjami. Mogą być one również dla mieszkańców tych terenów przyczyną urazów fizycznych do śmiertelnych włącznie.

Wszystkie te skutki są następstwem dążności ośrodka geologicznego do wypełnienia powstałej w nim pustki lub „wydalenia” jej jako ciała obcego zaistniałego w górotworze. Stąd pojawia się problem migracji i ekspansji powstałych w nim pustek np. poeksploatacyjnych. Procesy te występują na terenach górniczych od czasu zaistnienia procesów wydobywania kopalin użytecznych.

Deformacje nieciągłe powierzchni terenu można już odnaleźć na planie Wieliczki Marcina Germana umieszczonego na sztychu W. Hondiusa z 1645 roku (rys. 2.1). Nosiły one wtedy nazwę „zawalisk”, będących tutaj wynikiem dokonanej eksploatacji podziemnej w złożu soli kamiennej. Na rys. 2.2 sporządzonym przez M.Seykottę, a pochodzącym z połowy XIX wieku przedstawiony jest skutek zapadnięcia się w Wieliczce komory Międzykaszty w 1831 roku, w wyniku którego zniszczony został dom P.P. Windokiewiczów.

Trzeci przykład działania niszczącej siły deformacji nieciągłych powierzchni terenu przedstawiony jest na rys. 2.3. Pochodzi on również z Wieliczki. Na rysunku przedstawiono jedną z licznych szczelin powstałych w ogrodzie klasztoru O.O. Franciszkanów - Reformatów na skutek wylewu wód podziemnych do chodnika Mina w dniu 25 października 1995 roku. W wyniku powstałych deformacji ucierpiało wiele budowli i infrastruktura miasta, a także kościół, klasztor i mur otaczający posesję.

Klasyyczny przykład dewastacji powierzchni terenu powstałej w wyniku podziemnej eksploatacji złoża węgla kamiennego pochodzi z pola górniczego Jharia, Bihar, India (rys. 2.4). Spowodowała ona dewastację setek hektarów powierzchni terenu. Ze szczelin wydobywają się gejzery ognia. Nad powierzchnią terenu unosi się czarna mgła, co robi zwłaszcza nocą wrażenie, iż przebywa się w piekle rozumianym wg średniowiecznych wyobrażeń. Głównym tutaj problemem było i jest utrzymanie bezpiecznej eksploatacji transindyjskich linii kolejowych, przebiegających przez ten teren. Duże zasługi w rozpoznawaniu zagrożenia miały wyniki wykonywanych tam badań mikrograwimetrycznych.

Prezentowane na rysunku od 2.1 do 2.4 przykłady deformacji nieciągłych powierzchni terenu obrazują skalę problemu, przed którym stoją prace badawcze, głównie geofizyczne.

Problemem procesów zachodzących w skałach otaczających pustkę od strony teoretycznej zajmowało się wielu autorów (Schmidt 1926; Fenner 1938; Terzaghi, Richart 1952; Talobre 1957; Ladanyi 1967; Rummel 1971; Jaeger 1972).

W Polsce temu zagadnieniu od strony potrzeb wyjaśniania wyników pomiarów geofizycznych wykonywanych dla wykrywania pustek występujących w górotworze opublikowano szereg prac: (Fajkiewicz 1980, 1985, 1986; Sachs 1985a, b; Goszcz 1985; Marcak 1999; Szczerbowski 2000).

Dla chodnika górniczego, najprostsze rozwiązanie otrzymuje się zakładając, że jednorodna skała poddana jest działaniu naprężenia hydrostatycznego i że poziome rezydualne naprężenie σ_h jest równe naprężeniu pionowemu σ_v , czyli $\sigma_v = \sigma_h = \sigma$.

Zgodnie z tymi założeniami, na podstawie rozwiązania teoretycznego (Jaeger 1972), dla poziomego wyrobiska górniczego o przekroju kołowym, naprężenie obwodowe σ_t na granicy pustki ze skałą jest równe $\sigma_t = 2\sigma$.

W każdym punkcie ośrodka skalnego, leżącym w odległości r od środka chodnika, w którym $\sigma_t < \sigma_{el}$, gdzie σ_{el} jest wartością graniczną sprężystości skały, można się spodziewać deformacji kruchej (spękań) lub plastycznej (rys. 2.5). W tym samym czasie obserwuje się w skałe małe wewnętrzne przesunięcie. Rozkruszanie skały pojawi się jeśli $\sigma_{max} - \sigma_{min} > \sigma_c$, $2\sigma_c$ jest krytyczną wartością otrzymaną z koła Mohra. Już na podstawie podanego wyżej rozwiązania (Talobre 1957) można wnioskować, że źródłem anomalii geofizycznych, które potęgują efekt pustki, są otaczające ją strefy deformacji skały: rozkruszona i plastyczna.

Z punktu widzenia badanego związku zmian gęstości w skałach otaczających pustkę na skutek ich obciążenia, jak również przeciążenia, interesujące informacje zawiera rozwiązanie podane przez Ladanyi'ego (Ladanyi 1967). Rozpatruje on problem quasi-statycznego rozszerzania się pustek: sferycznej i walcowej w nieskończone sprężysto-kruche-plastyczne medium, przy następujących założeniach:

1. przed zniszczeniem medium jest dla niego spełnione prawo Hooke'a,
2. zjawisko niszczenia medium zachodzi zgodnie ze zgeneralizowaną formą kryterium Griffith'a,
3. po zniszczeniu jest ono transformowane w kryterium Mohra-Coulomba,
4. otrzymane przy takich założeniach rozwiązanie wskazuje, że graniczna odporność pustki, na proces jej rozszerzania się w medium przy danym otaczającym ciśnieniu, zależy nie tylko od jego parametrów wytrzymałościowych w stanie niezaburzonym i zaburzonym, ale również od modułu Younga, a także od zmian gęstości medium wywołanych przejściem z jednego stanu w drugi.

Stwierdzenie to ma ważne znaczenie uwidacznia, że deformacje niesprężyste są związane z procesem zmian gęstości ośrodka skalnego. Warto również nadmienić, iż Ladanyi zwraca uwagę na możliwość występowania obszaru przejściowego między strefą rozkruszoną i strefą

deformacji sprężystych (rys. 2.5).

Strefa rozkruszona może formować się wokół pustki tylko wtedy, gdy stosunek działającego ciśnienia w medium do jego wytrzymałości na rozciąganie jest mały; strefy: rozkruszona i radialnego pęknięcia odpowiadają strefie tzw. deformacji niesprężystych, nazywanej również strefą rozluźnienia. Badania in situ wskazują, że strefa rozluźnienia może się zwiększać wraz z upływem czasu. Proces ten trwa tak długo, aż osiągnięta zostanie stabilizacja deformacji skały wokół pustki.

Gdy pustki występują płytko pod powierzchnią terenu obserwuje się proces powiększania się strefy rozluźnienia w kierunku do powierzchni terenu. Zjawisko to wykorzystane zostało do opracowania metody mikrogravimetrycznej, pozwalającej prognozować ruch pustek ku powierzchni terenu (Fajkiewicz 1982). Na rysunku 2.6 przedstawiony jest rozwój w okresie 363 dni, strefy rozluźnienia wokół chodnika występującego na głębokości 540 m w Kopalni Węgla Kamiennego im. Czesonkowa w Zagłębiu Donieckim (Głuško i in. 1981).

Przedstawiony przykład wskazuje, że strefa ta może osiągnąć duże rozmiary, co nie pozostaje bez wpływu na mierzony rozkład mikroanomali siły ciężkości i jej pionowego gradientu nad pustką. Badania sejsmoakustyczne, prowadzone w otworach wiertniczych, wykonane z chodnika górniczego w skały go otaczające, mogą dostarczyć pełniejszej informacji o strefie rozluźnienia.

Na rysunkach 2.7 i 2.8 przedstawione są wykresy interwałowych prędkości sejsmicznej, podłużnej fali bezpośredniej w funkcji odległości od wyrobiska węgla piaskowca, w którym zostało ono wydrążone. Usytuowanie otworu wiertniczego R , którego dotyczą te dane jest również przedstawione na tych rysunkach. Jest on jednym z pięciu, które odwiercono w stropie i ścianach chodnika i w których przeprowadzono pomiary sejsmoakustyczne dla zbadania otaczającej go strefy zluźnienia. Prace te zostały wykonane w Kopalni Węgla Kamiennego „Prezydent Gottwald” w rejonie Ostrawsko-Karwińskim w Czechosłowacji (Stas i in. 1972). Chodnik został wydrążony w piaskowcach na głębokości 640 m.

W celu badania ekspansji strefy rozluźnienia w górotwór, pomiary sejsmoakustyczne zostały wykonane w trzech seriach pomiarowych, w czasie T_1 – po 18 dniach, T_2 – po 75 dniach, T_3 – po 260 dniach po zakończeniu drążenia chodnika.

Na rys. 2.7 i 2.8 krzywe prędkości podłużnej fali sejsmicznej odnoszą się do pierwszej (rys. 2.7) i trzeciej serii pomiarowej (rys. 2.8). Analizując przedstawione krzywe zauważa się występowanie stref: a – rozluźnienia, b – podwyższonego naprężenia, c – przejściowej. Strefa a , w okresie od T_1 do T_3 zwiększyła swoją miąższość z 0,44 do 1,96 m, strefa b z 0,57 do 1,0 m, miąższość strefy c pozostała bez zmian. Z powyższego wynika, iż stan górotworu wokół chodnika w rzeczywistości jest bardziej złożony niż to można było przewidzieć na podstawie badań teoretycznych.

W tym samym celu można wykorzystać pomiary promieniotwórczości naturalnej γ z otworów wykonanych z wyrobiska w górotwór. Na rys. 2.9 są przedstawione wyniki pomiarów γ , otrzymane dla siedmiu otworów wiertniczych. Wiercenia te zostały wykonane w piaskowcu (Trávniček 1974). Wskazują one na występowanie wszystkich trzech stref a , b , c wokół chodnika. W strefie a między chodnikiem a linią a' , występuje strefa rozkruszona, co uniemożliwiło wykonanie pomiarów γ bezpośrednio za ścianami chodnika.

Na rys. 2.9 (w skali względnej) jedna działka natężenia promieniowania rozproszonego I odpowiada zmianie gęstości $0,04 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$. Zarejestrowane zmiany I odpowiadają względnej zmianie gęstości skał równej $0,2 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$ (Trávniček 1974).

Warto również zwrócić uwagę na pracę Rummela, 1971 dotyczącą pęknięcia skał sprężysto-kruchych w otoczeniu pustki podatnej określonego naprężeniu.

Na rysunku 2.10 przedstawiony jest model pustki sferycznej poddany wzrastającemu naprężeniu.

Gdy rozważyć składowe σ_{θ_x} i σ_{θ_y} naprężenia $\sigma_{\theta}(r)$ na element sześcienny skał otaczających pustkę to zauważa się, że składowa σ_{θ_x} działająca na skały w stropie pustki powoduje rozciąganie skały, osiągające wartość jednej jednostki umownej, podczas gdy naprężenie ściskające σ_{θ_y} na ociosie pustki osiąga w tym czasie wartość 3 jednostek.

Naprężenie ścinające $\tau_{r\theta}$ powoduje pękanie skał na krawędzi (ociosie) pustki i mimo, że osiąga małe wartości (0,5 jednostki umownej) wzmacnia działanie naprężeń ściskających występujące na ociosie pustki. Naprężenia, o których mowa inicjują pęknięcia nadkładu i ruch pustki ku powierzchni terenu.

Wyniki wykonanych przez Rummela 1971 eksperymentów na próbkach marmuru z Naxos (Grecja) rys. 2.11a i 2.11b przy wykorzystaniu prasy potwierdzają wyniki Sterpi'ego i Sakuai'ego 1977.

Na rys. 2.12 przedstawione są wyniki osiągnięte przez wspomnianych autorów na podstawie modelowań numerycznego i modelowania laboratoryjnego rozwoju płaszczyzn ścinania rozwijających się dynamicznie przy narastającym obciążeniu pustki nadkładem.

Podane wyżej rozważania teoretyczne i badania laboratoryjne oraz in situ dowodzą, że na skutek ekspansji pustki w skałę otaczającą, następuje wzmocnienie generowanego przez nią pola siły ciężkości. Oznacza to, że pustki występujące na większej głębokości od oczekiwanej na podstawie uwzględnienia tylko geometrii samych pustek dla obliczania efektu grawitacyjnego, mogą być wykrywane metodą mikrograwimetryczną. Wzmocnienie to wynosi 30 % do 50 % tej wartości anomalii siły ciężkości Δg i gradientu pionowego ΔW_{zz} , którą wywołuje pustka bez uwzględnienia jej ekspansji w skałę otaczającą. W rzeczywistych przykładach zastosowań procent ten wahał się od 40% do 2300 % (Fajkiewicz 1986).

Choć wzmocnienia pola odpowiadające różnicom wynikającym z analizy pomiarów i modelowania są bardzo duże, to wydaje się to zrozumiałe. Po pierwsze modele grawimetryczne, będące wynikiem analizy są dalekim przybliżeniem rzeczywistości. Dla pustek leżących płytko pod powierzchnią terenu, na głębokości rzędu 10 m do 50 m, należy przyjąć, że $\sigma_v \neq \sigma_h$ (Jaeger 1972). Pozostają więc do rozważenia dwie możliwości $\sigma_v < \sigma_h$ lub $\sigma_v > \sigma_h$.

W pierwszym przypadku powstają strefy silnego rozrzedzenia górotworu poza ścianami chodnika i słabe zagęszczenie w jego stropie, gdy występuje on w utworach osadowych, np. w piaskowcach lub w łupkach. Przypadek drugi ma zwykle miejsce dla pustek występujących płytko, ale wydrążonych w skałach sprężystych, takich jak granit, wapień, dolomit itp.

W tym drugim przypadku rozkład stref zagęszczenia i rozluźnienia górotworu wokół chodnika stanowi inwersję w stosunku do rozważanego przypadku pierwszego. Tak więc powstaje silne zagęszczenie skały w rejonie ścian bocznych chodnika i rozrzedzenie w jego stropie. Należy przypuścić, że strefa rozrzedzenia spękania przesuwana się ku powierzchni terenu wraz z upływem czasu. Czas ten zwykle jest bardzo długi. Na rysunku 2.13 przedstawione są krzywe narastania ujemnych mikroanomalii siły ciężkości w czasie. To narastanie związane jest ze wzrostem spękania nadkładu pustki poeksploatacyjnej, której ruch ku powierzchni z wychodni pokładu 510 trwał 4 lata do czasu ogłoszenia prognozy o zagrożeniu linii kolejowej Muchowiec-Zawiercie w rejonie Mysłowic (Fajkiewicz i in. 1997).

Z przeprowadzonych rozważań wynika, że kształt pustki generującej pole grawitacyjne zależy od stosunku $\sigma_v : \sigma_h$. Stąd wnioskuje się, że klasyczna interpretacja krzywych pomiarowych, polegająca na przyporządkowaniu krzywej pomiarowej rozkładu pochodzącego od modelu samej pustki, występującej na określonej głębokości, traci sens. Generalnie rzecz biorąc, wyznaczanie na tej drodze głębokości występowania pustek nie może przynieść popra-

wnego rezultatu.

Wyznaczanie głębokości pustki jest jedynie możliwe na podstawie przedłużenia analitycznego mierzonych wartości w dół i poszukiwaniu punktu osobliwego Δg anomalii siły ciężkości i drugiej pochodnej pionowej. Punkt ten jest środkiem ciężkości pustki lub związany jest z górną powierzchnią wąskiej strefy rozluźnienia skał nad pustką, będącą efektem jej rozwoju wykominiowania się ku powierzchni terenu.

3. Rozwój badań geofizycznych dotyczących wykrywania pustek i niejednorodności w górotworze

3.1 Metoda geoelektryczna

Analiza literatury przedmiotu wskazuje, że najwcześniej do wykrywania pustek występujących w ośrodku geologicznym zastosowana została metoda elektrooporowa (Palmer, Hough 1953). Wyniki lokalizacji pustek poeksploatacyjnych metodami elektrooporową i grawimetryczną omówione zostały w pracach Fajklewicza (Fajklewicz 1964a, 1967), gdzie omówiona została również podana przez Cook'a (1965) sejsmiczna metoda „cienia”.

Antoniuk i Miecznik (1973) publikują pracę dotyczącą anomalii elektrooporowych nad modelem kawerny. Praca ta ukazała się już w czasie intensywnego rozwoju badań elektrooporowych w celu określenia zagrożeń górniczych w kopalniach węgla kamiennego (Zakolski 1972; Foryś, Surowiec 1980; Sachs 1981; Goszcz, Skinderowicz 1985; Betlej i in. 1985).

Dla potrzeb kopalni górnośląskich badania te wykonywał Główny Instytut Górnictwa w Katowicach ówczesne: Przedsiębiorstwo Poszukiwań Geofizycznych, w Warszawie, Katedra Geofizyki Kopalnianej AGH w Krakowie i Przedsiębiorstwo Geologiczne w Katowicach i inne. Od wielu lat na terenach górniczych pracuje szereg spółek z ograniczoną odpowiedzialnością wykonujących na zlecenie określone pomiary geoelektryczne.

Pragnę zauważyć, że niektóre takie zespoły posługują się starym wyłomowanym sprzętem, wykonawcy nie mając doświadczenia podejmują się praktycznie każdego zadania do wykonania. Wyniki takich pomiarów z natury rzeczy fałszują rzeczywistość, wytwarzając wśród odbiorców wyników przekonanie o niskiej efektywności metod geofizycznych, a w szczególności metod geoelektrycznych.

Mimo takich przeciwności losu metoda geoelektryczna jest intensywnie doskonalona. Aktualnie wprowadzana jest metoda obrazowania elektrooporowego, o której mowa w pracy Mościcki i Antoniuk (1999). Jej rozwój może w znacznym stopniu udoskonalić zastosowanie metody elektrooporowej do wykrycia form antropogenicznych wśród nich nie tylko pustek, ale stref filtracji szkodliwych odcieków z wyrobisk komunalnych (Antoniuk, Mościcki 1998).

3.2 Metoda mikrogravimetryczna

Pierwsza praca dotycząca możliwości zastosowania metody grawimetrycznej do wykrywania pustek poeksploatacyjnych opublikowana została w 1956 roku (Fajklewicz 1956). Jedenaście lat później (Fajklewicz 1967) opublikowana została praca syntetyzująca wyniki badań grawimetrycznych, które odnosiły się do terenów kopalń węgla kamiennego: Boże Dary, Ziemiowit, Jaworzno, Janina i Barbary Wyzwolenie.

Częstkowe wyniki tych badań były opublikowane wcześniej lub wygłoszone na konferencjach (Fajklewicz 1963, 1964b, 1965).

W tym okresie opublikowana została także praca Colley'a (1963), dotycząca wykrywania

pustek w utworach wapiennych, a później praca Neumann'a (1967) prezentująca wyniki zastosowania grawimetrii do wykrywania poeksploatacyjnych pustek górniczych.

W literaturze zachodniej problem ten rozwijają prace Arzi'ego (1975); Fajklewicza (1974b, 1976a, 1988a,b); Lyness'a (1985); Sommer'a (1983) i omawiają Qianshen'a i in. (1996) oraz Sharma (1997).

Rozwój zastosowań badań mikrogravimetrycznych dla potrzeb wykrywania form antropogenicznych w tym głównie pogórnicych, następuje w Polsce szybko.

Dzieje się tak w wyniku bardzo szerokiej i intensywnej współpracy Katedry Geofizyki Kopalnianej AGH z ówczesnym Przedsiębiorstwem Poszukiwań Geofizycznych, później Przedsiębiorstwem Badań Geofizycznych w Warszawie.

W okresie od 1968 roku do dzisiaj powstało kilkadziesiąt dokumentacji przemysłowych badań mikrogravimetrycznych związanych z dokumentowaniem możliwości wystąpienia zagrożeń dla powierzchni terenu miast, osiedli i zakładów przemysłowych. Rozwój zastosowań metody mikrogravimetrycznej wykracza również poza granice Polski.

W latach 1960/61 w czasie mojego pobytu w University of Kansas, Kansas, Lawrence, USA zainicjowałem wykonywanie mikrogravimetrycznych badań w celu kontroli poziomu wód podziemnych zasilających szereg osiedli rozmieszczonych na Wielkiej Prerii. Badania mikrogravimetryczne pozwalały nie tylko kontrolować wahania poziomu wód pitnych ale przeliczyć go na masę zużytej wody co miało ważne znaczenie w tamtym klimacie odnośnie praktyki zaopatrzeniowej ludności w wodę.

W ramach współpracy pomiędzy AGH i Akademią Górniczą we Freibergu w latach siedemdziesiątych szkolona była w AGH niemiecka kadra geofizyków w zakresie mikrogravimetrii a następnie prowadzone były wspólne wieloletnie prace mające na celu ochronę zasiedlonych powierzchni terenów górniczych kopalń soli potasowych w Zilitz.

W latach 1972 i 1973 na zlecenie Przedsiębiorstwa „Warna-Hydrokop” w Krakowie prowadzone były na szeroką skalę badania mikrogravimetryczne na terenie pola górniczego złoża siarki w Mishraq'u w Iraku. Złoże to eksploatowane było metodą otworową. Jednym z zadań pomiarów mikrogravimetrycznych było określenie stopnia szczyrpania eksploatowanego złoża. Na obszarach wskazanych jako słabo szczyrpane wznawiano, eksploatację za pomocą dodatkowo usytuowanych otworów (Fajklewicz 1974b).

Wielką pomocą w lokalizacji obszarów nieszczyrpanych były wyniki badań mikrogravimetrycznych w ujęciu pomiaru tzw. wieżowego gradientu pionowego siły ciężkości (Fajklewicz 1972, 1974a, 1976a, 1976a,b, 1988a,b; Patenty nr: 69758, 72039, 73609; Śliz 1978). Metoda ta znalazła uznanie z uwagi na zwiększoną możliwość precyzyjniejszego wykrywania płytko pod powierzchnią terenu występujących form geologicznych i antropogenicznych, co zostało na terenie Zagłębia Górniczego Ruhr sprawdzone (Fajklewicz, Śliz 1979). Osiągane wyniki tą metodą przyczyniły się do nawiązania współpracy z Instytutem Geofizyki Ruhr – Univeristat – Bochum w Niemczech i Instytutem Geofizyki AGH. Jednym z rezultatów było zbudowanie nowego urządzenia do pomiaru wieżowego gradientu pionowego siły ciężkości (Dresen i in. 1981).

Ta sama metoda znajduje uznanie u geofizyków Indian School od Mine w Dhanbadzie w Stanie Bihar, India. Została ona z powodzeniem zastosowana na polu górniczym Kopalni Węgla Raniganj Coalfield (Mukhopadhyay 1989) i później we wspólnych polsko-indyjskich pracach na terenie Jharia Coalfields, Bihar, India, o czym będzie mowa nieco później.

Wykonane badania w zespołach międzynarodowych o małym zakresie nie są tutaj wymienione. Jako ostatnie z tego rodzaju doświadczeń wspomnę tutaj prace wykonane w Wietnamie w otoczeniu zapory wodnej w pobliżu miasta Wha-bin na rzece Shong-Da, gdzie dno zapory

nie zostało dobrze uszczelnione poprzez wykonawców, co powodowało przy spiętrzeniu wody za zaporą do wysokości 120 m poważną infiltrację wody w skały otaczające zaporę – powodując ich erozję wewnętrzną. Tego rodzaju strefy ujawniają się w postaci ujemnych mikroanomali siły ciężkości, co zostało wcześniej udowodnione na polskich zaporach wodnych (Madej 1975, 1983).

Na rys. 3.1 przedstawione są obszary badań mikrograwimetrycznych prowadzonych przez Instytut Geofizyki AGH w procesie przywracania wartości użytkowej terenom pogórnym w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym i rejonach przyległych. Na rys. 3.1 zaznaczono kolorem zielonym rejony, w których badania przeprowadzone przed 1996 rokiem i pomarańczowym w latach 1996-97, a czerwonym po 1996 roku. Zauważa się ogromną dynamikę wzrostu ilości badań w celu ochrony terenów górniczych przed zagrożeniem możliwością wystąpienia deformacji nieciągłych i aktywizacją działalności mającej na celu przywracanie wartości użytkowej tym terenom. Już na podstawie rys. 3.1 można zauważyć, że w miarę upływu lat badania mikrograwimetryczne stały się metodą coraz bardziej docenianą i niezastąpioną w zakresie wykrywania form antropogenicznych, prognozowania zagrożeń wynikających z ekspansji pustek ku powierzchni terenu oraz w procesie przywracania mu wartości użytkowej (Fajkiewicz 1976b). Tak więc w naszych pracach coraz większą rolę odgrywały i odgrywają badania dużych obszarów zajęte przez miasta, osiedla, linie komunikacji drogowej i kolejowej.

Jedną z pierwszych tego rodzaju prac wykonaną została w Bytomiu (Duda, Bochnia 1970a; Fajkiewicz 1970b) na obszarze położonym przy ulicy Łużyckiej w związku z zagrożeniem dla budynków osiedla mieszkaniowego ze strony płytkich zrobów górniczych, obecnej kopalni Węgla Kamiennego „Centrum”.

Skuteczność metody mikrograwimetrycznej w rozwiązaniu postawionego problemu w Bytomiu szybko owocuje napływem próśb o pomoc w przebadaniu obszarów przeznaczonych pod budownictwo mieszkaniowe i przemysłowe z Olkusza (Duda, Bochnia 1970b; Fajkiewicz 1970a) z Zakładów Górniczych „Lena” z Wilkowa powiat Złotoryja (Fajkiewicz, Śliz 1971) z Chełma Lubelskiego (Fajkiewicz i in. 1971) itd.

Warto tutaj wymienić i wyróżnić pomiary osłaniające bezpieczną eksploatację linii kolejowych przebiegających w obszarach zagrożonych ekspansją pustek poeksploatacyjnych (Fajkiewicz 1982, 1983; Fajkiewicz, Radomiński 1990, 1994, 1996; Fajkiewicz i zespół 1996, 1997, 1998, 1999).

Mając na uwadze temat przedkładanego uczestnikom konferencji referatu pragnę w tym miejscu zwrócić uwagę na wysoką efektywność wyników badań mikrograwimetrycznych wykonanych w części obszaru górniczego będącej w likwidacji Kopalni cynku i ołowiu „Bolesław” w Bukowni (Madej i zespół 1997, 1998).

W latach 1996-98 przeprowadzono badania grawimetryczne w części OG „Bolesław” w związku z likwidacją Kopalni „Bolesław” w Bukowni. Celem tych prac było określenie położenia stref nieciągłości i rozluźnień górotworu zagrażających stabilności powierzchni terenu. Na obszarze ponad 115 ha stwierdzono blisko 50 rejonów, w których zarejestrowane zmiany pola siły ciężkości wskazywały na położenie stref ubytku mas związane z działalnością górniczą w złożu. W trakcie realizacji II etapu prac, mających na celu przywrócenie wartości użytkowych terenom pogórnym, prowadzono prace wiertnicze z równoczesnym podsadzaniem stwierdzonych rozluźnień. Należy podkreślić, iż spośród wymienionej liczby 50 przebadanych stref rozluźnień w jednym tylko przypadku przyczyną jej pojawienia wiązała się z budowa geologiczną a nie ze skutkami prac górniczych. Na uwagę zasługuje fakt, iż w trakcie wprowadzenia masy podsadzkowej do górotworu, prowadzono bieżącą kontrolę kierunku rozprzężenia zaczynu cementującego metodą geoelektryczną.

Analogiczne prace mikrograwimetryczne przeprowadzono również skutecznie w części OG „Olkusz”, obejmując badaniami grawimetrycznymi obszar ponad 60 ha.

3.3 Metoda sejsmiczna

Jedną z pierwszych prac dotyczących zastosowania metody sejsmicznej w celu wykrywania pustek opublikowana została przez Pernod'a i in. 1989.

W Polsce pierwsze skuteczne prace sejsmiczne mające na celu wykrywanie pustek i stref rozluźnień górotworu przeprowadzone były przez Przedsiębiorstwo Poszukiwań Geofizycznych (Materzok, Mikołajczak 1974).

Stosując metodę prześwietlania sejsmicznego otwór-otwór wykryto pustki i strefy rozluźnień w czapie gipsowej wysadu solnego Inowrocławia.

W celu wykrywania starych szybów górniczych stosowano również metodę prześwietlania sejsmicznego powierzchnia – otwór (Betlej i in. 1985). Dalszemu rozwojowi tych badań poświęcone są prace: (Marczak, Ślusarczyk 1997; Ślusarczyk 1991, 1997, 1998, 1999, Ślusarczyk i in. 1997; Ślusarczyk i zespół 1996).

3.4 Metoda radarowa

Również na rynek wchodzi aparatury radarowe, mogące śledzić występującą bardzo płytko pod powierzchnią terenu budowę geologiczną, elementy infrastruktury miast oraz pustki (Reynolds 1998; Kotyrba, Michalak 1994).

Warto zwrócić uwagę na polskie prace w tym zakresie (Marczak i zespół 1996; Ziętek, Karczewski 1994; Ziętek i in. 2000).

3.5 Geofizyka otworowa

Mając do dyspozycji otwory wiertnicze można stosować prześwietlanie międzyotworowe, lub z otworu do powierzchni terenu w zakresie transmisji fal sejsmicznych, elektromagnetycznych i radarowych oraz wykonując prześwietlanie elektrooporowe lub profilowanie grawimetryczne otworów (Owen 1983).

Równie ważną rolę w przywracaniu użytkowych terenów górniczych odgrywają profilowania geofizyki wiertniczej. Kompleksowe pomiary i wyniku interpretacji dostarczają danych o porowatości, szczelinowatości i składzie mineralnym ośrodka ułatwiających identyfikację stref zagrożonych ekspansją pustek (Fajkiewicz i in. 1999-2000).

Wraz z upływem czasu wymienione wyżej metody geofizyczne są doskonałe tak w zakresie aparatury pomiarowej jak i metod interpretacyjnych.

4. Przykłady zastosowań

Skuteczność metod geofizycznych w wykrywaniu i w ocenie dynamiki rozwoju deformacji nieciągłych powierzchni terenu powstających w wyniku ekspansji ku powierzchni terenu pustek wprost lub pośrednio dowodzą liczne ich zastosowania.

Przewodnikiem w tym zakresie może być załączony spis literatury, do którego komentarzem jest rozdział z tej pracy.

Metoda mikrograwimetryczna od wielu dziesiątek lat skutecznie służy do prognozowania zagrożenia dla szlaków kolejowych przebiegających przez tereny górnicze i zagrożonych

migracją pustek poeksploatacyjnych ku jego powierzchni. Pierwszy przykład (Fajklewicz i in. 1997) dotyczy rejonu Mieszko w Mysłowicach przez który biegnie linia kolejowa z Muchowca do Sosnowca i Zawiercia. Jest on częścią obszaru górniczego Kopalni Węgla Kamiennego, Mysłowice. W rejonie tym występują wychodnie utworów karbońskich, w których 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. Na rys. 4.1 przedstawiony jest przekrój geologiczny biegnący wzdłuż linii kolejowej wraz z hipotetycznym przebiegiem powstania katastrofalnego zapadliska terenu pod linią kolejową w dniu 8 września 1968 roku (Rosikoń 1979). Zapadlisko to oznaczono literami Z-1. Mimo przeprowadzonych prac wiertniczo-podszadzkowych w roku 1970 następowała reaktywacja tego zapadliska. Zwiększyła się jego średnica do 20 m i zniszczony został budynek nastawni przylegający do tej linii (rys. 4.2). Prawie w tym samym czasie powstaje zapadlisko Z-2. Usytuowanie obu zapadlisk przedstawione jest na rys. 4.3.

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

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

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 obecnie dwukrotnie. Ich celem jest 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.

Wnioskowanie o ekspansji pustek ku powierzchni terenu opiera się o metodę czasowych zmian mikroanomalií siły ciężkości. Bada się więc różnice czasowych zmian mikroanomalií siły ciężkości pomiędzy wynikami pomiarów w danej serii i-tej i bazowej oznaczonej liczbą 1, tzn. bada się różnice w każdym punkcie pomiarowym $\Delta g_i - \Delta g_1$. Analizuje się również różnice wyników pomiarów między kolejnymi seriami czyli $\Delta g_{i+1} - \Delta g_i$. Patent nr 73609.

Dzięki systematycznej kontroli terenu wykonywanymi badaniami mikrograwimetrycznymi na podstawie wyników badań serii 8 z dnia 23.12.1984 roku i serii 9 z dnia 19.03.1985 roku, a więc na podstawie mikroanomalií różnicowej seria 9 – seria 8, wykryta została ujemna mikroanomalia siły ciężkości z ekstremum w punktach 9/IV i 11/IV (rys. 4.3) tj. 5-10 metrów od wschodniej krawędzi torowiska.

Wykonane na jej obszarze trzy wiercenia wykryły występowanie pustek na głębokości od 41 do 48 metrów oznaczonych symbolem Z-3, przyjęły one 640 m³ emulgatu tzn substancji podszadzającej.

Od opisanego wyżej zdarzenia tj. od 19 marca 1985 roku, kolejne serie badań mikrograwimetrycznych nie wskazywały na możliwość powstawania nowych zapadlisk w rejonie badań, aż do dnia 6 listopada 1993 roku – zakończono wtedy pomiary mikrograwimetryczne serii 35. Gdy odniesiono je do wyników badań serii pierwszej z dnia 8 kwietnia 1983 roku, uznanej

za bazową, zauważono powstanie ujemnych czasowych zmian mikroanomalii siły ciężkości na obszarze oznaczonym symbolem Z-4 (rys. 4.3). Przylega on do zapadliska Z-1. Czasowe zmiany mikroanomalii siły ciężkości w tym obszarze, wynikające z wykonywanych kolejnych serii badań były już bacznie obserwowane od 27 serii pomiarowej, zakończonej 5 października 1989 roku!

Na rys. 2.13 przedstawiono dwie krzywe czasowych zmian mikroanomalii siły ciężkości wykreślone dla punktów pomiarowych 9 i 11 w profilu VII, leżących w obszarze Z-4. Przebieg czasowych zmian mikroanomalii siły ciężkości wyraźnie uzewnętrznia trwający ponad 4 lata proces rozwoju ekspansji pustki do chwili ogłoszenia prognozy o możliwości powstania deformacji nieciągłych powierzchni terenu. Prawe gałęzie obu krzywych odnoszące się do okresu czasu po prognozie, wskazują na postępującą stabilizację górotworu w wyniku przeprowadzonych prac wiertniczo-podsadzających.

Drugim przykładem skutecznej prognozy grawimetrycznej jest ocena zagrożenia ekspansją pustek powydobywczych linii kolejowej Kraków-Katowice w rejonie stacji PKP Katowice-Szopienice. 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 (Fajkiewicz 1992; Fajkiewicz i zespół 1989, 1995, 1997, 1998).

Na rysunku 4.4 przedstawione są wyniki pomiarów mikrograwimetrycznych przedstawione w postaci anomalii rezydualnych siły ciężkości (Fajkiewicz i zespół 1989). Jak łatwo zauważyć w obrazie ujawniają się ujemne mikroanomalie siły ciężkości, ich zamknięte koncentrycznie izoliny obramowujące pola koloru ciemnego odpowiadają zapadliskom powstającym w wyniku ekspansji pustek poeksploatacyjnych ku powierzchni terenu oraz sufozji poprzez zniszczoną i rozmytą płaszczyznę uskoku (rys. 4.5). Pola anomalii ujemnych zaznaczone kolorem jaśniejszym odpowiadają obszarom spękanego, zniszczonego górotworu.

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

Obszary zniszczonego górotworu, występowanie uskoków, pustek poeksploatacyjnych i spękań, których występowanie wynika z analizy anomalii rezydualnych siły ciężkości (rys. 4.4) przedstawiono na rys. 4.5.

Podobnie jak w powyżej wspomnianym obszarze Mieszko w KWK Mysłowice również i w tym rejonie głównym zadaniem badań mikrograwimetrycznych było śledzenie dynamiki tych zmian i wykrywanie nowych zagrożeń. Tego rodzaju oceny i prognozy wykonuje się na podstawie analizy w tych samych punktach pomiarowych czasowych zmian mikroanomalii siły ciężkości. Stąd wykonane zostały kolejne serie pomiarowe (Fajkiewicz i zespół 1995, 1996, 1998). W celu lepszego rozpoznania strefy uskokowej wykonane zostały badania sejsmiczne (Ślusarczyk i zespół 1996).

Na rysunku 4.6 przedstawiono wyniki badań sejsmicznych wykonanych w profilu, którego bieg zaznaczony jest na rys. 4.5. 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. 4.6).

Omawiane tu wyniki badań geofizycznych stanowią podstawę do wykonania prac geo-

technicznych pod szlakiem kolejowym biegnącym przez stację Katowice-Szopienice i uzdatniających go do eksploatacji pociągami poruszającymi się z dużą prędkością.

Jednym z ważnych obszarów zagrożonych deformacji nieciągłych powierzchni terenu jest również obszar pola górniczego KWK Jaworzno. W latach 60-tych miało tam miejsce zintensyfikowanie się tworzenia zapadlisk powierzchni terenu (Fajkiewicz 1967). Ważnym problemem było określenie zasięgu strefy zagrożenia górniczego występującego w pobliżu takiego zapadliska w kształcie leja. Nadrzedną sprawą było wyznaczenie miejsc w których mogą tworzyć się zapadliska i ich kierunku ekspansji. Na rys. 4.7 przedstawiony jest rozkład mikroanomali siły ciężkości nad takim lejem. Ujawnia on też występowanie wydłużonej ujemnej mikroanomali siły ciężkości, odpowiadającej uskokowi z rozmytą płaszczyzną z którą to tworzące się leje są genetycznie związane.

Dalsze badania geofizyczne prowadzone w tym rejonie metodą elektrooporową wykazały, że kawerny wiążą się z występowaniem w tym miejscu dwóch uskoków, zaznaczających się w postaci wydłużonych wysokooporowych anomali (rys. 4.8).

W pewnym okresie (Fajkiewicz 1988b) zjawisko to przebiegało groźnie na terenie elektrowni Jaworzno III w pobliżu chłodni nr 2, gdzie wykryte zostało siedem obszarów ujemnych mikroanomali siły ciężkości odpowiadającym in statu nascendi nowym lejom erozyjnym występującym w stropie utworów karbońskich tj. na głębokości ok. 20 m.

W nawiązaniu do wyżej wzmiankowanych wyników badań elektrooporowych pragnę zaznaczyć, iż w miejscach dogodnych dla tych badań uzyskuje się dobre tą metodą wyniki lokalizacji pustek w górotworze.

Na rys. 4.9 przedstawiona jest krzywa profilowania elektrooporowego układem dipolowym. Występujące w lewej części profilu wysokie opory tłumaczy się znacznym ekranowaniem prądowym wywołanym występowaniem fundamentów zabudowy.

Bardzo ważnym osiągnięciem w zakresie ochrony środowiska jest zastosowanie metod geoelektrycznych do wykrywania stref filtracji odcieków z wysypisk komunalnych (Antoniuk, Mościcki 1998). Nowym osiągnięciem jest możliwość kartowania i prognozowania migracji skażonych wód podziemnych na przedpolu zbiorników osadnikowych. Wyniki takich badań przedstawione są na rysunku 4.10.

Obszar górniczy KWK „Jaworzno” cechuje znaczne zagrożenie wynikające z obecności na tym terenie dużej ilości starych szybów górniczych niepodsadzonych lub nieprawidłowo podsadzonych. Procesy zaciskania samopodsadzenia się tych pionowych wyrobisk powoduje poważne naruszenie deformacjami nieciągłymi powierzchni terenu. W trakcie realizacji jednego z zadań centralnego planu badań podstawowych (Fajkiewicz 1971) na obszarze górniczym KWK „Jaworzno” wykryto ponad 60 szybów i szybków niepodsadzonych lub nieprawidłowo podsadzonych, występujących w ważnych dla tego rejonu miejscach rozwoju infrastruktury terenu i rozwoju budowli przemysłowych mieszkaniowych i drogowych.

Generalnie rzecz biorąc problem poszukiwania i wykrywania starych szybów górniczych ma szersze znaczenie i dotyczy wszystkich obszarów górniczych w Polsce, zwłaszcza że występowanie starych szybów górniczych nie jest znane. Występują one nie tylko pod ciągami ruchu drogowego i kolejowego, budowlami przemysłowymi, ale zdarza się, że występują one również pod budynkami mieszkalnymi (Fajkiewicz 1980; Fajkiewicz, Radomiński 1999).

W tym zakresie mamy dalsze liczne osiągnięcia w wykrywaniu nieznanymi obiektów szybowych, zarówno dotyczących górnictwa węglowego jak i rudnego, w szczególności występujących w obszarze Górnego Śląska (Fajkiewicz, Radomiński 1999; Fajkiewicz i in. 2000), jak również w OG ZGH Bolesław (Madej i zespół 1998, 1998-1999).

Dla przykładu na rys. 4.11 przedstawiony jest rozkład mikroanomali siły ciężkości nad

wykrytym szybem Maria-Anna w Zabrze. Wyniki przeprowadzonych badań wskazują iż szyb nie jest podsadzony, jak również, że w otoczeniu szybu teren jest zagrożony występowaniem wymyc materiału skalnego pod jego powierzchnią.

W zakresie wykrywania lokalizacji starych szybów górniczych prowadzi się badania georadarowe (Fajkiewicz, Radomiński 1999) współdziałając z zespołem kierowanym przez Jerzego Ziętka z Zakładu Geofizyki AGH.

Na rys. 4.12 przedstawione są wyniki wykrycia procesu ekspansji pustki ku powierzchni w bezpośrednim sąsiedztwie budynku mieszkalnego zagrożonego tą pustką wstępnie zlokalizowaną badaniami mikrograwimetrycznymi. Moim zdaniem jest to pierwsze zarejestrowanie procesu ekspansji pustki ku powierzchni terenu.

Jako ostatnie w tym opracowaniu omówione zostaną wyniki badań mikrograwimetrycznych i elektrooporowych wykonanych na terenie miasta Wieliczka w związku z wystąpieniami zagrożeń wodnych w Kopalni Soli Wieliczka (Fajkiewicz 1993; Fajkiewicz i in. 1995; Brudnik i in. 1997).

Głównym zagrożeniem dla powierzchni pola górniczego Kopalni Soli w Wielicze jest działalność wód, zarówno wglębnych jak i powierzchniowych.

Stwierdzono obecnie występowanie około 160 aktywnych wycieków. Większość z nich pojawia się w szczelinach deformacyjnych. Szczególnie niebezpieczne są te, które występują w komorach zawałowych na najwyższych poziomach i przy północnej granicy złoża.

W dniu 13 kwietnia 1992 roku zdynamizował się znany od 1910 roku wyciek w poprzeczni „Mina” na poziomie IV, w postaci gwałtownego wypływu cieczy wynoszącej materiał ilastopiaszczysty. Wyciek ten miał różną intensywność, został opanowany dopiero w listopadzie 1992 roku. Po nim nastąpiły dalsze.

Poszczególne gwałtowne fazom tego wycieku towarzyszyło groźne zjawisko osiadania powierzchni terenu. Centrum osiadania i pęknięcia powierzchni terenu występowało w południowo-wschodnim narożniku klasztoru OO.Franciszkanów-Reformatów, w pobliżu torów kolejowych. W dniu 12.09.1992 roku wstrzymano ruch kolejowy na odcinku Wieliczka-Wieliczka-Rynek. Uznano również zurbanizowany obszar na wschód od klasztoru za teren szczególnie zagrożony. Teren w centrum niecki osiadania, w okresie 2.06.-13.-09.1992, osiadł o 0,40 m.

W celu rozpoznania budowy geologicznej centralnej części miasta Wieliczka wykonano pierwsze zdjęcie grawimetryczne tego obszaru, w lipcu 1992 roku. W celu zbadania zmian w rozkładzie mas górotworu, a w szczególności tworzenia się stref wymywania materiału skalnego, pomiary grawimetryczne powtórzono na przełomie września października 1992 r.

Strefom wymycia lub przemieszczenia się mas górotworu towarzyszą rozkłady ujemnych lokalnych czasowych zmian anomalii siły ciężkości, które genetycznie wiążą się z ekspansją tych stref ku powierzchni terenu w postaci jego deformacji nieciągłych.

W wyniku przeprowadzonej analizy czasowych zmian anomalii siły ciężkości jakie miały miejsce między wynikami badań serii drugiej i pierwszej, a więc na podstawie anomalii różnicowych siły ciężkości, stwierdza się istnienie w obrębie centrum obszaru badań rozległej strefy ubytku masy w ośrodku skalnym. Strefa ta jest bardziej rozległa niż to wynika z zarejestrowanego obszaru osiadań w otoczeniu punktów siatki niwelacyjnej. A więc stwierdza się istnienie strefy ujemnych różnicowych anomalii siły ciężkości oznaczonej literą E (rys. 4.13) o przebiegu NW-SE. Świadczy ona o aktywnym procesie sufozji zarówno w stoku południowym, jak i północnym kotliny wielickiej. Zarejestrowano, więc proces dynamiczny. Należy zwrócić uwagę, że obszar występowania anomalii E obejmuje swoim zasięgiem zarówno klasztor jak i rejon zamku. W obu seriach badań wykryto te same dwie stacjonarne, niezależne

strefy ujemnych anomalii siły ciężkości. Północna obejmuje swoim zasięgiem ul. Br.A.Kosiby i klasztor, południowa ciągnie się od ul. Nowy Świat do podnóża zamku. Anomalia różnicowa siły ciężkości charakteryzująca proces dynamiczny w zestawieniu z wcześniej wymienionymi anomaliami świadczy o połączeniu obu stref procesem sufozji.

Druga istotna strefa ujemnych różnicowych mikroanomalii siły ciężkości biegnie z północy na południe. W jej obrębie występują anomalie D, G, F i B, świadczące również o zachodzącym procesie sufozji.

Zwraca również uwagę lokalna, dodatnia, różnicowa anomalia siły ciężkości H występująca w południowej części rejonu badań. Jej przyczyna jest trudna do wytłumaczenia. Nie wyklucza się możliwości okresowej akumulacji wody w porowatym, spękanym ośrodku skalnym. Ta sugestia może mieć bezpośredni związek z wynikami pierwszej serii badań grawimetrycznych.

Omówione wyżej rezultaty pomiarów grawimetrycznych są fragmentem uzyskanych wyników badań prowadzonych od roku 1992 na zlecenie Dyrekcji Kopalni Soli w Wieliczce, a w których prowadzeniu duże zasługi położył K. Jakiel z Zakładu Geofizyki AGH. Badania te prowadzone były w celu prognozowania możliwości wystąpienia deformacji nieciągłych powierzchni terenu miasta Wieliczki. Przedkładane prognozy wyprzedzały do 10 miesięcy występujące zagrożenia dla budowli linii komunikacyjnych i infrastruktury miasta.

5. Wnioski

Opracowywane są coraz to doskonalsze techniki pomiarowe w zakresie różnych metod geofizycznych stosowane do lokalizacji pustek. Pragnę tutaj z całą siłą podkreślić, że nie ma w podanym opracowaniu dokonanego podziału na metody lepsze i gorsze. Wszystkie wspomniane wyżej metody są jednakowo dobre o ile stosowane są właściwie tzn. zgodnie z zakresem możliwości metody, mogącej przyczynić się do rozwiązania postawionego zagadnienia.

W minionych latach wykonano wiele prac w zakresie poruszanego problemu, trudno je tutaj wszystkie omawiać, a nawet ze względu na ograniczoną możliwość ich prezentacji w tym opracowaniu jest to niemożliwe i niemożliwe staje też się ich wszystkie cytowanie, spis literatury przekroczył już liczbę stu prac.

Zdaję sobie sprawę, że wyrażony w tej pracy pogląd na rozwój i wagę poszczególnych opracowań i metod geofizycznych zastosowanych do rozwiązywania postawionych problemów nie jest pełny i nie jest zapewne całkowicie obiektywny. Wynika to z osobistych poglądów i doświadczeń Autora, również z jego nieznamomości wszystkich wykonanych w zakresie rozpatrywanego problemu prac opublikowanych i opracowań archiwalnych.

Z czysto formalnego względu mogłem ograniczyć się do omawiania wyłącznie prac opublikowanych w tzw. uznanych naukowych czasopismach krajowych i zagranicznych wtedy omawianie dorobku byłoby znacznie prostsze.

Doszedłem jednak do wniosku, że takim podejściem do problemu bardzo, a nawet drastycznie zuboży się prezentację ogromnego postępu jaki dokonał się w Polsce w omawianej dziedzinie jeżeli chodzi o rolę i rozwój badań geofizycznych.

Będę wdzięczny za wszelkie otrzymane informacje dotyczące niezauważonych ważnych prac i prac nieuwzględnionych w załączonym spisie literatury.

Przedstawiony w pracy materiał mam nadzieję winien przekonać czytelnika o wiodącej roli badań geofizycznych w zakresie wykrywania i prognozowania możliwości wystąpień deformacji nieciągłych powierzchni terenu będących skutkiem działalności antropogenicznej w ośrodku skalnym.

Wyniki badań geofizycznych minimalizują skutki zagrożeń dla życia ludzkiego jakie są związane z występowaniem tych deformacji, jego komfortu oraz dla wytworów kultury materialnej, szczególnie w rejonach silnie zurbanizowanych.

Praktycznie rzecz biorąc nie ma żadnej alternatywy co do roli jaką pełnią badania geofizyczne w zakresie umożliwiającym właściwe i bezpieczne prowadzenie prac mających na celu przywracanie wartości użytkowych terenom naruszonym działalnością górnictwem.

Literatura

- [1] Arzi A.A. 1975: Microgravity for engineering applications. *Geophys. Prospecting* 23, 408-425.
- [2] Antoniuk J., Miecznik W.J. 1973: Anomalie elektrooporowe nad modelem kawerny. *Przegląd Górniczy* nr 3.
- [3] Antoniuk J., Mościcki W.J. 1998: Badania geoelektryczne stanu środowiska geologicznego w otoczeniu składowisk odpadów komunalnych i przemysłowych. VII Konferencja „Problemy geologii w ekologii i górnictwie podziemnym”. GIG Katowice, 265-275.
- [4] Betlej K., Mikołajczyk A., Radlak J., Radlak I., Smrek A. 1985: Prace Przedsiębiorstwa Badań Geofizycznych związane z lokalizacją, likwidacją i kontrolą stanu podsadzenia pustek poeksploatacyjnych oraz starych szybów na terenie Górnego Śląska. Materiały I Krajowej Konferencji Nauk. Techn. „Zastosowanie metod geofizycznych w górnictwie kopalni stałych”, Jaworze, 6-8 listopada 1985. Wyd. AGH – Kraków, t. II, 39-52.
- [5] Brudnik K., Fajkiewicz Z., Jakiel K. 1997: Grawimetryczny obraz zagrożeń wodnych w obszarze górniczym KS „Wieliczka”. *Mat. Konf. szkoły Eksploatacji Podziemnej’97*. Szczyrk, 24-28 luty 1997, 501-508.
- [6] Colley G.C. 1963: The detection of caves by gravity measurements, *Geophysical Prospecting* 11, 1-10.
- [7] Cook J.C. 1965: Seismic mapping of underground cavities using reflection amplitudes. *Geophysics* 30(4), 527-538.
- [8] Dresen L., Fajkiewicz Z., Göetze H., Sommer H., Kook J. 1981: Die ortung oberflächennaber Hohlräume durch die bestimmung des verticalegradiante der schwere. *Glückauf-Forschungs* 42, 84-88.
- [9] Duda W., Bochnia N. 1970a: Dokumentacja badań mikrograwimetrycznych na obszarze budowlanym MSM “Górnik” w Bytomiu. *Arch. Przeds. Bad. Geof.* Warszawa.
- [10] Duda W., Bochnia N. 1970b: Dokumentacja badań mikrograwimetrycznych na obszarze budowlanym w Olkuszu. *Arch. Przeds. Bad. Geof.* Warszawa.
- [11] Fajkiewicz Z. 1956: O podziemnych pomiarach grawimetrycznych w zastosowaniu do górnictwa węglowego. Wyniki prac na kopalni Miechowice. *Archiwum Górnictwa*, t.1, z.4, 345-355.
- [12] Fajkiewicz Z. 1963: Detection of Faults in the BD Coal Mine by Means of Microgravity Measurements. *Bulletin de l’Academie Polonaise des Sciences. Série des Sciences Géologique et Géographique*. vol. XI, no 4, 197-200.
- [13] Fajkiewicz Z. 1964a: Badanie możliwości zastosowania pomiarów elektrycznych w celu wykrywania pustek zawałowych na terenie Miasta Chorzowa. *Arch. KWK „Wyzwolenie”*.
- [14] Fajkiewicz Z. 1964b: An Attempt at Plotting the Roof of the Carboniferous Layer in the BD Mine Means of Microgravity Measurements. *Bulletin de l’Academie Polonaise des Sciences. Séries des Sciences Géologique et Géographique*, vol. XII, no 1, 9-12.
- [15] Fajkiewicz Z. 1965: Wyniki zastosowania mikrograwimetrii w górnictwie węglowym. *Materiały Zjazdowe, Stow. Inż. i Tech. Górnictwa*. Katowice. IV Zjazd Górniczy, Sekcja VIII, 366-378.
- [16] Fajkiewicz Z. 1967: Zastosowanie metod geofizycznych do wykrywania uskoków i pustek w górotworze Ochrona Terenów Górniczych. *Wyższy Urząd Górniczy w Katowicach*, nr 2, 11-26.
- [17] Fajkiewicz Z. 1970a: Interpretacja badań mikrograwimetrycznych i gradientu pionowego siły ciężkości w celu wykrycia starych wyrobisk górniczych na obiekcie Olkusz, ul. Nowa Arch. Geoprojektu – Oddz. Kraków.
- [18] Fajkiewicz Z. 1970b: Interpretacja badań mikrograwimetrycznych wykonanych na terenie o obszarze 4500 m² położonym w Bytomiu przy ul. Łużyckiej. *Arch. Spółdz. Mieszk. “Górnik” w Bytomiu*.
- [19] Fajkiewicz Z. 1971: Projekt na rok 1971 z prac wykonywanych w ramach problemu 01.2.2, zadanie 05-09-03 pt. „Badanie metodami geofizycznymi wyrobisk pionowych celem zlokalizowania i okre-

- ślenia stopnia zlikwidowania starych szybów i szybków. Arch. GIG, Katowice.
- [20] Fajkiewicz Z. 1972: Pustki poeksploatacyjne i odkształcenia objętościowe górotworu w świetle pomiarów gradientu pionowego siły ciężkości i jej mikroanomali. Przegląd Górniczy nr 10, 425-431.
- [21] Fajkiewicz Z. 1974a: Mikrogravimetria w służbie górnictwa. Przegląd Górniczy nr 7/8, 400-406.
- [22] Fajkiewicz Z. 1974b: Report on the microgravimetric measurements made in the area of the Pilot Plant, Mishraq, Iraq in the years 1972 and 1973. Warna Hydrokop 1974, 1-120.
- [23] Fajkiewicz Z. 1976a: Gravity vertical gradient measurements for the detection of small geologic and antropogenic forms. Geophysics 41, 1016-1030.
- [24] Fajkiewicz Z. 1976b: Zastosowanie mikrogravimetrii w górnictwie węglowym. Publ. Inst. Geoph. Pol. Ac. Sci M-1 (97), 223-234.
- [25] Fajkiewicz Z. 1980: Mikrogravimetria Górnicza. Wyd. Śląsk, Katowice, 1980, 296-203.
- [26] Fajkiewicz Z. 1982: Prognozowanie metodą mikrogravimetryczną gwałtownych zaburzeń powierzchni terenów górniczych. Ochrona Terenów Górniczych nr 60, rok XVI, 10-15.
- [27] Fajkiewicz Z. 1983: Mikrogravimetrische Messungen zur Prognose von Senkungerscheinungen in Bergbaugebieten. Neue Bergbautechnik 13 Jahrgang-Juni 1983, Heft.6, 312-316.
- [28] Fajkiewicz Z. 1985: Geneza anomalii siły ciężkości i jej pionowego gradientu nad pustkami występującymi w skałach kruchych. Ochrona Terenów Górniczych. Nr 73/3 - 74/4, rok XIX, 3-13.
- [29] Fajkiewicz Z. 1986: Origin of the anomalies of gravity and its vertical gradient over cavities in brittle rock. Geophysical Prospecting vol.34, No 6, 1233-1254.
- [30] Fajkiewicz Z. 1988a: Application of microgravimetry method to detection of subsurface cavities and prediction of rock bursts – Advances in coal geophysics EAG. Hyderabad, India, 1-11.
- [31] Fajkiewicz Z. 1988b: Interpretacja badań mikrogravimetrycznych na terenie Elektrowni „Jaworzno III” w celu wyznaczenia stref zagrożonych możliwością powstania deformacji nieciągłych w rejonie chłodni kominowej nr 2, Zakładowy Zespół Gospodarczy KWK „Komuna Paryska” (Jaworzno). Arch. ZG AGH.
- [32] Fajkiewicz Z. 1992: Udział mikrogravimetrii w badaniu i prognozowaniu zagrożeń wywołanych eksploatacją górnictw. Konferencja Naukowo-Techniczna n.t.: Nowoczesne technologie w geodezji górniczej, Kraków, 8-9 maj, 65-82.
- [33] Fajkiewicz Z. 1993: Prognozowanie zagrożeń terenu w Wieliczce metodą mikrogravimetryczną. Sozologia na obszarze antropopresji – przykład Krakowa. Praca zbiorowa pod redakcją Andrzeja Paulo. Przewodni III Konferencji Sozologicznej. Kraków, 23-24 kwietnia 1995, 47-50.
- [34] Fajkiewicz Z., Jakiel K., Kucharska S. 1995: Przepływ wody w ośrodku przypowierzchniowym w centralnej części OG KS „Wieliczka” w świetle badań geoelektrycznych po wypływie w poprzeczni Mina w 1992 roku. Likwidacja zagrożenia wodnego dla zabezpieczenia Kopalni Soli Wieliczka. Mat. z III Spotkania Stowarzyszenia. Górnictwa Solnego Polish Salt Mining Association. Wieliczka, 18-19 wrzesień 1995, 113.
- [35] Fajkiewicz Z., Radomiński J. 1990: Prognozowanie metodą mikrogravimetryczną nieciągłych deformacji powierzchni terenu wywołanych pustkami poeksploatacyjnymi w kopalni Mysłowice. III Konferencja n.t. Postęp Naukowy i Techniczny w Geologii Górniczej Węgla Kamiennego. Szczyrk 10-12 październik 1990, 158-168.
- [36] Fajkiewicz Z., Radomiński J. 1994: Prognozowanie grawimetryczne możliwości wystąpienia 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.
- [37] Fajkiewicz Z., Radomiński J. 1996: Nowe możliwości grawimetrycznego odwzorowania stanu naruszenia górotworu ekspansją pustek poeksploatacyjnych. Archives of Mining Sciences, Volume 41, Issue 3, 325-339.
- [38] Fajkiewicz Z., Radomiński J. 1999: Mikrogravimetryczna ocena zagrożenia powierzchni terenu niezlikwidowanymi szybami górnictwami. Arcives of Mining Sciences. no 44, 293-305.
- [39] Fajkiewicz Z., Moj H., Paul J., Radomiński J. 2000: Zastosowanie mikrogravimetrii do eliminacji zagrożeń wynikających z dokonanej eksploatacji górnictw w budowie obwodnic Bytomia i Piekar Śląskich. Materiały Sympozjum Warsztaty 2000. Zagrożenia naturalne w górnictwie. Ustroń Śl. 29-31 maj 2000, 75-90.
- [40] Fajkiewicz Z., Szuster J., Graca K., Radomiński J. 1997: Prognozowanie grawimetryczne możliwości powstawania w wyniku ekspansji pustek, deformacji nieciągłych powierzchni terenu pod szlakiem kolejowym w obszarze górnictw KWK „Mysłowice”, Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona

- Środowiska w Górnictwie, Miesięcznik Wyższego Urzędu Górniczego 9(37)97, 9-14.
- [41] Fajkiewicz Z., Śliz J. 1971: Interpretacja pomiarów gradientu pionowego siły ciężkości dla celów lokalizacji starych wyrobisk górniczych. Archiwum Zakładu Górniczego „Lena”. Wilków, pow. Złotoryja.
- [42] Fajkiewicz Z., Śliz J. 1979: Analyse der Anwendungsergebnisse des vertikalen Turmgradienten der Schwerkraft zum Hoheraumnachweis im Ruhrgebiet bei Blumentholer Stollen and Schlebuscher Erbstollen. Berg-und Hüttenakademie in Kraków Institut für Angewandte Geophysik, Kraków, Februar, 1997, 1-78.
- [43] Fajkiewicz Z., Śliz J., Skudrzyk Z., Radomiński J., Machowska T., Szaraniec D. 1971: Nadzór naukowy oraz interpretacja pomiarów gradientu pionowego siły ciężkości dla celów lokalizacji podziemnych korytarzy na terenie miasta Chełm w rejonie Starówki. Arch. MRN w Chełmie Lubelskim.
- [44] Fajkiewicz Z., Zorski T., Jarzyna J., Bała M. 1999: Opracowanie profilowań geofizycznych wykonanych w otworach wiertniczych TP64/99, TP68/99, TP61/99, TP66/99, TP78/99 i TP74/99 w celu określenia litologii i parametrów petrofizycznych przewiercanych skał w rejonie linii kolejowej PKP Katowice-Warszawa w pobliżu dworca kolejowego Katowice-Szopienice. Dokumentacje w archiwum Katowickiego Holdingu Węglowego S/A/ oraz Kopalni Węgla Kamiennego „Wieczorek”.
- [45] 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.
- [46] 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”.
- [47] 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.
- [48] 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.
- [49] Fajkiewicz Z. i Zespół 1998: Badanie przestrzennej struktury górotworu w rejonie Dworca kolejowego Katowice - Szopienice we wschodniej części intersekcji szczeliny uskokowej $h=60-100$ m metodą sejsmicznych prześwietlań międzyotworowych – etap V.
- [50] 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 podszkockowych. Dokumentacja w archiwum Katowickiego Holdingu Węglowego S.A. oraz Kopalni Węgla Kamiennego „Wieczorek”.
- [51] Fenner R. 1938: Untersuchungen zur Erkenntnis des Gebirgdruckes, Santiago and Essen.
- [52] Foryś, T., Surowiec Z. 1980: Geofizyczne metody wykrywania pustek poeksploatacyjnych i innych nieciągłości górotworu. Mat. Symp.: „Geofizyka dla potrzeb regionu górnośląskiego”
- [53] Głuško V.T., Čeredničenko V.P., Usatenko B.S. 1981: Reologija gornogo massiva. Kiev. Naukowa Dumka, 22-49.
- [54] Goszcz A. 1985: Metody geofizyczne w problemach ochrony powierzchni i innych zagadnieniach technicznych kopalń. Materiały I Krajowej Konferencji Nauk. Techn. “Zastosowanie metod geofizycznych w górnictwie kopalni stałych”, t. II, Jaworze, 6-8 listopada 1985. Wyd. AGH – Kraków, 9-22.
- [55] Goszcz A., Skinderowicz M. 1985: Próby zastosowania metody elektrooporowej w problemach ochrony powierzchni. Materiały I Krajowej Konferencji Nauk. Techn. “Zastosowanie metod geofizycznych w górnictwie kopalni stałych”, t. II, Jaworze, 6-8 listopada 1985. Wyd. AGH – Kraków, 59-72.
- [56] Jaeger Ch. 1972: Rock mechanic and engineering, Cambridge University Press, 87-90 and 240-241.
- [57] Knothe St. 1975: Ochrona powierzchni przed szkodami górniczymi. Poradnik Górnika, tom. 2, Dział VIII, 1499-1511.
- [58] Kotyrba A., Michalak J. 1994: Zastosowanie impulsowego radaru do diagnostyki uszkodzeń budowli hydrotechnicznych. V Konf. Problemy geologii i ekologii w górnictwie podziemnym. Szczyrk 12-14.10.1994, 181-192.
- [59] Kwiatek J., Kowalski A., Zawada J. 1999: Zasady ochrony istniejących obiektów budowlanych i prognozowania deformacji powierzchni terenu w świetle wytycznych GIG. Warsztaty'99.

- Symposium nt. Zagrożenia naturalne w górnictwie. Jaworze 26-28 maj 1999, 153-168.
- [60] Ladanyi B. 1967: Expansion of cavities in brittle media. *Int. Jour. of Rock Mechanics and Mining Sciences* 4, 301-328.
- [61] Lyness D. 1985: The gravimetric detection of mining subsidence, *Geophysical Prospecting*, 33, 567-576.
- [62] Madej J. 1975: Badania rozkładu mas w zaporach ziemnych metodą mikrogravimetryczną. *Zeszyty Naukowe AGH. Geologia* z.24, 91-100.
- [63] Madej J. 1983: Untersuchung von Schüttdämmen durch mikrogravimetrische Messungen. *Neue Bergbautechnik* 13 Jg. Heft 2, 62-69.
- [64] Madej J. i zespół 1997: Badania geofizyczne terenów zagrożonych deformacjami nieciągłymi ze szczególnym uwzględnieniem terenów zainwestowanych w obszarze górniczym „Bolesław”. *Arch. ZGH, Bolesław w Bukowni*, marzec 1997, 1-124.
- [65] Madej J. i zespół 1998: Badania geofizyczne i nadzór naukowy wierceń i podsadzeń stref rozluźnień górotworu spowodowanych dokonaną eksploatacją w obszarze górniczym „ZGH Bolesław”. *Arch. ZGH, Bolesław w Bukowni*, grudzień 1998, 1-153.
- [66] Madej J. i zespół 1998-1999: Badanie geofizyczne starych szybów i szybików położonych w granicach terenu górniczego. *Arch. ZGH Bolesław*.
- [67] Marczak H. 1999: Powstawanie zapadlisk i innych form deformacji nieciągłych spowodowanych występowaniem pustek. *Materiały Sympozjum Warsztaty'99 nt. Zagrożenia naturalne w górnictwie. Jaworze 26-28 maj 1999*, 71-85.
- [68] Marczak H., Ślusarczyk R. 1997: Changes in seismic velocity due to fracture development in nine. *European Journal of Environmental and Engineering, Geophysics*, vol. 2. 1, 47-59.
- [69] Marczak H., Ziętek J., Karczewski J. 1996: Pomiary georadarowe w kopalni soli “Wieliczka”, *Zeszyty Naukowe AGH, Geologia*, t. 22, z. 2.
- [70] Marczak H., Zuberek W. 1994: *Geofizyka górnicza*, Śląski Wyd. Techn. Katowice, 283-302.
- [71] Materzok W., Mikołajczak A. 1974: Zastosowanie metody prześwietlania sejsmicznego do wykrywania stref anomalnych w ośrodku skalnym. *Biuletyn informacyjny „Geofizyka” – PBG, Warszawa*.
- [72] Mościcki W.J., Antoniuk J. 1999: Metoda obrazowania elektrooporowego (resistivity imaging). Przykład badań dla celów geologiczno-inżynierskich. *Geofizyka w geologii górnictwie i ochronie środowiska. V Konf. Nauk. Tech. Jubileusz 50-lecia Nauczania geofizyki w Akademii Górniczo-Hutniczej – Kraków. 22.06.1990*, 315-326.
- [73] Mukhopadhyay M. 1989: Tower vertical gravity gradient measurements for detection subsurface mine working in the Ranigani Coalfield. *Advances in Coal Geophysics AEG. Hyderabad. India*. 27-47.
- [74] Neumann R. 1967: La gravimétrie de haute précision-application aux recherches de cavities. *Geophysical Prospecting* 15, no 1, 1-12.
- [75] Owen T.E. 1983: Detection and mapping of tunnels and caves. *Developments in geophysical exploration methods – 5*. Ed. by A.A. Fitch Applied Science Publishers. London and New York. 161-258.
- [76] Palmer L.S., Hough J.M. 1953: Geoelectrical resistance measurements. *The Mining Mag. (London)* 88, 16-22.
- [77] Patent. Polska, nr 69758: Przenośna wieża do pomiaru gradientu pionowego siły ciężkości, 20 listopada 1974.
- [78] Patent. Polska, nr 72039: Sposób wykrywania pustek, nieciągłości i stref odprężeń występujących zwłaszcza w górotworze, 2 kwietnia 1975.
- [79] Patent. Polska, nr 73609: Sposób kontroli przemieszczania stref odkształceń w górotworze wywołanych podziemną eksploatacją górniczą lub pustkami występującymi w górotworze, 25 sierpnia 1975.
- [80] Pernod P., Piwakowski B., Delannoy B., Tricot J.C. 1989: Detection of shallow underground cavities by seismic methods physical modelling approach. *Acoustical Imaging*. v. 17. 705-713.
- [81] Reynolds J.M. 1998: An introduction and environmental geophysics. Chapter 12. *Ground penetrating radar*, 682-745.
- [82] Rosikoń A. 1979: *Budownictwo komunikacyjne na terenach objętych szkodami górniczymi*. Wyd. Komunikacji i Łączności - Warszawa, 118-125.
- [83] Rummel F. 1971: Uniaxial compression tests on right angular rock specimens with central holes, *Rock Fracture Proceeding of the International Symposium on Rock Mechanics, Nancy, 4-6th October, 1971*, vol. 2, 90-100.
- [84] Sachs J. 1981: Zastosowanie metod geofizycznych w rozpoznawaniu zagrożeń powierzchni na

- terenach płytkiej eksploatacji. *Ochrona Terenów Górniczych*, nr 56.
- [85] Sachs J. 1985a: Deformacje nieciągłe (zapadliska powierzchni) w obszarach górniczych w świetle teorii sklepienia ciśnień i własności dezintegracyjnych górotworu. *Materiały I Krajowej Konferencji Nauk. Techn. "Zastosowanie metod geofizycznych w górnictwie kopalni stałych"*, t. II, Jaworze, 6-8 listopada 1985. Wyd. AGH – Kraków, 23-32.
- [86] Sachs J. 1985b: Poszukiwanie pustek i prognozowanie zagrożeń powierzchni w obszarach dawnej eksploatacji górniczej na podstawie badań geofizycznych. *Materiały I Krajowej Konferencji Nauk. Techn. "Zastosowanie metod geofizycznych w górnictwie kopalni stałych"*, t. II, Jaworze, 6-8 listopada 1985. Wyd. AGH – Kraków, 33-38.
- [87] Schmidt J. 1926: *Statische Probleme des Tunnel und Druckstollenbaues*. Berlin.
- [88] Sharma P.V. 1997: *Environmental and engineering geophysics*. Cambridge University Press, 56-61.
- [89] Sommer H. 1983: *Untersuchungen zur Ortung oberflächennaher Hohlräume mit gravimetrischen Verfahren*. *Berichte des Institutes für Geophysik der Ruhr-Universität Bochum Reihe A-12*, 1-97.
- [90] Staš B., Dlouhy L., Knotek S., Skrabiš A. 1972: Seismický výzkum pásma rozvolněni a změni elastických parametru horhorminového mäsivu v okolí dolných děl, *Sbornik II*, wydaného při příležitosti celostátní konference „O využití geofiziky v inženýrské geologii a hydrogeologii” ve dnech 13 až 15 listopadu 1972 v Brně, 13-143.
- [91] Sterpi D., Sakurai S. 1997: Numerical analysis of laboratory tests on a model tunnel, *Deformation and progressive failure in geomechanics, IS-NAGOYA'97*, Editors: Akira Asaoka, Toshihisa Adachi, Fusao Oka, PERGAMON, 757-762.
- [92] Szczerbowski Z. 2000: *Badanie relacji zachodzących pomiędzy deformacjami górotworu a anomaliami grawimetrycznymi wywołanymi eksploatacją górniczą*. Praca doktorska. Biblioteka Główna AGH Kraków.
- [93] Śliz J. 1978: Wykrywanie pustek skalnych metodą gradientu pionowego siły ciężkości w rejonach zwartej zabudowy miejskiej. *Prace geologiczne 110*, Polska Akademia Nauk Oddział Kraków, Komisja Nauk Geologicznych, 1-54.
- [94] Ślusarczyk R. 1991: Wykorzystanie fal dyfrakcyjnych do wykrywania starych wyrobisk górniczych. *Mat. III Krajowej Konf. Nauk. Techn. „Zastosowanie metod geofizycznych w górnictwie kopalni stałych”*. Jaworze. Kraków. ZN AGH, t. 6. z.1.
- [95] Ślusarczyk R. 1997: Application of combined geophysical methods to the subsurface investigation in old mine activities area. *3d Meeting Environmental and Engineering Geophysics*. Aarhus. Denmark.
- [96] Ślusarczyk R. 1998: Detection of disturbed zones over old mine workings using seismic methods. *60 EAGE Conference and Tech. Exhib. Leipzig*.
- [97] Ślusarczyk R. 1999: Ocena zagrożenia powierzchni w rejonach dawnej eksploatacji górniczej na podstawie badań sejsmicznych. *Geofizyka w geologii i ochronie środowiska*. V Konferencja Nauk. Techn. Kraków 23.06.1999. Jubileusz 50-lecia nauczania geofizyki w Akademii Górniczo-Hutniczej, 327-335.
- [98] Ślusarczyk R., Pietsch K., Dec J. 1997: Application of seismic methods into determination of the range of fractured zones caused exploitation. *59 EAGE Conference & Techn. Exhib. Geneva*.
- [99] 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 mikrogravimetrycznych i sejsmicznych wykonanych w tym rejonie. *Arch. Katowicki Holding Węglowy KWK „Wieczorek”*.
- [100] Talobre J. 1957: *La Mécanique des Rooches*. Paris.
- [101] Terzaghi K., Richari F.E. 1952: Stresses in rock around cavities. *Géotechnique 3*, 57-99.
- [102] Trávníček L. 1974: Použití radioizotopické zjišťování zmian objemové hmtnosti uhelných sloji v okolí dulních děl. *Geofizyka v Hornické praxi*. VSETIN, 183-193.
- [103] Qianshen W., Chijun Z., Fuzhen J., Wenhu Z et al. 1996: *Microgravimetry. A series of solid Earth Sciences Research in China*. Sciences Press Beijing, China, 113-126.
- [104] Zakolski R. 1972: Określanie nieciągłości górotworu metodami geofizycznymi na obszarze Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Praca doktorska, Biblioteka GIG – Katowice.
- [105] Ziętek J., Karczewski J. 1994: Niektóre aspekty badań georadarowych w utworach krasowych „*Technika Poszukiwań Geologicznych*, nr 4-5.
- [106] Ziętek J., Karczewski J., Tomecka-Suchoń, Carcione J., Padoan G. 2000: Observations and results of GPR modelling of sinking holes in upper Silesia (Poland), *European Journal of Environmental and engineering geophysics*.

Significance of geophysical methods in ground surface restoration process due to performed underground mining exploitation

The paper presents in outline the development of geophysical applied into predicting the effects of underground mining exploitation on the surface. The study refers to human life protection, abating the nuisances of living in endangered regions, and preventing destruction of material culture including buildings and infrastructure. Case studies are presented and the application of geophysical investigations into detecting post-exploitation caverns expanding to the ground surface in discussed. Of particular importance are geophysical applications connected with the protection of transportation routes and urban and industry areas. Results of geophysical measurements carried out in the towns of Wieliczka, Katowice, Bytom, Sosnowiec, Zabrze, Jaworzno, Olkusz, Bolesław and Mysłowice are given. Results of studies made by Polish geophysicists in the USA, Iraq, Vietnam and Germany are also mentioned. So far there is no alternative to geophysical investigations applied into predicting and detecting hazards induced by human activity in the rock environment.