

Jacek SZEWCZYK
Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

Długookresowe zmiany ukształtowania powierzchni terenu Wieliczki pod wpływem procesów zachodzących w górotworze

Streszczenie

W rejonie Wieliczki kumulują się wpływy kilku procesów naturalnych i technogennych, powodujących powstanie deformacji powierzchni terenu; należą do nich ruchy orogeniczne Karpat, naturalne osuwiska zboczy wzgórz okalających dolinę Serafy, sufozja wodna oraz zaciskanie wyrobisk górniczych. Obserwacje tych deformacji prowadzono od 1926 r., doskonaląc ich metodykę i zwiększając dokładność. Pozwala to na dokonywanie coraz ściślejszych analiz skutków wspomnianych procesów. Przedstawiono najnowszy stan deformacji powierzchni terenu wraz z przewidywaniami ich dalszego kształtowania się.

1. Wstęp

Rejon Wieliczki stanowi obszar interesujący ze względu na swe szczególne położenie oraz nagromadzenie różnego rodzaju ruchów, powodujących zmianę ukształtowania powierzchni. Rejon ten znajduje się, bowiem na skraju Pogórza Karpackiego i poddawany jest wpływom ruchów geodynamicznych tej formacji, na które składają się: tektonika płyt, dekompresja postglacjalna oraz lokalna tektonika Karpat; wielkość tych ruchów nie była dotychczas badana. Skomplikowanej strukturze tektonicznej towarzyszy niestabilność górotworu, o czym świadczą zaburzenia powstałych w neogenie i czwartorzędzie warstw osadowych. Powstawaniu zagrożeń sprzyja także położenie Wieliczki w dolinie rzeki Serafy pomiędzy dwoma pasmami wzgórz, na zboczach których obserwuje się osuwiska oraz sufozję wodną. Zjawiska te są związane ze składem gleb (przeważają tu utwory drobnoziarniste, lessowe) oraz z wpływem procesu zaciskania wyrobisk kopalni na zmiany morfologii terenu i stan wód gruntowych. Mogą one powodować niekiedy bardzo znaczne deformacje powierzchni; wyciek wody do kopalni w rejonie chodnika „Mina” w 1992 r., połączony z sufozją wodną na północ od granicy złoża, stał się przyczyną wystąpienia obniżeń, dochodzących do 2,5 m w ciągu krótkich odstępów czasu i stworzenia zagrożenia dla obiektów powierzchni (zabytkowego klasztoru, pobliskich domów mieszkalnych, torów kolejowych). Na zachodnim krańcu obszaru górniczego, w rejonie trwającej jeszcze eksploatacji soli metodą otworową, znajduje się ponadto wysypisko śmieci komunalnych dla miasta Krakowa, wywierające niedostatecznie zbadany wpływ na morfologię terenu.

W rejonie Wieliczki można, więc wyróżnić następujące procesy, powodujące zmiany morfologii powierzchni:

- ruchy tektoniczne, związane z przemieszczaniem się płyt, dekompresją postglacjalną i lokalną tektoniką Karpat; ich wielkość (wstępnie oceniana na kilka do kilkunastu mm rocznie) jest dopiero przedmiotem badań;
- ruchy technogenne, wywołane skutkami wielowiekowej eksploatacji górniczej;

- ruchy osuwiskowe o charakterze głównie naturalnym;
 - ruchy wskutek zmian stosunków wodnych w górotworze, w tym wskutek sufozji wodnej.
- Złoże wielickie, uformowane w miocenie, należy do złóż ewaporatowych, powstałych przez odparowanie wody morskiej. Pokład soli po powstaniu został poważnie zdeformowany. Na niewielkich głębokościach (50÷140 m) występują ility zielone (zubry), wymieszane z bryłami soli zielonej. Niższe partie mają charakter pofałdowanego złoża pokładowego z przewarstwieniami ilasto-anhydrytowymi. Skały górotworu są plastyczne; w stropie i spągu złoża zalegają utwory ilaste lub ilasto-gipsowe, izolujące złoże od warstw wodonośnych (czwartorzędowych i jurajskich). Przypadkowe przebitcie robotami górniczymi warstwy ilowej, izolującej złoże, powodowało kilkakrotnie w historii kopalni zalewanie jej wodami.
- Wyrobiska kopalni są zlokalizowane na dziewięciu poziomach, znajdujących się na głębokościach od 57,4 m do 327,2 m. W ich skład wchodzi około 300 km chodników podziemnych oraz 2050 komór, o łącznej objętości 7,5 mln m³. Szczególne właściwości reologiczne górotworu solnego powodują, że następuje powolne zaciskanie się wyrobisk kopalnianych, przenoszące się na powierzchnię i powodujące powstanie na niej niecek obniżeniowych.

2. Badania deformacji powierzchni terenu w rejonie Wieliczki

Ujawniające się na powierzchni terenu deformacje i zmiany geomorfologiczne spowodowały, że już w 1926 r. przystąpiono do ich obserwacji metodami geodezyjnymi. Powstałą wówczas sieć uzupełniano i rozszerzano w latach następnych. W celu określenia wielkości poziomych i pionowych przemieszczeń powierzchni w latach dziewięćdziesiątych założono na obszarze górniczym Wieliczki dziesięć południkowych linii obserwacyjnych oraz jedną linię równoleżnikową, których punkty krańcowe usytuowano poza zasięgiem wpływów eksploatacji. Do linii dołączono sieci punktów w rejonie wycieku wody do chodnika „Mina” oraz w rejonie otworowej eksploatacji soli w Baryczy. W ten sposób powstała sieć obserwacyjna, w skład której wchodzi następujące zespoły punktów:

- punkty linii obserwacyjnych o przebiegu południkowym: „Barycz”, „Daniłowicz”, „Grabówki”, „Kopernik”, „Kościeszko”, „Rożnowa”, „Sułków” i „Szmidt”, a także dwóch nowych linii południkowych i jednej linii równoleżnikowej, służącej do nawiązania wszystkich pozostałych; ogółem 850 punktów;
- punkty siatki obserwacyjnej „Mina”, zastabilizowane w rejonie wycieku wody do wyrobisk kopalni; ogółem 236 punktów ziemnych i 271 reperów ściennych;
- punkty siatki obserwacyjnej „Barycz”, założone w rejonie wysypiska śmieci komunalnych dla miasta Krakowa i wokół trwającej eksploatacji soli metodą otworową; ogółem 320 punktów;
- rozproszone punkty ziemne i ścienne na terenie górniczym Wieliczki; ogółem około 950 punktów, z których część wykorzystuje się podczas obserwacji przemieszczeń sieci „Mina” i linii obserwacyjnych; część pozostała obserwuje się w interwałach kilkuletnich.

Punkty linii obserwacyjnych stabilizowano w postaci rur żeliwnych wypełnionych betonem, wierconych w ziemi na głębokość 0,5÷1,5 m; w górnej części punktu znajduje się czop mosiężny z nawierconym otworem, pozwalający na precyzyjne określenie właściwego położenia punktu. Linie obserwacyjne (oprócz nowo założonych linii południkowych i linii równoleżnikowej) mierzono od 1992 r. precyzyjnie metodą liniowo-kątową w celu wyznaczenia współrzędnych płaskich oraz metodą niwelacji precyzyjnej w celu wyznaczenia wysokości. Przy dużej dokładności pomiaru kątowo-liniowego (pomiar kątów w trzech seriach precyzyjnym teodolitem, pomiar długości dalmierzem Di2002), zastrzeżenia budził dotychczasowy

sposób nawiązania, wykonywany - z braku innych możliwości - do punktów poligonowych niskiej klasy. Podobny problem powstał przy dowiązaniu niwelacji precyzyjnej, wykonanym jednopunktowo do odległego reperu (około 3,5 km) w Krakowie-Prokocimiu.

Punkty ziemne siatki obserwacyjnej „Mina” są zastabilizowane w identyczny sposób, jak punkty linii obserwacyjnych; konstrukcja punktów ściennych umożliwia również pomiar kąto-liniowy (metodą total-station, przez nałożenie lustra na reper). Siatkę tę obserwowano wielokrotnie w latach 1992 - 2000 metodą niwelacji precyzyjnej (ogółem 37 serii pomiarowych w zróżnicowanych interwałach czasowych), a jej część centralną - kilkunastokrotnie metodą kąto-liniową (precyzyjną). Obserwacji kąto-liniowych punktów ściennych do tej pory nie podjęto. Również i w tym przypadku podstawowy problem stanowiło właściwe nawiązanie siatki; nawiązanie wysokościowe prowadzono jednopunktowo (od punktu dowiązania linii obserwacyjnych), dla nawiązania kąto-liniowego szukano stałych punktów siatki.

Punkty siatki obserwacyjnej „Barycz” stabilizowano identycznie, jak punkty linii obserwacyjnych. Siatkę objęto od 1992 r. obserwacjami niwelacyjnymi (precyzyjnymi), dowiązanymi do reperu, wspólnego dla linii obserwacyjnych i sieci „Mina”, a od 1996 r. – także pomiarami przemieszczeń punktów.

Rozproszone repery ziemne i ścienne terenu górniczego mają określone wysokości w wyniku pomiarów, wykonanych metodą niwelacji precyzyjnej, dowiązanej jednopunktowo do reperu w Krakowie - Prokocimiu. Część tych reperów, pochodzących z różnych lat i stabilizowanych w różny sposób, jest wykorzystywana podczas obserwacji linii i siatek oraz do orientacji wysokościowej przez szyby kopalni.

Jak już zaznaczono, podstawowym problemem dla uzyskania wystarczająco precyzyjnych danych o przemieszczeniach punktów, był sposób dowiązania poszczególnych zespołów sieci. Przeprowadzenie pomiarów satelitarnych umożliwiło jego rozwiązanie przez wyznaczenie współrzędnych płaskich i wysokości wybranych punktów, rozmieszczonych systematycznie w całej sieci.

Dla badania skutków zmian morfologii powierzchni, wynikających w rezultacie wspomnianych wyżej procesów, zaprojektowano w 1994 r. sieć geodezyjnych punktów oporowych, znajdujących się poza terenem górniczym kopalni. Punkty te zlokalizowano w sposób korzystny dla pomiaru GPS (odkryty horyzont, dogodny dojazd lub dojście). Tworzą one wokół terenu górniczego dwa pierścienie. Punkty pierwszego pierścienia (w liczbie pięciu) znajdują się w odległości do kilku kilometrów od granic terenu górniczego. Dodatkowo na wzgórzach, okalających dolinę wielicką od strony południowej, zastabilizowano w ramach projektu badawczego trzy tak zwane punkty wiekowe. Zadaniem tych punktów jest przede wszystkim stworzenie osnowy dla obserwowania ruchów o charakterze orogennym, związanych z wielowiekowym dynamizmem Karpat i położeniem Wieliczki na obrzeżu tego systemu górskiego. Punkty te założono w sposób, zapewniający ich wieloletnie użytkowanie. Słup betonowy o długości około 10 m, stanowiący podstawę dla głowicy punktu, umocowano w zwięzłych utworach trzeciorzędowych. Lokalizację punktów wybrano w oparciu o mapę miąższości tych utworów. Głowica zawiera znak główny i trzy dodatkowe, pozwalające na wyznaczenie przy pomocy niwelacji precyzyjnej ewentualnych nachyleń słupa. Punkty zabezpieczono specjalną osłoną przed wpływami atmosferycznymi oraz przed przypadkowym lub rozmyślnym zniszczeniem (Góral i in., 1995).

W odległości kilkunastu kilometrów od Wieliczki zaprojektowano drugi (zewnętrzny) pierścień punktów oporowych, w skład którego weszło również pięć punktów. Punkty tych pierścieni dowiązano do sieci POLREF, stanowiącej fragment europejskiej sieci punktów satelitarnych EUROREF. Pomiar wykonano przy pomocy odbiorników Wild-Leica, a następ-

nie tę samą sieć pomierzono odbiornikami ASHTECH MD-XII. Stosowano przy tym sesje pomiarowe, trwające 1÷1,5 godziny, przy czasie integracji sygnałów 15 s. Obserwacje sieci opracowano za pomocą oprogramowania PRISM2. Uzyskano błąd średni położenia punktu sieci oporowej, nie przekraczający ± 3 mm (przeciętnie $\pm 1,5 \div 2,0$ mm). Wynik ten, odnoszący się do wewnętrznej dokładności sieci, jest porównywalny z innymi rezultatami światowymi (Góral i in. 1996).

Do pomierzonej sieci punktów oporowych nawiązano następnie pomiary kąto-liniowe punktów linii obserwacyjnych. Przykładem postępowania jest pomiar linii obserwacyjnej „Kościszko”, o ogólnej długości 2,7 km, liczącej 66 punktów. Pomiar linii wykonano teodolitem precyzyjnym T2002 i dalmierzem Di2002, z błędem średnim pomiaru kąta $\pm 5''$ i długości ± 1 mm. Obliczenie współrzędnych punktów linii wykonano w oparciu o nawiązanie do punktu wiekowego WIEC na południu oraz do trzech punktów na północnym skraju linii, których współrzędne wyznaczono z obserwacji satelitarnych; nadto z tychże obserwacji określono współrzędne dwóch punktów, znajdujących się w środku linii. Stworzyło to możliwość przeprowadzenia wyrównania wariantowego, w zależności od przyjęcia stałości punktów nawiązania. Uwzględniono przy tym redukcję długości na poziom elipsoidy. Obliczeń dokonano w dwóch układach współrzędnych: przyjętym podczas wyrównania sieci oporowej układzie Gaussa-Krügera oraz w lokalnym układzie wielickim. Rezultaty wyrównania dla poszczególnych wariantów oceniono na podstawie uzyskanych charakterystyk dokładnościowych, zwłaszcza średniego błędu położenia punktu, średniego błędu azymutu oraz wartości przeciętnej i maksymalnej poprawek długościowych i kątowych. Dla wyrównania w układzie Gaussa-Krügera uzyskano przy założeniu stałości punktów krańcowych przeciętną wartość średniego błędu położenia punktu po wyrównaniu $\pm 1,0$ mm (wartość maksymalna $\pm 1,3$ mm), a po uwzględnieniu błędności punktów nawiązania - ± 3 mm.

Ze względu na dużą ilość materiałów geodezyjnych, głównie map, a także wobec prowadzenia przez kopalnię całej dokumentacji mierniczej w lokalnym układzie Wielickim, współrzędne nowych punktów wyznaczonych techniką GPS przelicza się na współrzędne w tym układzie. Przeliczenie to wykonuje się przy pomocy transformacji, pośrednio poprzez lokalny układ Krakowski. Podstawą obu układów Wielickiego i Krakowskiego jest dawny układ katastralny dla obszaru Małopolski. Parametry tego układu nie są w pełni znane. Wiadomo, że jest to tzw. układ lwowski z punktem początkowym na Kopcu Unii Lubelskiej we Lwowie o współrzędnych φ , λ wyrażonych w systemie Hermanskogel. Bliżej nieokreślone jest jednak odwzorowanie, zastosowane do obliczenia współrzędnych płaskich. Z przeprowadzanych wcześniej analiz wynika, że jest ono bardziej zbliżone do odwzorowania konforemnego, niż do odwzorowania soldnerowskiego.

Przy wyrównaniu pomiarów w układzie wielickim powstały trudności, związane z brakiem znajomości parametrów tego układu (założonego jeszcze w XIX wieku). Wyrównanie przy redukcjach długości do poziomu elipsoidy powoduje powstanie znacznych błędów (do ± 52 mm) położenia punktów, co wskazuje na odmienny poziom odniesienia. W związku z tym w ramach przeprowadzonych obliczeń poszukiwano optymalnego sposobu redukcji długości, minimalizującego błędy położenia po wyrównaniu. Oczekiwany rezultat otrzymano przy założeniu, że powierzchnią odwzorowania układu jest powierzchnia sferoidalna, leżąca na wysokości 278 m nad powierzchnią elipsoidy (Banasik i Szewczyk 1997). Przy tym założeniu i po przeprowadzeniu stosownych redukcji otrzymano przeciętną wartość średniego błędu położenia punktu (dla identycznego wariantu, jak przy układzie Gaussa-Krügera), wynoszącą $\pm 1,5$ mm (wartość maksymalna $\pm 1,8$ mm), a po uwzględnieniu błędności punktów nawiązania - przeciętnie $\pm 3,2$ mm, maksymalnie do $\pm 5,0$ mm.

Przeprowadzenie pomiaru linii w sieci zintegrowanej pozwoliło na wyznaczenie (po uwzględnieniu różnic w nawiązaniu) poziomych przemieszczeń punktów linii w porównaniu z pomiarem poprzednim. Niemal całkowita identyczność błędów wyznaczenia współrzędnych z pomiarem satelitarnego z błędami położenia punktów linii po wyrównaniu, wskazuje na integralność dokładnościową obserwacji GPS i precyzyjnych obserwacji kątowo-liniowych, pod warunkiem wprowadzenia odpowiednich redukcji i poprawek, nie uwzględnianych zazwyczaj w przypadku mniej dokładnych pomiarów metodami klasycznymi.

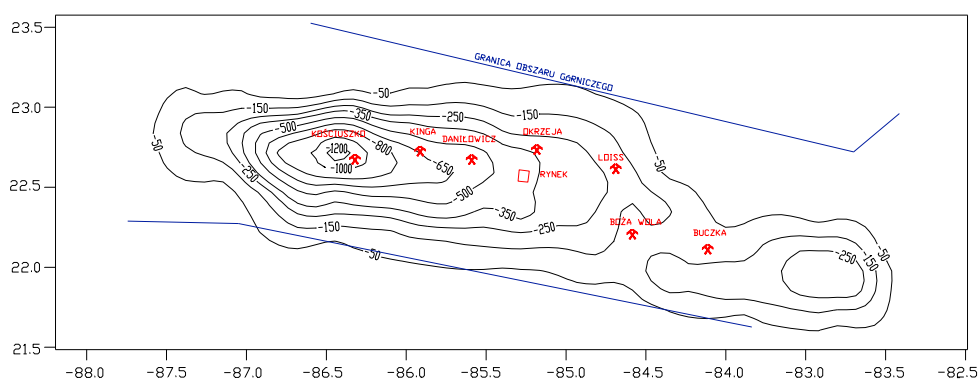
Wyniki obserwacji geodezyjnych na terenie Wieliczki były wielokrotnie przedstawiane (także na forum międzynarodowym) jako w znacznej mierze pionierskie pod względem skali i rodzajów przeprowadzonych eksperymentów (Maciaszek i Szewczyk 1998, 2001).

3. Ocena wielkości i charakteru ruchu powierzchni terenu górniczego

Charakterystykę ruchu powierzchni terenu oparto o omówione w pkt. 2 obserwacje reperów sieci powierzchniowej, punktów linii obserwacyjnych i reperów przyszybowych (obserwacje siatki obserwacyjnej „Mina” omówiono osobno w pkt. 4).

Wykonane w 2000 r. przez Przedsiębiorstwo Miernictwa Górniczego obserwacje reperów sieci powierzchniowej oraz linii obserwacyjnych odniesiono do poprzedniego pomiaru, wykonanego w 1996 r., a także do pomiaru sieci w 1970 r. i w 1984 r. Dla reperów przyszybowych istniała także możliwość porównania wysokości z pomiarem, wykonanym w 1999 r., a dla północnej połowy linii obserwacyjnej „Kościuszek” - z pomiarem, wykonanym w 1998 r. Ponieważ proces osiadań wykazuje w zasadzie przebieg liniowy, charakterystyka deformacji terenu na podstawie długoletnich porównań jest wystarczająco pełna.

Na podstawie rezultatów pomiarowych można stwierdzić, że na terenie górniczym Wieliczki (wyłączając z rozważań obszar Baryczy) zaznaczają się dwie niecki obniżeniowe (rys. 3.1).



Rys. 3.1 Mapa izolinii obniżenia terenu Wieliczki w latach 1970-2000
 Fig. 3.1 The map of isolines of the subsidence of the Wieliczka area in 1970-2000

Pierwsza z nich obejmuje swym zasięgiem centralną część miasta Wieliczka, sięgając na północy ul. Brata A. Kosiby i Parku im. A. Mickiewicza, na zachodzie dochodząc do Podlesia i Grabówek, na południu - Sierczy, a na wschodzie – rejonu szybu „Wilson”. Powierzchnia niecki wynosi około 3,5 km²; tworzy ona prostokąt o boku równoleżnikowym około 3,5 km oraz boku południkowym 1 km. Jej centrum znajduje się w rejonie szybu „Kościuszek”; maksymalne obniżenie w okresie lat 1970-2000 wynosi 1085 mm. Druga niecka, o znacznie

mniejszych rozmiarach (1,5 km w kierunku równoleżnikowym i 0,7 km w kierunku południkowym) ma swoje centrum w Lednicy Górnej, przy ul. Gdowskiej; na zachodzie niecka ta styka się z pierwszą niecką, na wschodzie osiąga Tomaszkowice. Centrum niecki w Lednicy Górnej wykazało w latach 1970-2000 obniżenie, wynoszące maksymalnie 339 mm. Powstanie pierwszej niecki wiąże się z zaciskaniem wyrobisk centralnej części kopalni, druga niecka związana jest z zaciskaniem wyrobisk peryferyjnych, eksploatowanych wspólnie we wschodniej części kopalni.

Kształtowanie się niecek w ostatnim okresie można scharakteryzować na podstawie okresowych obniżen (w latach 1996-2000) oraz analizy zmian prędkości osiadań w poszczególnych rejonach powierzchni terenu. W pierwszej niecce wielkości znaczących (do 5 mm) obniżen okresowych nie wykraczają nigdzie poza obręb dotychczasowej niecki, sięgając od centrum przy szybie „Kościeszko” do 1500 m na zachód, 1900 m na wschód, 400 m na północ i 500 m na południe. W dalszym ciągu ma miejsce pogłębianie niecki (czteroletnie przyrosty obniżen w centrum wynoszą 80÷100 mm), przy czym wielkości obniżen okresowych szybko maleją na zewnątrz tego centrum. W rejonie Lednicy Górnej druga z niecek obniżeniowych pogłębia się z nieco mniejszą intensywnością (50÷84 mm w ciągu czterech lat); również i tu znaczące osiadania okresowe mieszczą się w granicach dotychczasowej niecki, a ich wielkość szybko maleje na brzegach niecki.

Na podstawie mapy prędkości obniżen można stwierdzić, że proces obniżen w obrębie pierwszej niecki ulega hamowaniu. Wskazują na to porównania szybkości obniżen w trzech przekrojach czasowych: 1970-2000, 1984-2000 oraz 1996-2000. Dla rejonu szybu „Kościeszko” odpowiednie wartości wynoszą: 36,2 mm/rok, 30,1 mm/rok i 25,0 mm/rok. Odpowiednie wielkości dla szybów „Kinga” i „Daniłowicz” kształtują się następująco:

- szyb „Kinga”: 18,5 mm/rok, 17,1 mm/rok i 16,5 mm/rok,
- szyb Daniłowicz: 14,2 mm/rok, 14,1 mm/rok, 12,8 mm/rok.

Powierzchnia terenu w rejonach szybów „Regis” i „Boża Wola” obniża się wyraźnie wolniej, niż rejon głównych szybów kopalnianych. Prędkość obniżen wynosi tu około 10 mm/rok i jest w zasadzie stała. Rejon peryferyjnego w stosunku do centralnych wyrobisk kopalnianych szybu „Wilson” pozostaje stabilny; obniżenia powierzchni wynoszą około 1 mm/rok. Prędkość osiadania maleje również w rejonie osuwiska w Sierczy, a także na północy. Można stwierdzić, że stopień zmniejszenia intensywności obniżen jest większy na peryferiach niecki, co dowodzi zmniejszania się zasięgu oddziaływania wyrobisk na powierzchnię terenu.

W przypadku drugiej niecki proces ten nie jest już zauważalny; prędkość obniżen nie wykazuje wyraźnej tendencji do zmniejszania się, a w centrum zaobserwowano nawet w ostatnim okresie pewne zwiększenie prędkości (do 21 mm/rok, przy dotychczasowej wartości 11÷14 mm/rok). Obniżenia te są wynikiem uwidaczniania się wpływów procesu zaciskania wyrobisk, eksploatowanych wspólnie metodą mokrą na poziomach IV-VI.

Rezultaty obserwacji deformacji powierzchni terenu w rejonie głównych szybów kopalnianych wskazują, więc na stałe jej obniżenie (z tendencją do hamowania w ostatnich latach), wynoszące około 20 mm/rok wokół szybów „Kinga” i „Daniłowicz” oraz około 25 mm/rok wokół szybu „Kościeszko”.

Wpływ procesu zaciskania wyrobisk w centralnej części kopalni na powierzchnię terenu wykazuje zatem stabilność. Przejawia się tendencja do zmniejszania się intensywności obniżen w miarę upływu czasu. Przyczynę tego można upatrywać we wpływie podszadania wyrobisk. Takie zmniejszenie nie jest obserwowalne we wschodniej części terenu, gdzie ujawnia się

wpływ zaciskania niezlikwidowanych wyrobisk, eksploatowanych wspólnie na poziomach IV-VI.

4. Analiza przyczyn i przebiegu deformacji pod wpływem sufozji

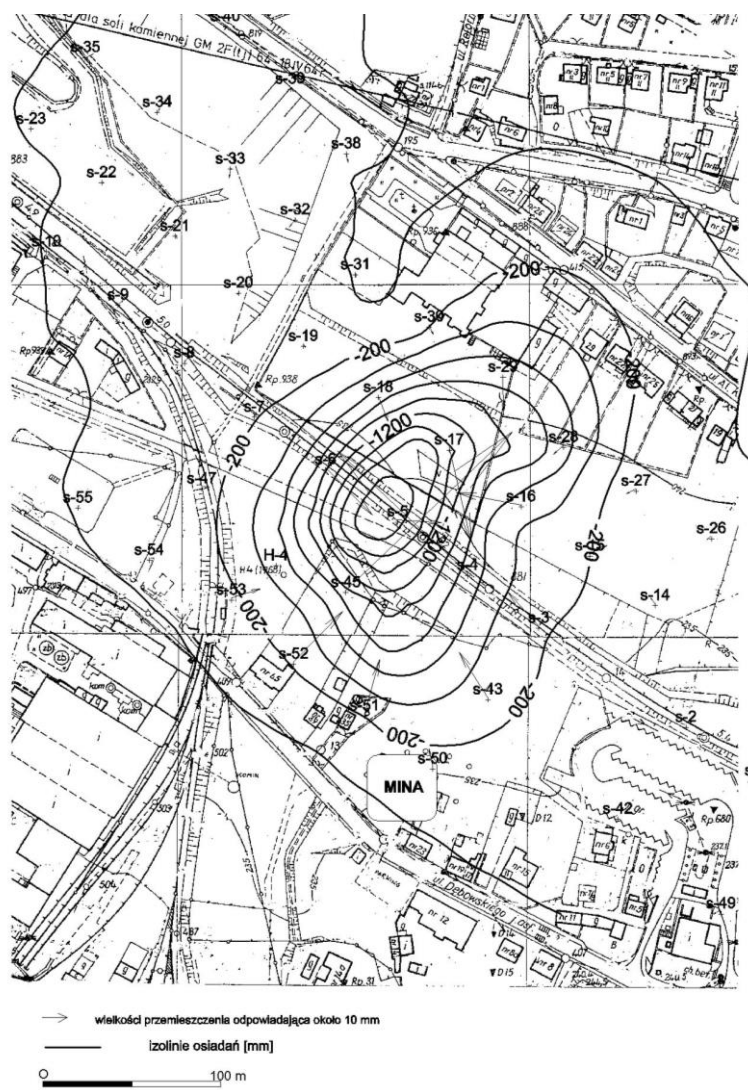
W 1992 r. miał miejsce niekontrolowany, gwałtowny wypływ wody do wyrobiska „Mina” na IV poziomie kopalni. Wypływowi wody towarzyszyło powstanie znacznych i szybko pojawiających się deformacji powierzchni. Deformacje te ujawniły się poza granicą złoża i poza strefą wpływu procesu zaciskania wyrobisk górniczych, co świadczyło o odmiennej przyczynie ich powstania. Dla pomiaru ich wielkości założono siatkę obserwacyjną „Mina”. Wysokości punktów tej siatki obserwowano wielokrotnie w latach 1992 - 2000 metodą niwelacji precyzyjnej (ogółem 37 serii pomiarowych w zróżnicowanych interwałach czasowych), a jej część centralną - kilkunastokrotnie metodą kątowno-liniową (precyzyjną) lub liniową. Średni błąd wyznaczenia wysokości punktów (po nawiązaniu do punktów GPS) wynosił ± 1 mm, średni błąd pomiaru odległości – poniżej 1 mm.

Powstała niecka obniżeniowa (rys. 4.1) objęła swym zasięgiem obszar około 7 ha. Kształt niecki jest nieregularny: jest ona wydłużona z północy na południe w kierunku miejsca wycieku w chodniku „Mina”. Maksymalne obniżenia całkowite występują na torach kolejowych w pobliżu ogrodu przyklasztornego i wynoszą 2344 mm. Bardzo znaczne osiadania całkowite ($0,5 \div 1,8$ m) występują również ogrodzie przyklasztornym (na południe od zabudowań klasztornych), na pobliskim odcinku torów kolejowych oraz na łące, położonej na południe od torów kolejowych. Obszar znacznych deformacji obejmuje wspomnianą łąkę aż do miejsca wystąpienia wycieku do chodnika „Mina” (blisko ul. Dembowskiego), łąkę na wschód od klasztoru oraz południowy skraj zabudowań klasztornych. Wpływy deformacji sięgają dalej na wschód i południe, łącząc się z wpływami zaciskania wyrobisk górniczych kopalni. Niewielkie osiadania, będące zapewne rezultatem częściowego odwodnienia warstw trzeciorzędowych oraz procesów osuwiskowych, występują na łące, położonej na zachód od klasztoru. Na terenie niecki wystąpiły znaczne deformacje powierzchni, charakteryzowane przez nachylenia, sięgające $36,2$ mm/m oraz krzywizny, wynoszące do $0,57$ km⁻¹ (promień krzywizny 1,75 km) w kierunku równoleżnikowym i $0,50$ km⁻¹ (promień krzywizny 2,01 km) w kierunku południkowym. Maksymalne ściskania osiągnęły $-25,6\%$, występując w wewnętrznej strefie brzeżnej niecki obniżeniowej. Odkształcenia rozciągające dochodzą do $+9,5\%$ i wiążą się z zewnętrzną strefą brzeżną niecki. Deformacje powierzchni terenu w rejonie wycieku wody do chodnika „Mina” są, więc równoznaczne z deformacjami dla V kategorii zagrożenia terenu.

Wyniki przeprowadzonej w czerwcu 2000 r. serii obserwacyjnej sieci „Mina” wskazują, że w okresie jednego roku od poprzedniego pomiaru ujawniające się deformacje są niewielkie, na ogół mniejsze niż w poprzednim rocznym okresie między seriami obserwacyjnymi. Obserwuje się nieznaczne osiadania ($7 \div 9$ mm rocznie) wzdłuż dotychczasowej linii przepływu wody do poprzeczni „Mina” (z niewielkim odchyleniem w kierunku zachodnim). Osiadania i wypiętrzanie, zanotowane w punktach położonych na północ od torów są w granicach błędów obserwacji, a cały rejon nie wykazuje żadnych praktycznie deformacji. Identyczny obraz wykazują rezultaty pomiaru odkształceń poziomych w liniach sieci „Mina”.

Dotychczasowe badania potwierdziły w całości hipotezę sufozji jako przyczyny deformacji w rejonie klasztoru (Maciaszek i in. 1994). Przesłanki, określane jako niezbędne dla określenia procesu mianem sufozji (sufozyjność gruntów, wysokie spadki hydrauliczne i ciśnienie wody, istnienie zagłębień bezodpływowych), zostały spełnione. Potwierdzeniem decydującego wpływu tego procesu na powstanie deformacji powierzchni terenu jest porównanie objętości niecki

obniżeniowej z objętością części stałych, stwierdzonych w wodzie wypływającej do poprzeczni „Mina”.



Rys. 4.1 Niecka sufozyjna w rejonie wycieku wody do chodnika „Mina”
Fig. 4.1 A suffosion trough in the area of water leakage into “Mina” gallery

Objętość niecki, stwierdzona na podstawie planimetrowania mapy obniżeń całkowitych (za lata 1992 - 2000), wynosi 32500 m^3 . Należy stwierdzić, że błąd określenia tej wielkości sięga około 10% ze względu na trudności przy wyznaczeniu przebiegu izolacji zerowych osiadań. W tym samym okresie ilość wyniesionego do poprzeczni materiału stałego wynosiła 60022 t , co po przeliczeniu na objętość (przy przyjęciu średniej gęstości materiału, wynoszącej $1,6 \text{ t/m}^3$) daje wielkość 37515 m^3 . Porównanie tych dwóch wielkości pozwala na określenie ich wzajem-

nego stosunku w postaci współczynnika (analogicznego do współczynnika eksploatacji) o wartości 0,87. Świadczy to, że niemal cały materiał, powodujący powstanie niecki obniżeniowej, został wyniesiony wraz z wodą do kopalni; ewentualne różnice mieszczą się w granicach błędu określenia obu objętości.

Na podstawie kształtu niecki obniżeniowej można określić dość wyraźnie drogę przepływu wody od północnego stoku doliny wielickiej (doliny Serafy) w stronę południowo-zachodnią (ze skręceniem na zachód) aż do ogrodu przyklasztornego, następnie skręcającą w kierunku południowym i po niewielkim odchyleniu w stronę wschodnią kierującą się do miejsca wycieku wody do chodnika „Mina”. Z kształtu niecki można również wnioskować o wielkości obszaru, z którego nastąpiło najbardziej intensywne wymywanie części stałych. Jest to rejon o kształcie, zbliżonym do prostokąta i rozmiarach około 60 x 110 m; jego miąższość przekracza 2 m. Głębokość tego obszaru, określona na podstawie analizy niecki i parametrów jej kształtowania się, wynosi około 50 m. W obszarze tym pojawia się okresowo podciśnienie, które staje się jednym z czynników, powodujących sufozję. Załamywanie się stropu nad pustkami, powstałymi z wymycia materiału skalnego doprowadziło do powstania niecki zapadliskowej, czemu towarzyszyły zmiany nachylenia zbocza.

Trzeba przy tym zaznaczyć, że istnieje bardzo dobra korelacja czasowa między intensywnością wycieku a wystąpieniem obniżeń powierzchni. Ostatnia aktywizacja wycieku miała miejsce w sierpniu 1994 r., towarzyszyło jej wyniesienie prawie 9 tysięcy ton materiału stałego. W tym samym okresie wystąpiły zwiększone deformacje powierzchni terenu: okresowe (w krótkim odstępie czasu) obniżenia dochodzące do 173 mm w centrum niecki sufozycznej oraz odkształcenia poziome, osiągające -10% wokół tego centrum. Od tego czasu następuje stopniowy zanik deformacji powierzchni, a obecnie - niemal całkowite jej uspokojenie się, o czym świadczą rezultaty ostatniej serii pomiarowej.

Należy podkreślić, że deformacje wynikające z sufozji mają, jak zaznaczono wyżej, gwałtowny charakter, charakteryzując się bardzo szybkim przebiegiem, dużą wielkością i ograniczonym zasięgiem, a więc zaliczyć je można do deformacji nieciągłych. Nieciągły charakter deformacji powierzchni dodatkowo uzasadnia stwierdzenie o płytkim zaleganiu ich przyczyny pod powierzchnią ziemi (około 50÷60 m). Stwierdzenie to nie zostało jednak zweryfikowane przez prowadzone tu wiercenia, które okazały się zbyt płytkie dla rozstrzygnięcia tego problemu.

Rezultaty badań aktualnego stanu powierzchni terenu i jego zmian w ciągu roku wskazują, że ruchy powierzchni w rejonie wycieku wyraźnie zanikają do minimalnych wielkości. Towarzyszy temu stabilna sytuacja hydrogeologiczna (wyciek wynosi niewielką tylko ilość części stałych - od kilku do stu kilkudziesięciu ton miesięcznie, przy kontrolowanej wielkości wypływu - poniżej 2 tysięcy m³ miesięcznie), co świadczy o opanowaniu przez służby kopalni niekontrolowanego wypływu wody do poprzeczni „Mina”. Natomiast nadal czynnikiem trudnym do interpretacji, a mającym niewątpliwą wpływ na możliwość przejawienia się deformacji, są zmiany stosunków wodnych w górotworze (odwodnienie warstw górotworu). Niewielkie zmiany wysokości reperów, zaobserwowane między poszczególnymi seriami pomiarowymi, mogą dowodzić zarówno występowania procesów osuwiskowych, jak i zmian ciśnienia w górotworze oraz obecności resztkowych procesów sufozyjnych. Wynika stąd wnioski o niezbędności dalszych badań stanu powierzchni, niezbędny zwłaszcza w przypadku uruchomienia ruchu kolejowego - zarówno ze względu na bezpieczeństwo tego ruchu, jak i w związku z możliwością jego wpływu na zmiany w podłożu i górotworze.

5. Obserwacje osuwisk

W celu określenia stopnia aktywności osuwisk na południowym zboczu doliny wielickiej wykonano w 1996-97 r. pomiar położenia punktów fragmentu sieci, założonej w 1985 r. dla obserwacji ruchów o charakterze osuwiskowym. Sieć ta była mierzona w latach 1985 - 1987 metodami tradycyjnymi, przy czym średni błąd położenia punktów wynosił od 15 mm do 21 mm. Pomiar obecny dowiązano do czterech punktów sieci, których współrzędne wyznaczono z obserwacji satelitarnych metodą różnicową w oparciu o punkty sieci опорowej Wieliczki, z użyciem odbiorników satelitarnych Ashtech MD XII. Zastosowano przy tym sesje, trwające $60 \div 90$ min., z czasem integracji sygnałów wynoszącym 15 sekund. Dokładność wyznaczenia współrzędnych tych punktów wynosiła dla współrzędnych płaskich poniżej ± 5 mm. Współrzędne pozostałych dziesięciu punktów wybranego fragmentu sieci określono na podstawie pomiaru ciągu poligonowego, wykonanego przy pomocy tachimetru TC 2002 firmy Leica. Wykonano również pomiar różnic wysokości między punktami metodą niwelacji precyzyjnej przy użyciu precyzyjnego niwelatora samopoziomującego KoNi 007.

Analiza rezultatów pomiarowych wykazała, że pomimo niesprzyjających warunków obserwacji (znaczna liczba przeszkód terenowych, stwarzająca konieczność stosowania wielu punktów pośrednich i niekorzystnych konfiguracji boków poligonowych, duże różnice wysokości między sąsiednimi punktami, utrudnienia obserwacji w związku z pokrywą roślinną) osiągnięto dokładność wyznaczenia położenia punktu sieci po wyrównaniu, wynoszącą średnio ± 12 mm, a więc $1,3 \div 1,8$ razy lepszą, niż w przypadku poprzednio stosowanego klasycznego sposobu pomiaru. Średni błąd wysokości punktu po wyrównaniu wynosił $\pm 0,5$ mm. Porównanie wyznaczonych współrzędnych płaskich i wysokościowych punktów ze współrzędnymi tych punktów, określonymi w 1985 r. i 1987 r. pozwoliło na obliczenie przemieszczeń poziomych oraz pionowych. Wielkość przemieszczeń jest zróżnicowana; na ogół nie przekracza 40 mm rocznie, ale w niektórych przypadkach może przekraczać 1 m. Należy przy tym zaznaczyć, że proces przemieszczeń osuwiskowych ma charakter nieregularny, związany z porą roku i warunkami wodnymi. Szczegółowe rezultaty badań opisano w pracy (Maciaszek i Baran 1997).

W roku 2000 wykonano pomiar przemieszczeń punktów osuwiska „Sułków”. Osuwisko jest odległe średnio o 400 m od krawędzi eksploatacji (najbliższych wyrobisk kopalnianych). Obserwacje geodezyjne oparto o sieć punktów GPS; pomiar położenia punktów przeprowadzono metodą „total station”, natomiast pomiar wysokości – metodą niwelacji precyzyjnej. Porównanie otrzymanych rezultatów z wynikami poprzedniej sesji pomiarowej (z 1986 r.) pozwoliło dokonać oceny charakteru ruchu osuwiskowego.

Na podstawie analizy tego ruchu, w powiązaniu z wynikami osiągniętymi przy pomocy innych metod badawczych (geologicznych, geofizycznych, hydrogeologicznych i geotechnicznych), stwierdzono wielorakość przyczyn powstawania osuwisk.

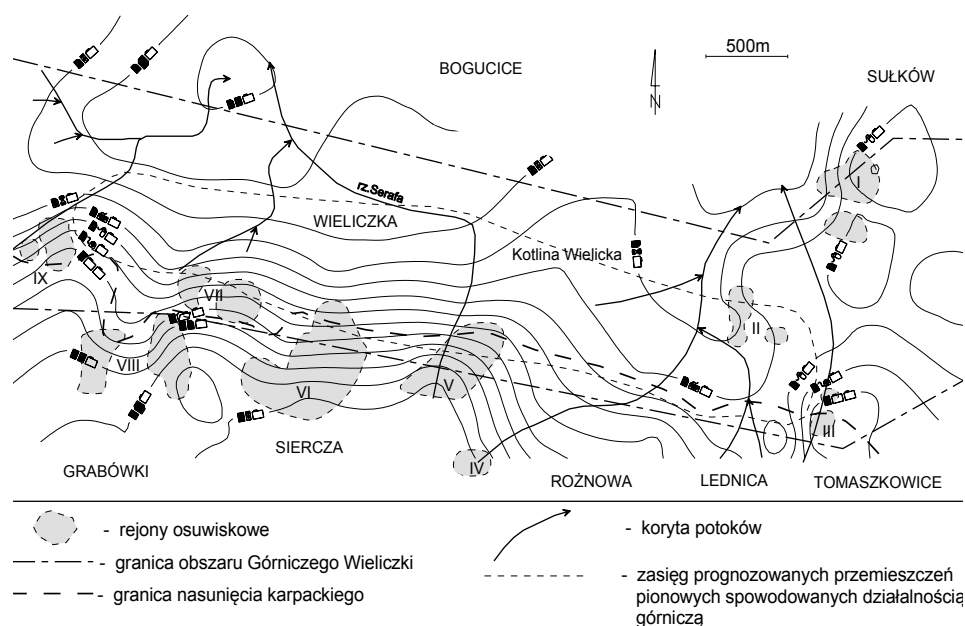
Wśród przyczyn powstawania osuwisk wyróżnić można:

- występowanie gruntów bardzo spoistych w górnych warstwach zbocza,
- wsięki wody o różnej intensywności, stanowiące często początek stałych lub okresowych potoków,
- wietrzenie minerałów i uwarstwienie skał,
- równoległość naturalnych warstw poślizgu do stoku zbocza,
- zmiany w obciążeniu stoku przez wykop lub nasyp,
- zmiany wskutek deformacji powierzchni terenu podczas eksploatacji górniczej,
- wstrząsy sejsmiczne i parasejsmiczne (w tym także wywołane ruchem samochodów i ciężkiego sprzętu),

- usunięcie w trakcie prac ziemnych głęboko zakorzenionej roślinności okrywającej zbocze i utrzymującej stok w równowadze.

Decydującą rolę w kształtowaniu ruchów osuwiskowych należy przypisać wodom, powodującym upłynnienie gruntów i w rezultacie spadek ich wytrzymałości, co wpływa na utracenie stateczności zboczy.

Na obszarze Wieliczki można wyróżnić dziewięć rejonów osuwiskowych (rys. 5.1); cztery z nich poddano badaniom geodezyjnym, pozwalającym na określenie wielkości przemieszczeń poziomych i pionowych punktów założonych sieci obserwacyjnych.



Rys. 5.1 Rejony osuwiskowe na terenie Wieliczki

Fig. 5.1 Landslide regions in the Wieliczka area

Występujące tu wody są w większości wodami płytkiego krążenia, silnie związanymi z opadami atmosferycznymi. W badanych rejonach występuje przewaga gruntów bardzo spolistych (o zawartości frakcji ilastej powyżej 12%). Grunty te charakteryzują się rezydualnym kątem tarcia wewnętrznego, mieszczącym się w granicach 8° - 12° . Wartości kątów nachylenia badanych zboczy pokrywają się najczęściej z wartościami rezydualnego kąta tarcia wewnętrznego, a więc zbocza są w stanie równowagi granicznej (lub bardzo bliskie jemu). Zatem wzrost kąta nachylenia zbocza o niewielki kąt (nawet o 1°) może doprowadzić do przekroczenia równowagi granicznej i uruchomienia osuwiska. W niektórych sytuacjach do takiego przekroczenia równowagi przyczynić się mogą obniżenia terenu wskutek zaciskania wyrobisk kopalnianych. Aczkolwiek przyrost nachylenia zbocza w najbardziej nawet niekorzystnym przypadku (okolice szybu „Kościuszko”) w okresie ostatnich 140 lat nie przekracza 11‰ (a więc poniżej 1°), to nawet niewielki wzrost sił naruszających stateczność zboczy może uruchomić osuwisko. Trzeba jednak zauważyć, że w warunkach zboczy wielickich nie brak innych procesów, które z podobnym lub większym prawdopodobieństwem są w stanie wywołać ruch

osuwiskowy (sufozja, abrazja, mikrodrżania sejsmiczne i parasejsmiczne). Zatem wpływ eksploatacji może być jedynie jednym z kilku źródeł tego typu deformacji.

Przeprowadzone badania nad charakterem ruchów osuwiskowych w rejonie szybu „Kościeszko” wykazały brak zależności między kierunkiem przemieszczeń punktów a usytuowaniem wyrobisk górniczych. Nie wyklucza to całkowicie wpływu eksploatacji na osuwisko; wpływ ten jednak może mieć tylko charakter pośredni, przyczyniając się ewentualnie do zmiany stateczności zbocza.

W rejonach osuwiskowych, szczególnie w przypadku nachylenia zboczy powyżej 10° , trzeba spodziewać się odnawiania osuwisk aż do momentu osiągnięcia równowagi stałej (przy kącie nachylenia zbocza 7° - 10°). W przypadku istotnego wpływu eksploatacji górniczej proces osuwiskowy będzie się odnawiał aż do ustania przemieszczeń pionowych.

6. Wnioski

1. Szczególne położenie geograficzne Wieliczki oraz wielowiekowa działalność człowieka w tym rejonie spowodowały wystąpienie zmian morfologii powierzchni. Wśród ich przyczyn można wyróżnić ruchy tektoniczne związane z orogenezą karpacką (o wielkości niewielkiej, trudnej jednak w tej chwili do zinterpretowania), ruchy technogenne, wywołane zaciskaniem wyrobisk kopalnianych, ruchy osuwiskowe i ruchy wskutek sufozji wodnej.
2. Obserwacje zmian morfologii powierzchni są prowadzone od 1926 r. Ich zakres jest stale poszerzany (szczególnie w ostatnich latach). Doskonalone są także metody obserwacji: w ostatnim okresie wprowadzono pomiary satelitarne oraz wysoko precyzyjne przyrządy elektroniczne, pozwalające na uzyskanie dokładnych danych o wielkościach deformacji powierzchni i górotworu.
3. W wyniku obserwacji stwierdza się, że wielowiekowa eksploatacja górnicza, pomimo jej zaprzestania w ostatnim okresie, nadal wywiera wpływ na deformowanie się powierzchni wskutek trwania procesu zaciskania się wyrobisk kopalnianych. Proces ten ma charakter liniowy, hamowany w ostatnim okresie przez trwające podsadzanie wyrobisk. W jego wyniku ukształtowały się na terenie miasta i jego okolic dwie niecki obniżeniowe. Pierwsza z nich obejmuje swym zasięgiem centralną część miasta Wieliczka. Powierzchnia niecki wynosi około $3,5 \text{ km}^2$. Jej centrum znajduje się w rejonie szybu „Kościeszko”, maksymalne obniżenie w okresie lat 1970-2000 wynosi 1085 mm. Druga niecka, o znacznie mniejszych rozmiarach ma swoje centrum w Lednicy Górnej, przy ul. Gdowskiej; centrum to wykazało w latach 1970-2000 obniżenie, wynoszące maksymalnie 339 mm.
4. W obrębie pierwszej niecki proces obniżeń ulega hamowaniu. Wskazują na to porównania szybkości obniżeń w trzech przekrojach czasowych: 1970-2000, 1984-2000 oraz 1996-2000. Dla rejonu szybu „Kościeszko” zmniejszenie jest największe: z $36,2 \text{ mm/rok}$ w pierwszym z wymienionych okresów do $25,0 \text{ mm/rok}$ w ostatnim. Stopień zmniejszenia intensywności obniżeń jest większy na peryferiach niecki, co dowodzi zmniejszania się zasięgu oddziaływania wyrobisk na powierzchnię terenu. W przypadku drugiej niecki proces ten nie jest już zauważalny.
5. Znaczne wielkości deformacji wystąpiły w obrębie niecki obniżeniowej w rejonie wycieku wody do poprzeczni „Mina”. Maksymalne obniżenia osiągnęły 2344 mm, nachylenia - $36,2 \text{ mm/m}$ oraz krzywizny, wynoszące do $0,57 \text{ km}^{-1}$ w kierunku równoleżnikowym i $0,50 \text{ km}^{-1}$ w kierunku południkowym. Maksymalne ściskania osiągnęły - $25,6\%$, a odkształcenia rozciągające + $9,5\%$.

6. Dotychczasowe badania potwierdziły w całości hipotezę sufozji jako przyczyny deformacji w rejonie klasztoru. Porównanie objętości powstałej niecki z objętością wyniesionego do poprzeczni materiału stałego pozwala na określenie współczynnika (analogicznego do współczynnika eksploatacji) o wartości 0,87. Świadczy to, że niemal cały materiał, powodujący powstanie niecki obniżeniowej, został wyniesiony wraz z wodą do kopalni. Na podstawie kształtu niecki obniżeniowej można określić drogę przepływu wody od północnego stoku doliny wielickiej do miejsca wycieku.
7. Z kształtu niecki sufozyjnej można również wnioskować o wielkości obszaru, z którego nastąpiło najbardziej intensywne wymywanie części stałych. Jest to rejon o kształcie, zbliżonym do prostokąta i rozmiarach około 60 x 110 m; jego miąższość przekracza 2 m. Głębokość tego obszaru, określona na podstawie analizy niecki i parametrów jej kształtowania się, wynosi około 50 m. W obszarze tym pojawia się okresowo podciśnienie, które staje się jednym z czynników, powodujących sufozję.
8. Rezultaty badań aktualnego stanu powierzchni terenu i jego zmian w ciągu roku wskazują, że ruchy powierzchni w rejonie wycieku wyraźnie zanikają do minimalnych wielkości. Towarzyszy temu ilościowe ustabilizowanie się dopływu wody do chodnika „Mina”, wysłodzenie tej wody oraz prawie całkowite pozbawienie jej części stałych.
9. Badania czterech (z dziewięciu) rejonów osuwiskowych w rejonie Wieliczki wskazują na różnorodność procesów, powodujących uruchomienie osuwisk. Wśród nich eksploatacja górnicza może być odpowiedzialna tylko pośrednio, obok kilku innych i zapewne decydujących przyczyn (abrazja, sufozja, zmiany wodne, mikrodrżania sejsmiczne i parasejsmiczne).

Literatura

- [1] Banasik P., Szewczyk J. 1997: Wykorzystanie sieci zintegrowanych do badań ruchów powierzchni terenu. Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej we Wrocławiu, Geodezja i Urządzenia Rolne, t. XIV, nr 324, Wrocław, s. 29-37.
- [2] Góral W., Maciaszek J., Szewczyk J. 1995: Zintegrowana sieć obserwacyjna dla wyznaczenia deformacji z wykorzystaniem pomiarów GPS na obszarze górniczym Wieliczki. Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej „III Dni Miernictwa Górniczego i Ochrony Terenów Górniczych”. Ustroń-Zawodzie, s. 139-150.
- [3] Góral W., Maciaszek J., Szewczyk J. 1996: Wyznaczanie przemieszczeń punktów za pomocą technologii GPS na terenie górniczym kopalni soli „Wieliczka”. Geodezja, rocznik AGH, Kraków, t. 2, s. 23-34.
- [4] Maciaszek J., Baran I. 1997: Badanie metodami geodezyjnymi wybranych rejonów osuwiskowych w Wieliczce. Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej „III Dni Miernictwa Górniczego i Ochrony Terenów Górniczych”. Ustroń-Zawodzie, s. 113-122.
- [5] Maciaszek J., Szczerbowski Z., Szewczyk J. 1994: Suffosion as the Cause of Terrain Surface Deformations (on the Example of the Wieliczka Salt Mine). Materiały IX Międzynarodowego Kongresu ISM, Praga, s. 299-306.
- [6] Maciaszek J., Szewczyk J. 1998: GPS-Based Spatial Survey Networks for Measurement of Movements of Land Surface. „Das Markscheidewesen”. Nr 1, Februar 1999, Essen, s. 245 - 249.
- [7] Maciaszek J., Szewczyk J. 2001: Use of Satellite GPS Technique in the Measurements of Deformations in the Areas of Mining Exploitation. 10th International Symposium on Deformation Measurements, Orange, California, s. 35-44.

Long-term changes in the relief of the Wieliczka region caused by the processes taking place in the rock mass

In the region of Wieliczka the influence of several natural and technogenic processes accumulates causing deformations in the surface of the area. The following processes occur: orogenic movements of the Carpathian Mts., natural land slips of the slopes of the hills surrounding the Serafa Valley, water suffosion and squeezing of old workings. The observations of these deformations have been made since 1926 with a constant improvement of their methods and increasing accuracy. This allows making more and more accurate analyses of mentioned above processes. The newest state of deformations of the relief with the predictions of their further development was presented.

Przekazano: 17 marca 2001