

## Określenie stanu podporowej tamy przeciwwodnej i jej ruchów na podstawie obserwacji geodezyjnych w komorze Layer w kopalni Wieliczka

### Determination of the condition of the support water dam and its movements on the basis of geodetic observations conducted in the Layer Chamber of the Wieliczka Salt Mine



Dr. inż. Agnieszka Maj\*)



Dr. hab. inż. Kajetan d'Obyrn\*\*) \*\*)

**Treść:** Współdziałanie obiektów trudno odkształcalnych z ośrodkiem o własnościach reologicznych jest ważnym problemem w górnictwie, a rozpoznać je można obserwując długotrwałe zachowanie obiektów i otaczającego je górotworu. Przykładem takiego zagadnienia jest współdziałanie tamy podporowej dla ujęcia wycieku w komorze Layer kopalni Wieliczka z górotworem. Zespół komór Layer usytuowany jest przy północnej granicy złoża na VII poziomie kopalni soli Wieliczka (rys. 1, 2). W grudniu 1972 r. ujawniono wyciek W VII-16 i ujęto go w chodniku tamy podporowej (rys. 4). Od chwili stwierdzenia wycieku rozpoczęto systematyczną jego obserwację hydrogeologiczną. Wpływ, początkowo do 20 m<sup>3</sup>/h, spadł do ok. 8,5 m<sup>3</sup>/h w 2014 r. Stężenie NaCl w wycieku, średnio wynosi ok. 62-63 g/dm<sup>3</sup> i utrzymuje się na stałym poziomie (rys. 3). W okresie między stwierdzeniem wypływu w komorze Layer a zbudowaniem w niej tamy przemieszczenia pionowe powierzchni terenu nad komorą przekraczały -23 mm/rok. Obecnie wynoszą maksymalnie -10 mm/rok (rys. 5). Obniżenia poziomu VII niedaleko chodnika dojściowego do komory Layer w latach 2001-2013 wyniosły 3,2 mm/rok (rys. 6). Na tamie podporowej założono sieć pomiarową (rys. 7). Wszystkie punkty obniżały się względem reperu nawiązania pomiarów niwelacyjnych ZN 7-11. Początkowo prędkość obniżania dochodziła do 30 mm/rok, a obecnie wynosi ok. 5 mm/rok w stropie komory i poniżej 1 mm/rok w spągu tamy (rys. 8, 9). Analiza przemieszczeń punktów wykazała, że pionowe deformacje tamy są generalnie ściskaniem, maksymalnie -1,13 ‰/rok (rys. 10-12). Dodatkowo obserwowane jest *wybrzuszenie się* tamy, maksymalnie 1,1 mm/rok (rys. 13-14). W stropie komory Layer zainstalowano cztery czujniki przemieszczeń (rys. 15), które wskazują na w przybliżeniu stałą prędkość obniżenia stropu, maksymalnie 6,0 mm/rok (rys. 16). Zjawisko współdziałania tamy z podłożem ma charakter zanikowy. Nadal jednak będzie postępować jej deformacja wywołana naciskiem skał. Przejawem tego procesu będzie też zwiększanie odkształceń poziomych, szczególnie w środku wysokości tamy. Przeprowadzone badania wykazały, że poprzez proste pomiary geodezyjne rozpoznać można ruch otoczenia tamy wodnej i jej deformacje określające stan tamy podporowej, a także wstępnie ocenić tendencje zmian tego stanu.

**Abstract:** Interaction between hard deformable objects and rheological properties is an important issue in the mining industry. It can be discovered by long-term observations of the behaviour of the objects and the surrounding rock mass. The interaction between the support water dam for catching the leakage in the Layer Chamber of the Wieliczka Salt Mine, and the rock mass can be an example. The complex of chambers Layer is located in the northern boundary of the deposit at level VII of the Wieliczka Salt Mine (fig. 1, 2). On December 1972, the leakage W VII-16 was discovered and caught in the drift of the water dam (fig. 4). After that, the leakage was subject to systematic hydrological observations. The outflow, originally up to 20 m<sup>3</sup>/h, fell to the level of ca. 8,5 m<sup>3</sup>/h in 2014 r. The concentration of NaCl in the leakage averages ca. 62-63 g/dm<sup>3</sup> and remains constant (fig. 3). Between the period of discovering the outflow from the Layer Chamber and placing there a support dam, the vertical displacements of the land surface above the chamber exceeded -23 mm/year. Currently, the amount to the maximum of -10 mm/year (fig. 5). Subsidence of level VII near the access gallery to the Layer Chamber in 2001-2013 came up to 3.2 mm/year (fig. 6). The support dam was equipped with a measurement grid (fig. 7). Each point was depressing against the benchmark levelling measurements ZN 7-11. Originally, the lowering speed reached 30 mm/year with a change to 5 mm/year in the chamber roof and below 1 mm/year in the dam floor (fig. 8, 9). The analysis of benchmark displacements show that vertical dam deformations are, in general, compressions up to the maximum of -1.13 ‰/year (fig. 10-12). Moreover, the dam

\*) Instytut Mechaniki Górotworu PAN w Krakowie \*\*) Kopalnia Soli „Wieliczka” S.A., Politechnika Krakowska w Krakowie

is bulging up to the maximum of 1.1 mm/year (fig. 13-14). In the roof of the Layer chamber four displacement sensors were placed (fig. 15.), which indicate approximately constant velocity of the roof subsidence at the maximum of 6.0 mm/year (fig. 16.). The phenomenon of the interaction between the dam and the ground is of atrophic character. However, the deformation of the dam caused by rock pressure will progress. The increase of horizontal strains, particularly in the dam's height center, will be the sign of the process as well. This study demonstrated that through simple land surveying, it is possible to identify the movements in the vicinity of the dam and its deformations which indicate the state of the support dam, as well as initially evaluate the trends of this state.

#### **Słowa kluczowe:**

*podporowa tama przeciwwodna, kopalnia soli, obserwacje geodezyjne, przemieszczenia reperów, deformacje tamy*

#### **Key words:**

*support water dam, salt mine, geodetic observations, benchmark displacement, dam deformations*

## **1. Wprowadzenie**

Ograniczenie zagrożenia wodnego polega na ujmowaniu wycieków, budowie wodoszczelnych tam odgradzających dopływające wody, powadzeniu iniekcji stabilizujących zeszcelinowane i rozługowane utwory wokół wycieku lub likwidacji wyrobisk w strefie niezabytkowej, a jeśli to możliwe zamykaniu wycieku. W górotworze solnym, z upływem czasu, tamy ulegają przemieszczeniom oraz deformacjom, które doprowadzić mogą do utraty szczelności tam wodnych [8]. W agresywnym dla betonu środowisku wodnym zachodzą procesy starzenia materiału. W warunkach otoczenia sztywnych obudów w górotworze o właściwościach reologicznych z upływem czasu w betonie powstają spękania i wzrasta ich odkształcalność [7]. Wykazać można, że ruchy górotworu w otoczeniu tam wodnych i deformacje ich konstrukcji mogą być obserwowane na drodze pomiarów geodezyjnych, a ich analiza służyć może ocenie stanu tam i prognozowaniu ich zachowania się. Celem tego artykułu jest przedstawienie wyników takich pomiarów na tle warunków geologiczno-górnictwowych oraz sposobu ich analizy, a także wynikającej z tego prognozy ruchów i deformacji tamy w następnych latach.

## **2. Warunki geologiczno-górnictwowe w otoczeniu komory Layer**

Złoże Wieliczka kontaktuje się na północy ze spękaną i zlustrowaną czapą gipsowo-iłową, w której dominują iłowce margliste z wtrąceniami gipsu i porożrywanymi blokami piaskowców warstw chodenickich. W warstwach tych występuje seria piaszczysta reprezentowana przez ility pylasto-piaszczyste, często z okruciami piaskowców oraz piaskowce – utwory o wysokim współczynniku filtracji. Na wychodniach tych warstw, blisko powierzchni, przeważają przepuszczalne dla wód utwory ilasto-piaszczyste, przez które horyzonty wodonośne zasilane są wodami opadowymi. Pod złożem solnym występują warstwy skawińskie wykształcone w przewodzie jako iłowce margliste, niekiedy z przerostami piaskowca. Tworzą one szczelny ekran, przez który do złoża solnego nie przenikają wody, a poziom wodonośny w ich obrębie nie stanowi istotnego zagrożenia wodnego dla kopalni. Budowę złoża charakteryzuje przekrój geologiczny w kierunku S-N na rysunku 1.

Na warunki hydrogeologiczne w strefie zachodniej złoża, obejmującej komorę Layer, wpływ mają utwory piaszczyste trzech poziomów warstw chodenickich (rys.1) ze strefami spękań i rozmytych szczelin. Ze względu na zagrożenie wodne tego rejonu kopalni największe znaczenie ma górny poziom, którego zwierciadło w otworach wiertniczych H.2 i H.8 występuje na głębokości ok. 20 m. W poziomie tym występują wody utworów chodenickich pochodzące z końcowych stadiów ostatniego zlodowacenia [15]. Zawodnione utwory piaszczyste warstw chodenickich występują również

w obrębie czapy (rys.1). Kontaktują się one z serią solną i północną granicą wyrobisk, głównie na poziomach IV-VII.

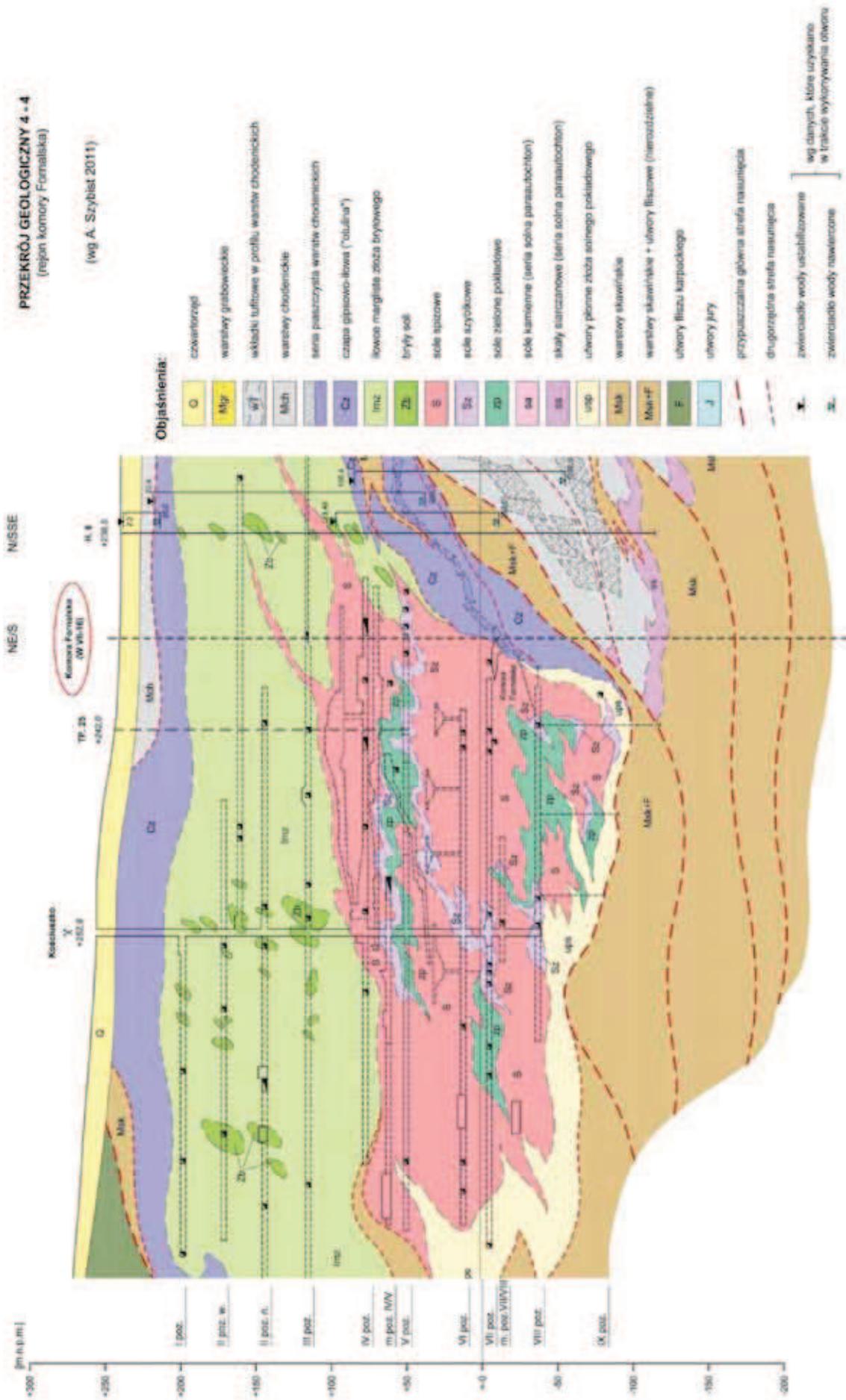
Zespół komór Layer usytuowany jest przy granicy złoża na VII poziomie kopalni soli Wieliczka w odległości około 200 m na północny wschód od szybu Kościuszkowski (rys. 2). Powstał on w wyniku eksploatacji złoża metodą strzałową w latach czterdziestych dwudziestego wieku. Ze względu na usytuowanie komór i prawdopodobnie korzystne warunki filtracyjne do komór Layer spływała solanka z wyżej położonych ługowni przy granicy złoża. Prawdopodobnie już w czasie eksploatacji wystąpiły problemy związane z dopływem wód z utworów warstw chodenickich [14]. Po zakończeniu wydobycia komory te przeznaczono na zbiorniki solanki, potem zbiorniki dosalające. Dla wyrównania poziomów solanki poszczególne komory podpoziomowo połączono chodnikiem. Z upływem czasu filary komór zostały rozługowane i powstał rozległy zbiornik o długości ok. 160 m i szerokości 30-50 m [14]. Spąg zbiornika wypełniały skały nierozpuszczalne, głównie ility. Warunki te maskowały początkowo pojawienie się kontaktu z wodami pozazłożowymi. Szybkie i nagłe podniesienie się poziomu wody w komorze Layer w grudniu 1972 r. ujawniło wyciek. Obecnie zespół komór Layer wypełniony jest podsadzką.

W bliskim sąsiedztwie komory Layer na poziomie VI, przy granicy złoża, usytuowany jest zespół komór eksploatacji suchej Windakiewicz, wypełniony podsadzką piaskową. Dalej na północ występuje strefa ługowniczej eksploatacji otworowej, w której to strefie zasięg rozługowań poszczególnych komór nie jest precyzyjnie określony. Z układu wyrobisk na poziomie VI wynika, że bezpośrednio nad północnym odcieniem komory Layer występuje zwięźnienie calizny półki między VI a VII poziomem, powodujący lokalny wzrost naprężeń. Strefa poziomu VIII w okolicach komory Layer nie była eksploatowana. Najniższy IX poziom jest obecnie niedostępny, a wyrobiska tego poziomu wypełniane są pełnonasyconą solanką. Zbiornik solanki powstał poprzez spływ wód o różnym nasyceniu, zwłaszcza w okresie katastrofalnych dopływów do poprzeczni Mina w 1992 roku. Strop nad tymi wyrobiskami ulega stopniowo obniżaniu. Wpływ tych obniżzeń zaznaczyć się może na VII poziomie w strefie między szybami Kinga i Kościuszkowski oraz w strefie komory Layer.

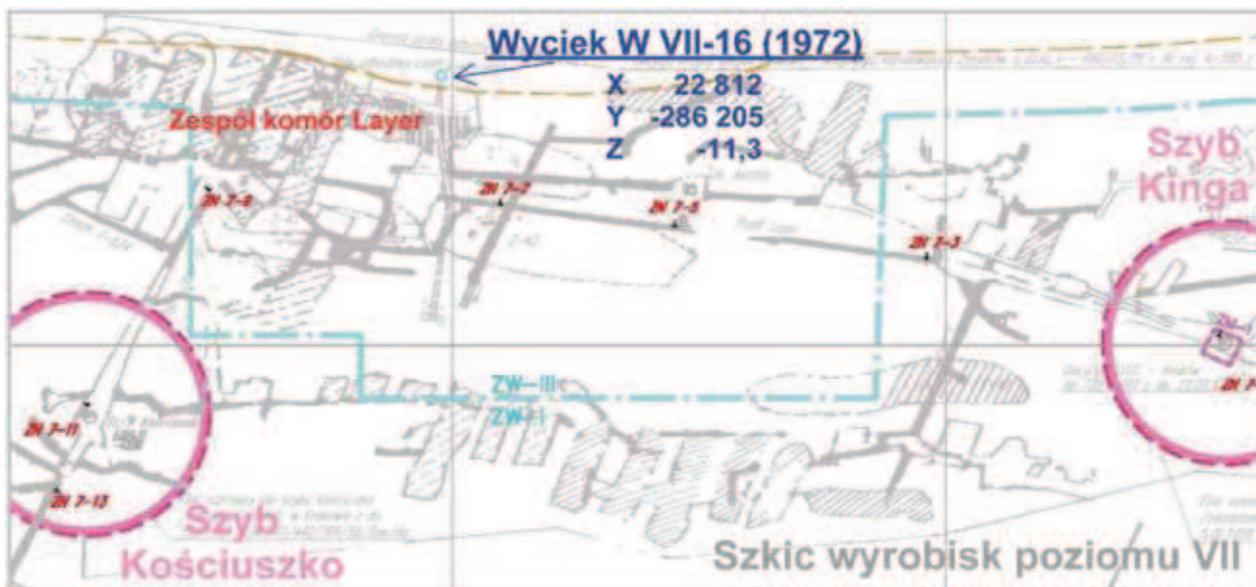
Obecnie zagrożenie wodne w kopalni soli Wieliczka związane jest przede wszystkim z budującymi północne przedpole złoża utworami warstw chodenickich. Dopływy z tych warstw stanowią ok. 85% wszystkich dopływów do wyrobisk kopalni, z czego ok. 60% dopływu przypada na wyciek WVII-16 w komorze Layer, dawnej komorze Fornalska 2 [1].

## **3. Charakterystyka wycieku W VII-16 i tamy przeciwwodnej**

Wyciek WVII-16, po początkowych próbach likwidacji przez iniekcje prowadzone z wewnątrz i zewnątrz złoża, zo-



Rys. 1. Przekrój geologiczny NW-SE w sąsiedztwie komory Layer 2 [3, 13]  
Fig. 1. Geological cross-section NW-SE in the vicinity of the Layer 2 Chamber [3, 13]



Rys. 2. Poziom VII, mapa sytuacji górniczej z lokalizacją wycieku i reperów

Fig. 2. Level VII. A mining situation map, with the leak and benchmark locations

stał ujęty chodnikiem w tamie podporowej w komorze Layer, a wyrobiska wokół wycieku zostały podsadzone. Zbudowana z betonowych segmentów tama miała za zadanie wzmocnienie osłabionego działaniem przepływających wód północnego ociosu komory oraz podparcie warstw stropowych i odciążenie ociosów [14]. Zachowanie się tamy było monitorowane od zakończenia jej budowy (wschodnia część w 1973, zachodnia w 1976). Już na początku lat 80. stwierdzono uszkodzenia tamy i kilka lat później przeprowadzono nieudane iniekcje doszczelniające. Wykonane na początku lat 90. analizy wyników pomiarów obniżen prowadziły do wniosku, że tama wciska się w strop komory i przechyla się ze wschodu na zachód. Pogląd ten został zweryfikowany dopiero w 2014 r. [10].

Wyciek WVII-16 w komorze Layer stanowi obecnie ok. 56% łącznego dopływu wód do wyrobisk kopalni Wieliczka [1]. Według badań przeprowadzonych w latach 2007-2010 dopływ do komory Layer jest wodą glacialną, pozbawioną

trytu [2]. Kompleksowy opis tego wycieku przeprowadzono w roku 2006 [4]. Od tego czasu jego parametry, tzn. wydatek i zawartości NaCl nie zmieniły się znacząco.

Od chwili stwierdzenia wycieku w komorze Layer rozpoczęto systematyczną jego obserwację hydrogeologiczną. Wypływ, początkowo do 20 m<sup>3</sup>/h, po 10 latach spadł do ok. 12 m<sup>3</sup>/h, a w ostatnim okresie wykazuje niewielkie zróżnicowanie, z tendencją spadku do ok. 8,5 m<sup>3</sup>/h w 2014 r. Stężenie NaCl w wycieku, w porównaniu z innymi wyciekami kopalnianymi, jest niewielkie, średnio wynosi ok. 62-63 g/dm<sup>3</sup> i utrzymuje się na stałym poziomie. Na rysunku 3 przedstawiono wydatek wycieku i jego stężenie (wartości średnie dla każdego roku) oraz krzywe aproksymujące te wielkości.

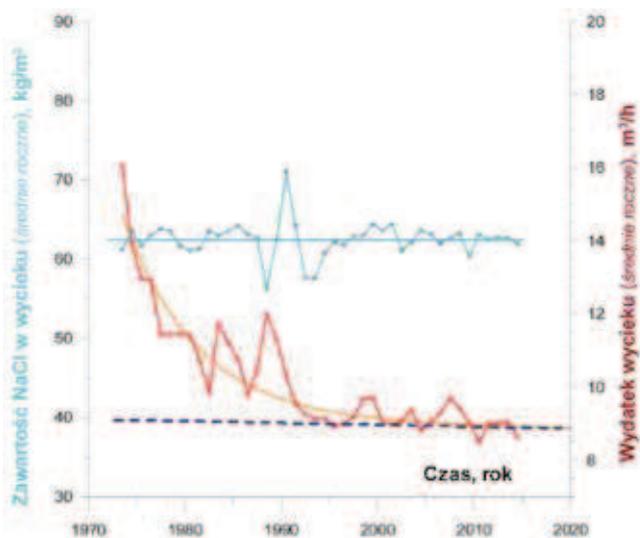
Zależność wydatku wycieku w m<sup>3</sup>/h od czasu  $Q(t)$  aproksymować można funkcją wykładniczą w postaci:

$$Q(t) = 9,1 - 0,005\tau + 6e^{-0,13\tau}; \tau = \frac{t - 1973}{t_j}; t_j = 1 \text{ rok}, \quad (1)$$

której asymptota jest liniową funkcją malejącą z prędkością -0,005 m<sup>3</sup>/h/rok. Stężenie NaCl w wycieku ulega fluktuacjom wokół stałej wartości średniej wieloletniej 62,43 kg/m<sup>3</sup>.

Po ujawnieniu groźnego wycieku, w toku prac ratunkowych wysunięto kilka koncepcji likwidacji zagrożenia, m.in. próby likwidacji wycieku przez iniekcje z wewnątrz i zewnątrz złoża i budowę tamy podporowej z trwałym ujęciem wycieku w chodniku tamy. Po nieskutecznych próbach iniekcji oraz stwierdzeniu dodatkowych wycieków w komorze Layer podjęto decyzję o budowie tamy wzdłuż północnego ociosu komory na znacznej jego części.

W projekcie budowy tamy podporowej z ujęciem wycieku w komorze Layer założono wykonanie bloku w kształcie prostopadłościanu przylegającego do północnego ociosu komory o wymiarach: długość 20,8 m, średnia szerokość 8,6 m, średnia wysokość 2,6 m. W środkowej części tamy zbudowano chodnik prowadzący do wycieku. W drugim półroczu 1974 r. podjęto próbę zamknięcia wycieku. Po nieudanej próbie zamknięcia zdecydowano się na trwałe ujęcie wycieku w chodniku. Następnie dobudowano wschodnią część tamy (tzw. nowy segment) o objętości 438 m<sup>3</sup>. Ostatecznie wybudowany blok tamy obejmował 11 segmentów i składał się z kilkudziesięciu elementów technologicznych o wymiarach: objętość ok. 1400 m<sup>3</sup>, długość 84,8 m, średnią wysokość 2,6



Rys. 3. Roczne zmiany wydatku wycieku i stężenia NaCl w wycieku (opracowanie własne)

Fig. 3. Annual volume change of the water from the leak and NaCl concentration in the leak (own study)

m oraz szerokość od 5,0 m do 9,5 m. Całość prac zakończono w marcu 1977 r. Położenie tamy względem komór Layer-2 i Layer-3 przedstawiono na rysunku 4.

W pierwszej fazie budowy stosowano zaprawę betonową w składzie: cement 350 – 436 kg, woda z wycieku – 233 kg, kruszywo do 40 mm – 1655 kg. Wytrzymałość betonu wykazała jednak znaczny rozrzut, od 7,3 do 33,1 MPa [14]. Budując część zachodnią używano dodatkowo szkła wodnego i chlorku baru. Beton był zagęszczany przez ubijanie, a w płaszczyznach kontaktowych zakładano rurki cementacyjne.

W wykonanych w roku 1984 r. badaniach stwierdzono, że współczynnik zmienności wytrzymałości betonu przekracza 20%, co klasyfikuje beton jako niedostateczny dla funkcjonalności tamy [14]. Uszkodzenia, korozja i degradacja betonu postępowała nadal po 1984 roku. Dla ochrony ujęcia założono obudowę tubingową chodnika w tamie podporowej, która lokalnie wzmocniła konstrukcję tamy.

#### 4. Ruch górotworu w rejonie komory Layer

Komora Layer położona jest w centralnej części kopalni, na NE od szybu Kościuszko. W tym obszarze kopalni złoża soli urabiane było materiałem wybuchowym, długimi prostopadłościennymi komorami, między którymi pozostawiano filary podporowe. W drugiej połowie XX wieku w części centralnej złoża sól wybierana była metodą ługowania, w kawernach o długościach kilkudziesięciu metrów i kilkukrotnie mniejszym wymiarze poprzecznym. Konsekwencją urabiania wodą było zwiększenie wykorzystania złoża i oczekiwany wzrost tempa wydobywania, ale także niekontrolowane, niezamierzone rozługowania i przecieki solanki, a potem wielkoobszarowa degradacja calizn, szczególnie w strefie V poziomu kopalni i międzypoziomu Kołobrzeg. Symptomaticznie oddziaływanie wyrobisk są obniżenia powierzchni terenu. Wykształcające się w XVIII i XIX w rejonie szybu Regis centrum obniżeń powierzchni terenu przesuwało się w kierunku zachodnim i w wieku XX usytuowało się w strefie szybu Kościuszko [6]. Obniżenia reperów powierzchniowych w rejonie komory Layer pokazano na rysunku 5.

Można zauważyć, że po 1945 r. wraz ze wzrostem wydobywania soli, zwiększyła się prędkość obniżania terenu, osiągając maksimum w latach 1965 – 1980 (rys. 5), a od lat osiemdziesiątych ub. wieku średnia prędkość obniżeń maleje. W okresie między stwierdzeniem wypływu w komorze Layer a zbudowaniem w niej tamy prędkość przemieszczenia pionowego powierzchni terenu wynosiła od -42,2 mm/rok (Rp. 5) do -14,5 mm/rok (Rp. 7). Nad komorą prędkość przemieszczenia przekraczała -23 mm/rok.

Ze względu na znaczne przemieszczenia terenu w wynikach pomiarów nie można zaobserwować zmian ruchu górotworu wywołanych najpierw skutkami przepływu wód, a później efektem podporowych właściwości zbudowanej tamy, jak to miało miejsce w przypadku wycieku w poprzeczni Mina [5, 9, 11]. Na brak widocznych efektów na powierzchni terenu wpływ miała także znikoma ilość wynoszonych w wycieku nierozpuszczalnych minerałów, świadcząca o nieznacznych wymyściach w masywie skalnym.

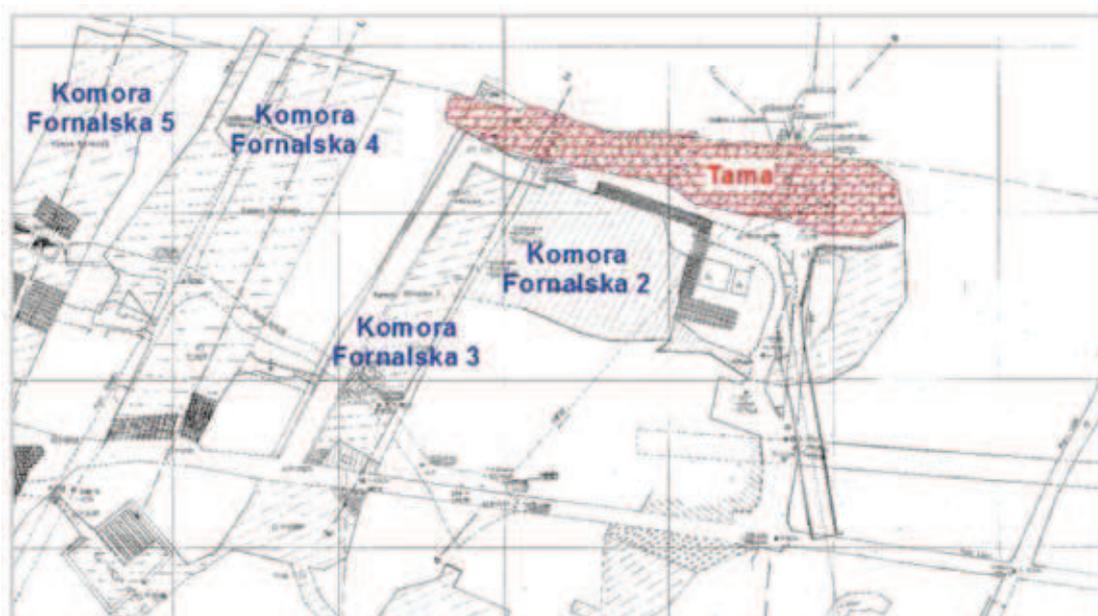
Obecnie maksymalne przyrosty przemieszczenia pionowego obserwowane w rejonie szybu Kościuszko wynoszą -20 mm/rok, a nad tamą ok. -10 mm/rok.

Analiza wyników pomiarów dołowych również nie wykazała oddziaływania przepływu wód i stabilizującej górotwór tamy. Obecnie obserwowane jest zróżnicowanie wartości obniżeń podłużni Layer między szymbami Kinga i Kościuszko. W latach 2001-2013 (12 lat) obniżenia mieściły się w granicach od 7,7 mm/rok na skrzyżowaniu podłużni Layer z poprzeczną Layer IV do 1,7 mm/rok przy szybie Kinga (rys. 6). Niedaleko chodnika dojściowego do komory Layer obniżenia wyniosły 3,2 mm/rok. Podobne zróżnicowanie wartości przemieszczeń pionowych zauważyć można analizując wyniki pomiarów niwelacyjnych we wcześniejszych latach.

#### 5. Lokalne obserwacje tamy podporowej

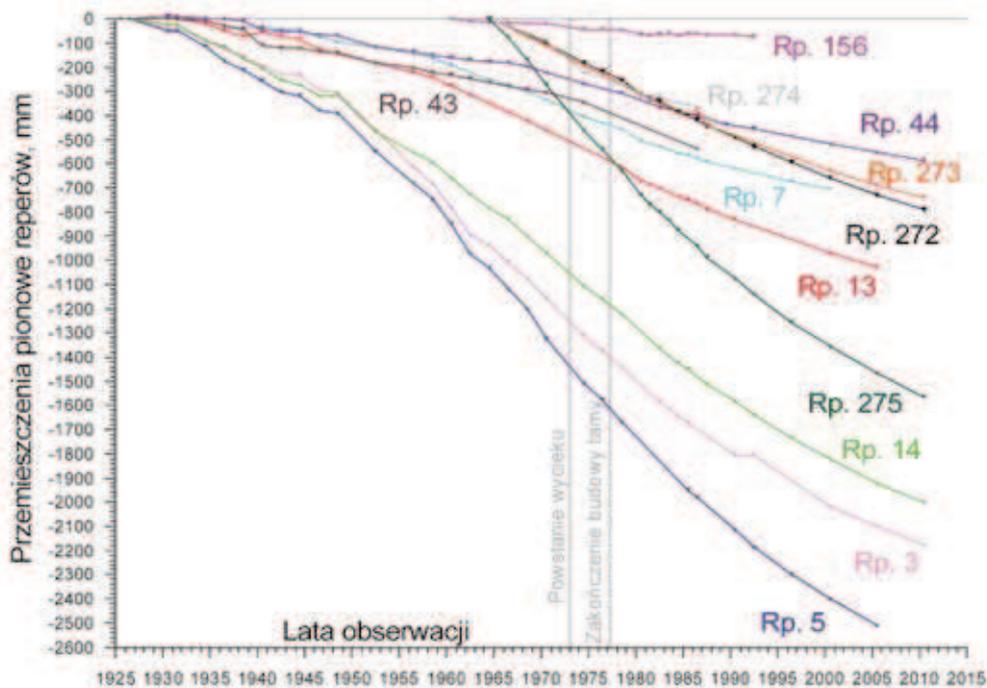
##### 5.1. Sieć obserwacyjna przemieszczeń na ścianie tamy

Zachowanie się tamy i stropu komory przy tamie było obserwowane niemal od początku jej konstruowania. Autorem koncepcji obserwacji był ówczesny mierniczy Kopalni

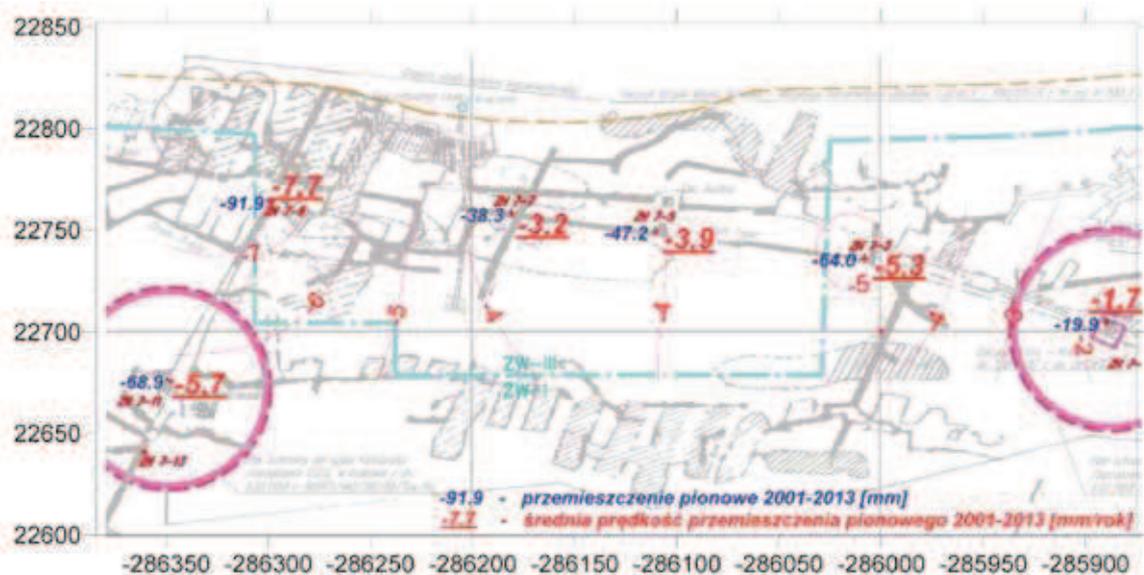


Rys. 4. Lokalizacja tamy na tle zespołu komór Layer (Fornalska)

Fig. 4. Dam location on the background of the Layer (Fornalska) Chamber Complex



Rys. 5. Przemieszczenia pionowe reperów powierzchniowych w funkcji czasu (opracowanie własne)  
 Fig. 5. Vertical displacements of surface benchmarks in relation to time (own study)

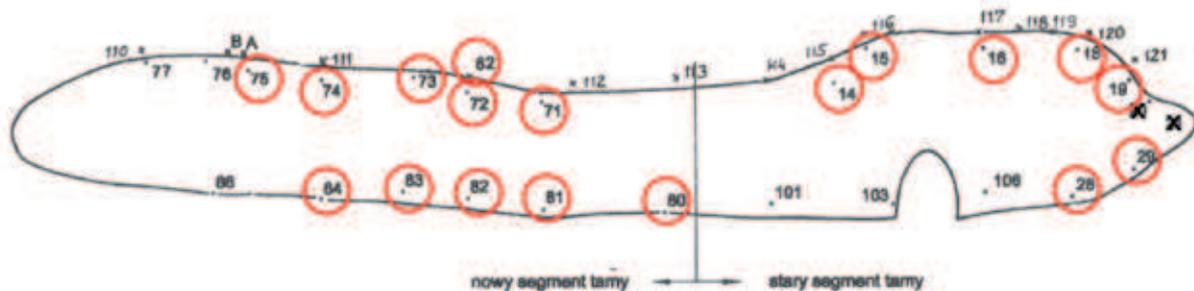


Rys. 6. Przemieszczenia pionowe punktów na poziomie VII w okresie 2001-2013 (opracowanie własne)  
 Fig. 6. Vertical displacements of benchmarks of Level VII in 2001-2013 (own study)

Wieliczka J. Wójcik. Budowę wschodniej części tamy zakończono w grudniu 1973 r, a części zachodniej w marcu 1977 r. Sieć reperów, złożoną z jednej linii w stropie komory przy tamie i dwóch linii przystropowej i przyspągowej na tamie, założono w 1974 r. (część wschodnia) i rozbudowano w trakcie budowy kolejnych segmentów tamy. Pierwotna sieć (w części wschodniej) składała się z 9 reperów stropowych (1-9), 12 przystropowych (10-21) i 9 przyspągowych (22-30). Numerację powadżono z zachodu na wschód. Pierwszy pomiar przeprowadzono 10.06.1974 r. Drugi pomiar wykonano po miesiącu, trzeci po kolejnych 3 miesiącach, a kolejne w okresach ok. półrocznych. W 7. serii pomiarowej (28.06.76 r.) do obserwacji włączono repery zastabilizowane w za-

chodniej części tamy. W tej części punkty założono również w trzech liniach: stropowej (60-66), przystropowej (70-75) i przyspągowej (70-85).

Punktem dowiązania sieci punktów obserwacyjnych był reper ZN 7-11 zlokalizowany przy szybie Kościuszko [12]. Jego wysokość przyjęto jako stałą w całym okresie obserwacji ( $Z = -9,4620$  m) i na tej podstawie wyznaczano wysokości wszystkich punktów w komorze Layer od pierwszego pomiaru w 1974 r. do 2013 r. Takie podejście eliminowało znaczące błędy pomiarowe, szczególnie błędy „przeniesienia wysokości” na VII poziomie kopalni. Przy interpretacji obserwacji długotrwałych, kilkudziesięcioletnich procesów błędy te nie są tak istotne jak w krótkotrwałych procesach. Nie można wtedy



Rys. 7. Szkic lokalizacyjny obserwowanych obecnie reperów; na czerwono zaznaczono repery mierzone od 1974 r. (część wschodnia) i od 1976 r. (część zachodnia)

Fig. 7. Sketch of the distribution of the currently observed benchmarks; red colour marks the benchmarks being measured since 1974 (Part E) and since 1976 (Part W)

pominąć faktycznego ruchu reperu nawiązania pomiarów niwelacyjnych ZN 7-11.

Z upływem czasu założona pierwotnie sieć punktów pomiarowych ulegała degradacji. Jej główną przyczyną jest reakcja stopowych i spągowych części tamy na ruch stropu i spągu komory, która powoduje „obłewanie” reperów skałami stropowymi i spągowymi, przez co punkty stają się niedostępne do pomiaru. Ze względu na znaczną degradację pierwotnej sieci uzupełniono ją o nową linię stropową (repery 110 – 121, A i B) oraz nową linię przyspągową w części wschodniej (repery 101 – 108). Z pierwotnie zastabilizowanych reperów w pomiarze w 2013 r. uczestniczyło 5 reperów przystropowych i 2 przyspągowe w części wschodniej tamy oraz 5 reperów przystropowych i 5 przyspągowych w części zachodniej. Zachował się tylko jeden reper stropowy (62). Obecnie obserwowaną sieć punktów, z zaznaczeniem najstarszych reperów, pokazano na rysunku 7.

## 5.2. Przemieszczenia pionowe punktów obserwacyjnych

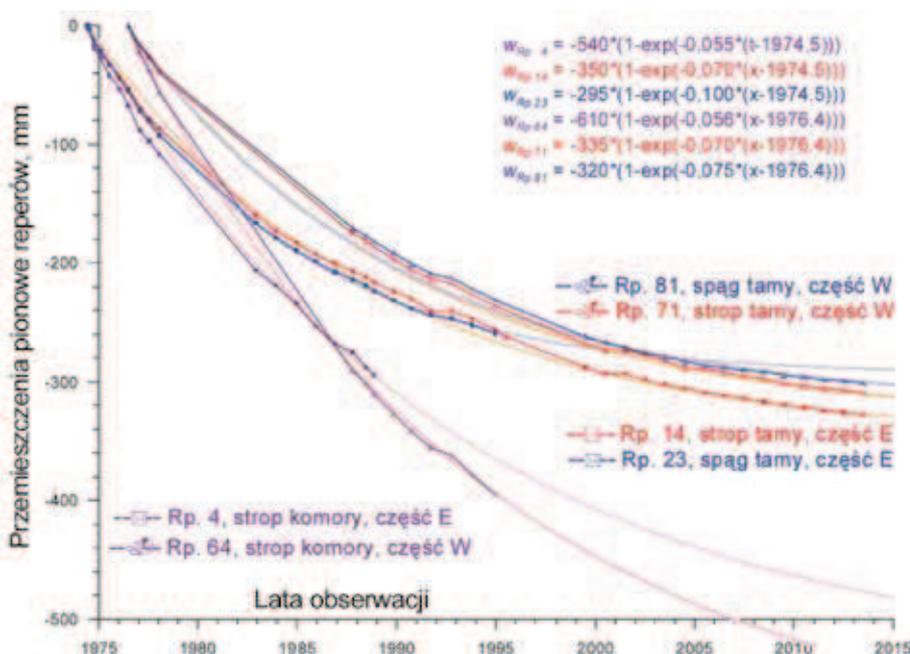
Wszystkie zastabilizowane w komorze Layer repery obniżyły się względem reperu ZN 7-11. Początkowo prędkość obniżeń dochodziła do 30 mm/rok. Obecnie prędkość ta jest

wielokrotnie mniejsza, ok. 5 mm/rok w stropie komory i poniżej 1 mm/rok w spągu tamy. Na rysunku 8 przedstawiono maksymalne przemieszczenia punktów obserwacyjnych w poszczególnych strefach tamy.

Przemieszczenia pionowe punktów w funkcji czasu aproksymowano pewnym typem krzywych wykładniczych, wyrażonym ogólnym wzorem

$$w(t) = -c_1 \left[ 1 - \exp \left( -c_2 \frac{t - t_0}{t_j} \right) \right], \quad (2)$$

gdzie  $t$  jest czasem obserwacji,  $t_j = 1$  rok,  $t_0$  – czasem początkowej obserwacji, a  $c_1$  i  $c_2$  pewnymi stałymi, przy czym  $c_1 > 0$  a  $0 < c_2 < 1$ . Ten typ funkcji wykładniczej opisuje zjawiska charakteryzujące się zmniejszaniem przyrostów zmiennej  $w$  w trakcie zbliżania się do pewnej granicznej wartości asymptotycznej. Parametr  $-c_1$  określa asymptotę, do której dąży funkcja aproksymacyjna, a tym samym maksymalne obniżenie danego punktu po nieskończenie długim czasie. Parametry te mają wartości szacunkowe i powinny być powiązane z geomechanicznymi badaniami modelowymi zjawisk zachodzących w rejonie komory Layer.



Rys. 8. Przemieszczenia pionowe reperów w poszczególnych strefach tamy (opracowanie własne)

Fig. 8. Vertical displacements of benchmarks in particular dam sections (own study)

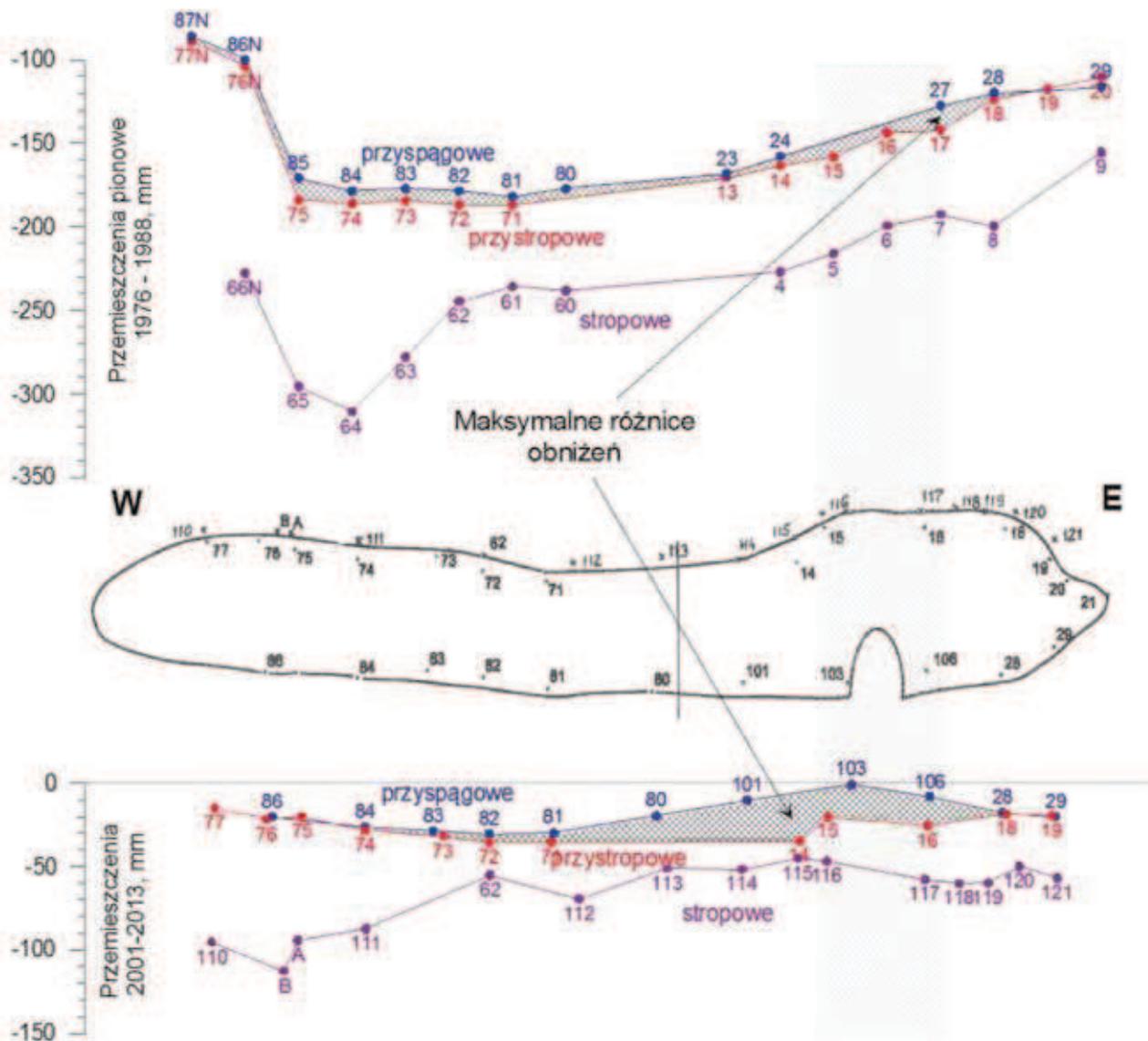
Takie ujęcie wyników obserwacji pozwala na ekstrapolację wstecz i wprzód, dzięki czemu z lepszym przybliżeniem można prognozować przejawy badanego procesu w przyszłości, przy założeniu, że warunki go kształtujące nie ulegną zmianie. Należy przypomnieć, że na wykresach podane są względne wartości przemieszczeń, a rzeczywisty ich ruch jest większy. Uwzględnienie ruchu punktu ZN 7-11 powodowałoby korektę tych funkcji z  $w(t)$  do  $f(t)$  według zasady

$$f(t) = C \left( \frac{t - t_0}{t_j} \right) + w(t), t_j = 1 \text{ rok}, \quad (3)$$

gdzie  $C$  jest prędkością pionowego przemieszczenia punktu ZN 7-11 (średnio około -4,2 mm/rok), a  $t_0$  jest czasem początkowym. Korekta ta dla okresu ponad 40 lat osiąga wartość ok. -168 mm.

W celu porównania procesu osiadania reperów po zbudowaniu tamy i w obecnej jego fazie, na rysunku 9 zestawiono profile obniżenia linii stropowej, przystropowej i przyspągowej w dwóch dwunastoletnich okresach pomiarowych: 1976-1988 i 2001-2013.

- Analizując profile można zauważyć, że:
- przyrosty obniżenia w okresie końcowym są znacząco mniejsze niż w okresie początkowym;
  - w obu okresach najbardziej obniżają się punkty stropowe w komorze, mniej – przystropowe w tamie, a najmniej punkty przyspągowe – jest to proces wskazujący na występowanie pionowych deformacji ściskających;
  - w okresie początkowym zaznacza się wyraźne zwiększanie obniżania punktów ze wschodu na zachód, za wyjątkiem skrajnych punktów na zachodzie;
  - w okresie końcowym profile mają nieco inny charakter, punkty przyspągowe i przystropowe w tamie najbardziej obniżają się w części środkowo-zachodniej, mniej na brzegach tamy – tworzy się nieka obniżenia, z tym, że w części środkowo-wschodniej punkty przyspągowe obniżają się najmniej – co może być spowodowane ich lokalizacją w pobliżu chodnika w obudowie tubingowej, wzmacniającego lokalnie korpus tamy;
  - punkty w stropie komory przy tamie w ostatnich latach zachowują się inaczej niż punkty na tamie, we wschodniej i centralnej części obniżenia są mniej więcej jednakowe, a w zachodniej zdecydowanie większe;



Rys. 9. Profile obniżenia reperów w okresach 1976-1988 i 2001-2013 (opracowanie własne)  
 Fig. 9. Benchmark subsidence profiles in 1976-1988 and 2001-2013 (own study)

- różnice w obniżeniach punktów przystopowych i przyspągowych w tamie wskazują na pionowe ściskanie tamy, większe w końcowym okresie;
- pionowe ściskania w początkowym okresie są prawie równomierne w całej tamie, a w końcowym okresie zdecydowanie większe w części wschodniej;
- różnice w obniżeniach punktów stropowych w komorze i przystopowych w tamie wskazują na bardzo duże deformacje ściskające na kontakcie tamy ze stropem komory, zwłaszcza w części zachodniej, powoduje to trudności z długotrwałym utrzymaniem linii pomiarowej.

W profilach obniżen charakterystyczne są większe obniżenia w zachodniej części tamy. Może to mieć związek z rozległymi rozługowaniami i połączeniem wyrobisk w czasie, gdy zespół komór Layer stanowił zbiornik dosalający solanek. W takim przypadku maksymalny ruch stropu połączonych komór miałyby miejsce na zachód od tamy, powodując większy nacisk na zachodnią część tamy.

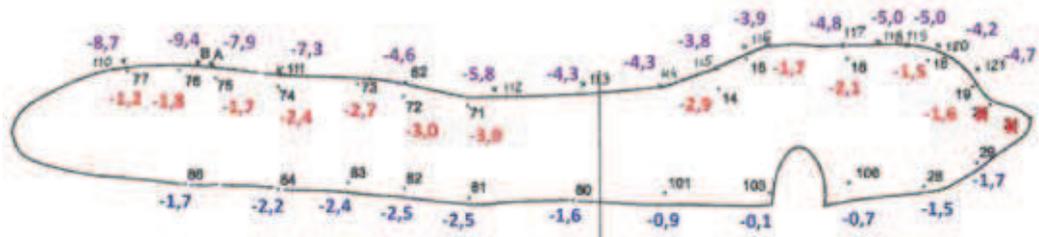
W ostatnich latach, ruch punktów pomiarowych wyhamował i obecnie nie przekracza  $-3$  mm/rok, jedynie strop komory przy tamie przemieszcza się z dużą prędkością, dochodzącą do  $-10$  mm/rok. Na rysunku 10 przedstawiono średnie prędkości przemieszczenia poszczególnych punktów w okresie 2001-2013.

Powyższe dane stanowiły podstawę do określenia deformacji pionowych tamy podporowej w komorze Layer.

### 5.3. Deformacje pionowe i poziome tamy

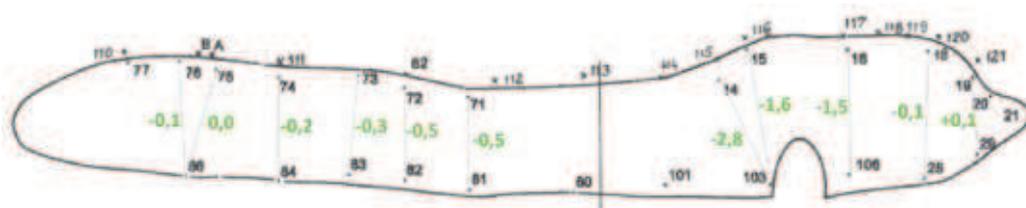
Na podstawie danych z okresu 2001-2013 obliczono różnice prędkości przemieszczeń punktów w stropie i spągu tamy (rys. 11) oraz średnie prędkości deformacji pionowych (rys. 12).

Z obliczeń różnic przemieszczeń wynika, że deformacje pionowe tamy są generalnie ściskaniem. Obserwowane jest lokalne rozciąganie przy wschodnim brzegu tamy o wartości  $+0,01$  mm/rok. Ściskania o mniejszych wartościach rejestrowane są w części zachodniej tamy. Większe ściskania we wschodniej części spowodowane są zatrzymaniem ruchu spągu tamy w rejonie chodnika w obudowie tubingowej. Różnice w przemieszczeniach pomiędzy stropem a spągiem tamy dochodzą do  $-2,8$  mm/rok w części wschodniej, a w części zachodniej wartość ta jest ponad pięciokrotnie mniejsza. Należy jednak zwrócić uwagę na różnice w wysokości tamy, większa jest na wschodzie a mniejsza na zachodzie. Dlatego też obliczono i przedstawiono na rysunku 12 względne wartości deformacji, uwzględniające różnice w odległościach między punktami stropowymi a spągowymi w tamie.



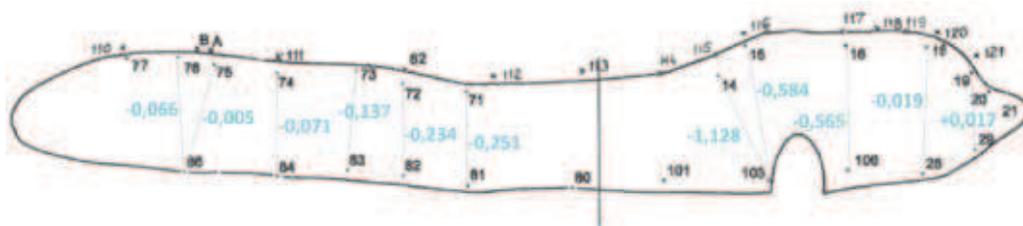
Rys. 10. Średnia prędkość przemieszczeń pionowych punktów tamy w okresie 2001-2013, mm/rok (opracowanie własne)

Fig. 10. Average rate of vertical displacements of dam points in 2001-2013 [mm/year] (own study)



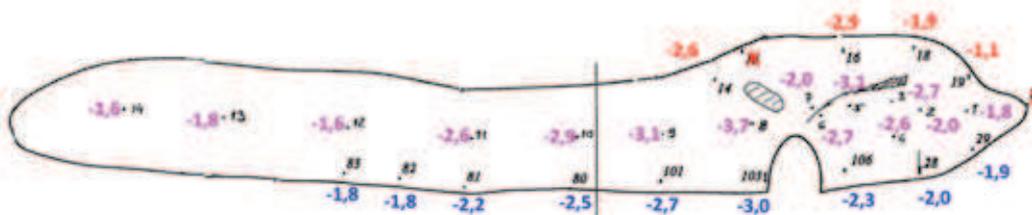
Rys. 11. Średnia prędkość przemieszczeń pionowych (przemieszczenia wzajemne punktów) w okresie 2001-2013, mm/rok (opracowanie własne)

Fig. 11. Average rate of vertical displacements (mutual displacements of points) in 2001-2013, mm/year (own study)



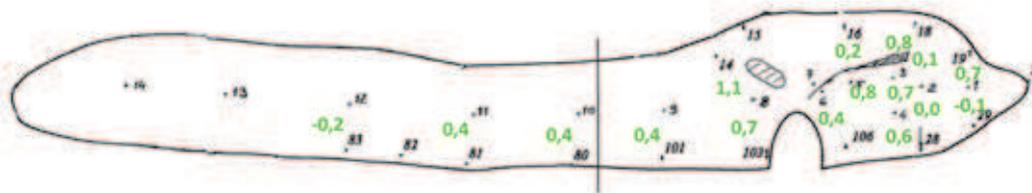
Rys. 12. Średnie deformacje pionowe na ścianie czołowej tamy w okresie 2001-2013, %/rok (opracowanie własne)

Fig. 12. Average vertical deformations on the front wall of the dam in 2001-2013 [%/year] (own study)



Rys. 13. Średnia prędkość przemieszczeń poziomych punktów ściany czołowej tamy w okresie 2002-2010, mm/rok (opracowanie własne)

Fig. 13. Average rate of horizontal displacements of the dam's front wall points in 2002-2010 [mm/year] (own study)



Rys. 14. Średnia prędkość przemieszczenia poziomego (przemieszczenia wzajemne punktów) w okresie 2002-2010, mm/rok (opracowanie własne)

Fig. 14. Average rate of horizontal displacement (mutual displacements of points) in 2002-2010 [mm/year] (own study)

Generalnie prędkość deformacji pionowych największa jest w środkowo-wschodniej części tamy i dochodzi tam do wartości  $-1,13\%/rok$ , a ponad czterokrotnie mniejsza jest w środkowo-zachodniej części:  $-0,25\%/rok$ . Najmniejsze deformacje, rzędu  $-0,02 \div -0,06\%/rok$ , obserwowane są przy brzegach tamy.

W 2002 roku założono linię pomiarową przechodzącą pomiędzy linią przyspągową a przystropową i zaczęto obserwować poziomy ruch tamy, w kierunku prostopadłym do jej czoła (wysunięcie tamy, wybrzuszanie). Na rysunku 13 przedstawiono średnie prędkości przemieszczeń poziomych obserwowanych punktów.

Jak należało się spodziewać, największy ruch obserwowany jest na linii środkowej, a mniejszy na liniach przystropowej i przyspągowej. Ponadto:

- przemieszczenia poziome na brzegach tamy są mniejsze niż w środku (linia środkowa, spągowa, stropowa);
- wysunięcia wschodniej części tamy są większe niż zachodniej, na co może mieć wpływ większa wysokość tamy na wschodzie i obecność pustki przed tą częścią tamy (uginanie stropu nad pustką);
- we wschodniej części widoczne są szczeliny poziome związane z wybrzuszaniem tamy, czyli rozciąganiem jej powierzchni.

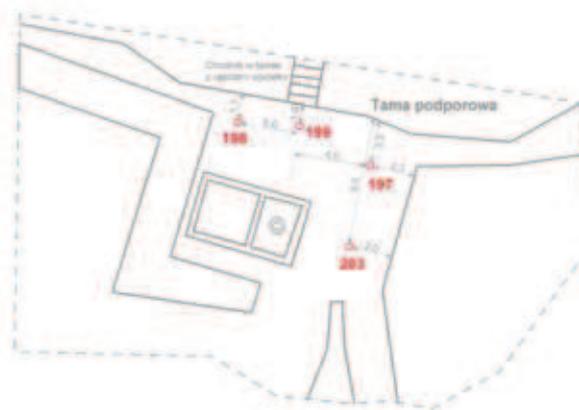
Różnice pomiędzy prędkościami przemieszczeń poziomych w środku tamy a jej spągami i stropem przedstawiono na rysunku 14.

#### 5.4. Czujniki przemieszczeń w stropie komory Layer

Poza opomiarowaniem tamy podporowej w komorze Layer zainstalowano cztery czujniki, które od 1998 r. określają różnice przemieszczeń punktu na stropie komory względem punktu bazowego zastabilizowanego na końcu otworu o długości 10 m. Jeżeli punkt bazowy jest nieruchomy rejestrują one obniżenia stropu komory. Lokalizację znaków pomiarowych w komorze Layer przedstawiono na rysunku 15.

Pomiary wykonywane od 1998 r. pokazują w przybliżeniu stałą prędkość obniżenia stropu, tym większą im bliżej tamy zainstalowany był czujnik (rys. 16). Największą prędkość

zarejestrował czujnik dR198 (w odległości ok. 1,7 m od ściany tamy) – osiągnęła ona wartość  $6,0\text{ mm/rok}$ , mniejszą prędkość wykazał czujnik dR197 (ok. 2,2 m od tamy) –  $2,9\text{ mm/rok}$ . Najdalej od tamy obserwowany punkt dR203 (ok. 9,5 m) obniżał się do 2011 r. z prędkością  $1,15\text{ mm/rok}$ , a w następnych latach rejestrowane przemieszczenia były nieregularne.

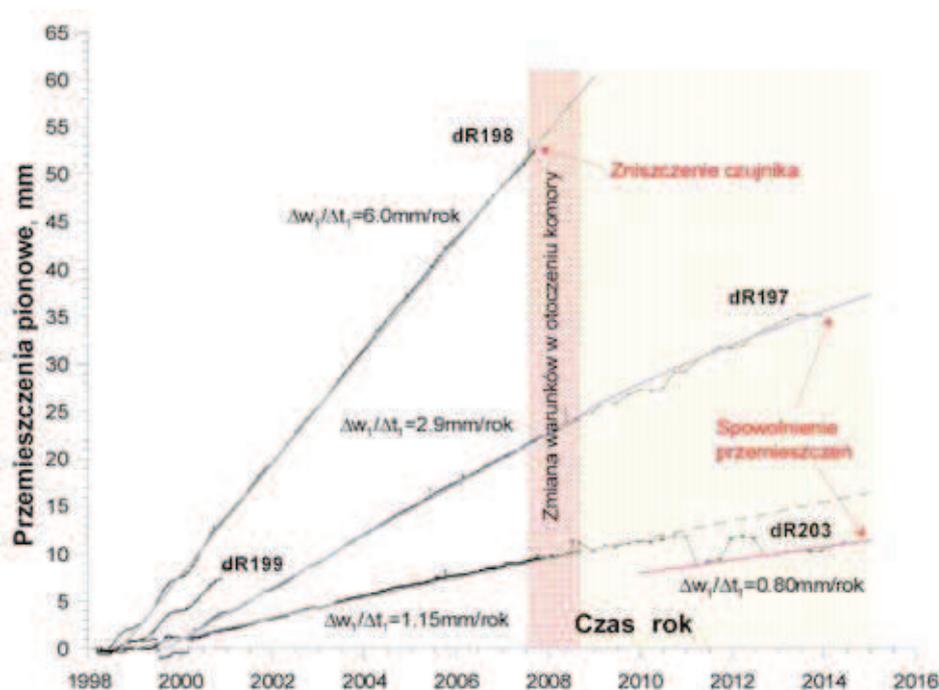


Rys. 15. Lokalizacja czujników w komorze Layer  
Fig. 15. Locations of sensors in the Layer Chamber

Aproksymacja wyników pomiarów krzywymi potęgowymi typu  $w(t)=c_i(\Delta t)^m$  wskazuje na niewielkie odchylenia od stałej prędkości przemieszczeń. Bezpośrednio przy ścianie tamy prędkość ta jest prawie stała ( $m=0,99$ ), natomiast prędkość obniżenia przy czujniku dR197 w latach 2008-2014 zmniejszała się ( $m=0,82$ ).

#### 6. Podsumowanie i wnioski

Po zakończeniu eksploatacji złoża Wieliczka, głównym zadaniem Kopalni jest ochrona zabytkowej kopalni i publiczne udostępnienie jej walorów. Ważnym elementem ochrony



Rys. 16. Przemieszczenia stropu w komorze Layer [10]

Fig. 16. Displacement of the ceiling in the Layer Chamber [10]

przed zagrożeniem wodnym kopalni jest bezpieczne ujęcie głównego wycieku kopalnianego W VII-16 w komorze Layer w chodniku tamy podporowej. Funkcjonalność tamy zależy od stopnia jej deformacji i stanu otaczającego ją górotworu.

Wszystkie zastabilizowane w komorze Layer repery obniżają się. Zależność przemieszczenia pionowego punktów od czasu aproksymować można pewnym typem funkcji wykładniczej, opisującej zjawiska charakteryzujące się zmniejszaniem prędkości w trakcie zbliżania się do wartości granicznej. Pionowe deformacje tamy są ściskaniem. Większe obecnie deformacje we wschodniej części tamy mogą być związane z zatrzymaniem ruchu punktów spągowych przy chodniku w obudowie tubingowej. Na rzeczywisty ruch tamy i górotworu w jej rejonie składają się obserwowane w komorze Layer przemieszczenia pionowe (55% – 75% ruchu) oraz obniżenia reperu ZN 7-11, do którego dowiązywane były niwelacje (45% – 25% ruchu).

Tama i otaczający ją górotwór ulega wpływom niżej położonych pustek. Zaznacza się to w obniżeniach reperów w chodnikach między komorą Layer a szybem Kościuszko i stałej tendencji obniżenia punktu ZN 7-11. Deformacje i przemieszczenia pionowe są prawdopodobnie skutkiem podwyższonej odkształcalności i podatności zawilgoconych utworów, rumoszu i skał odpadowych pozostałych po zbiorniku dosalającym – obecnie pod spągami tamy, ale również podwyższonych w tym rejonie obciążeń oddziałujących na strop tamy, wynikających ze sposobu eksploatacji na wyższym poziomie. Zagęszczanie ośrodka pod tamą lub jego wypychanie poza strefę spągu tamy są zjawiskami o tendencji zanikowej, a odzwierciedleniem tego trendu są wyniki pomiaru przemieszczeń w komorze Layer. Przyczyną deformacji poziomych w kierunku normalnym do czoła tamy może być podwyższona odkształcalność betonu, jak również odspojenie i spękanie czołowej warstwy tamy.

Przeprowadzona analiza wykazała, że pionowa deformacja tamy – obserwowana na jej ścianie, ale występująca także w jej wnętrzu – będzie postępować z tendencją zanikową. Przejawem tego procesu będzie też zwiększanie odkształ-

ceń poziomych, szczególnie w środku wysokości tamy. Deformacje tamy mogą przejawiać się następnymi spękaniami. Z tego względu integralność tamy warto byłoby stwierdzić poprzez badania georadarem.

Przeprowadzone badania wykazały, że poprzez analizę wyników pomiarów geodezyjnych rozpoznać można ruch otoczenia tamy wodnej i jej deformacje, określające stan tamy podporowej, a także wstępnie ocenić tendencje zmian tego stanu. Warunkiem poprawności takich pomiarów w warunkach kopalni soli jest określenie powiązania ruchów lokalnych z zaciskaniem w skali górotworu objętego wpływami eksploatacji.

**Autorzy składają podziękowania za cenne uwagi Panu dr. hab. inż. Grzegorzowi Kortasowi.**

## Literatura

1. Brudnik K., Czop M., Motyka J., d'Obyrn K., Rogoż M., Witczak S.: The complex hydrogeology of the unique Wieliczka salt mine. „Przeгляд Geologiczny” 2010, vol. 58, Nr 9/1.
2. d'Obyrn K., Brudnik K.: Wyniki monitoringu hydrogeologicznego w kopalni soli „Wieliczka” po zamknięciu dopływu wody w poprzeczni Mina na poz. IV. „Przeгляд Górnicy” 2011, Nr 6.
3. Garlicki, A., Pulina, M., Rózkowski, J.: Wpływ zjawisk krasowych na zagrożenie wodne kopalni soli Wieliczka. „Przeгляд Geologiczny” 1996, vol. 44, Nr 10.
4. Gonet A. i in.: Aktualizacja „Kompleksowej koncepcji zabezpieczenia zabytkowej Kopalni Soli „Wieliczka” przed zagrożeniem wodnym” w zakresie likwidacji wycieków W VII-16, W VI-32 i W VI-6. Kraków, Fundacja Wiertnictwo-Nafta-Gaz, Nauka i Tradycje, 2006 (praca niepublikowana).
5. Kortas G.: Ocena stanu zagrożenia powierzchni w związku z wyciekami z poprzeczni Mina w Wielicze, Materiały z I Spotkania Polskiego Stowarzyszenia Górnictwa Solnego, Zakopane, XI 1992, Wyd. PSGS.
6. Kortas G.: Przemieszczenia powierzchni nad historyczną kopalnią w Wielicze. „Przeгляд Górnicy” 2007, Nr 3.

7. Kortas G.: Szyb z obudową w górotworze solnym – wstępne badania modelowe. „Górnictwo i Geoinżynieria” 2010, R. 34, z. 2.
8. Kortas G.: Zagrożenie wodne w polskich podziemnych kopalniach soli. „Przegląd Górniczy” 2013, Nr 5.
9. Kortas G.: Podstawowe problemy ochrony powierzchni i górotworu w górnictwie solnym. „Przegląd Górniczy” 2014, Nr 10.
10. Kortas G., Maj A.: Analiza wyników pomiarów geodezyjnych oraz badań geologicznych i hydrogeologicznych dla oceny stanu tamy podporowej w komorze Layer w kopalni Wieliczka. Kraków, GeoConsulting, 2014 (praca niepublikowana).
11. Maj A., Kotas G., Ulmanniec P.: Ground uplift after closure of water leaks in the Mina drift of the Wieliczka salt mine. *Geology, Geophysics & Environment* 2012, Vol. 38, No. 1.
12. Szewczyk J. i in.: Wykonanie analizy wraz z interpretacją wyników pomiarów konwergencji pionowej i poziomej oraz propagacji szczelin w wyrobiskach. Kraków, AGH, 2011 (praca niepublikowana).
13. Szybist, A.: Aktualizacja obrazu budowy geologicznej i warunków hydrogeologicznych złoża Wieliczka dla potrzeb projektowania otworów piezometrycznych na północnym przedpolu Kopalni. Archiwum Kopalni Soli Wieliczka, 2011.
14. Wójcik J. i in.: Opracowanie interpretacji katastrof wodnych i doświadczeń hydrotechnicznych, wyników drenażu i przejawów ruchu górotworu i jego skutków w postaci szkód górniczych, a w szczególności doświadczeń z przebiegu historycznych katastrof oraz zwalczania zagrożenia wodnego w komorze Kloski, pop. Mina, komorze Fornalska, Z-32 i podłężni Kosocice dla określenia parametrów i warunków modelowania dynamicznych przepływów i ich skutków. Rozdz. IV.7. Komora Fornalska 2. Poziom VII. Kraków, GeoConsulting, 1995 (praca niepublikowana).
15. Zuber A., Ciężkowski W.: Ocena dotychczasowych badań znacznikowych przeprowadzonych w Kopalni Soli Wieliczka i w jej rejonie. W: Zadanie C, PBZ 0066-01. Kraków, Masz. Arch. Kat. Geologii Złazowej i Górniczej Wydz. GGiOŚ AGH, 1995 (praca niepublikowana).

---

***Zwiększajmy prenumeratę  
najstarszego – czołowego miesięcznika  
Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Górnictwa!***

Liczba zamawianych egzemplarzy określa zaangażowanie jednostki  
gospodarczej w procesie podnoszenia kwalifikacji swoich kadr!