

# Wdrożenie iniekcji strumieniowej w Kopalni Soli „Wieliczka” SA

tekst: **prof. dr hab. inż. ANDRZEJ GONET**, **prof. dr hab. inż. STANISŁAW STRYCZEK**, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, **mgr inż. MICHAŁ ŻRÓBEK**, Kopalnia Soli „Wieliczka” SA

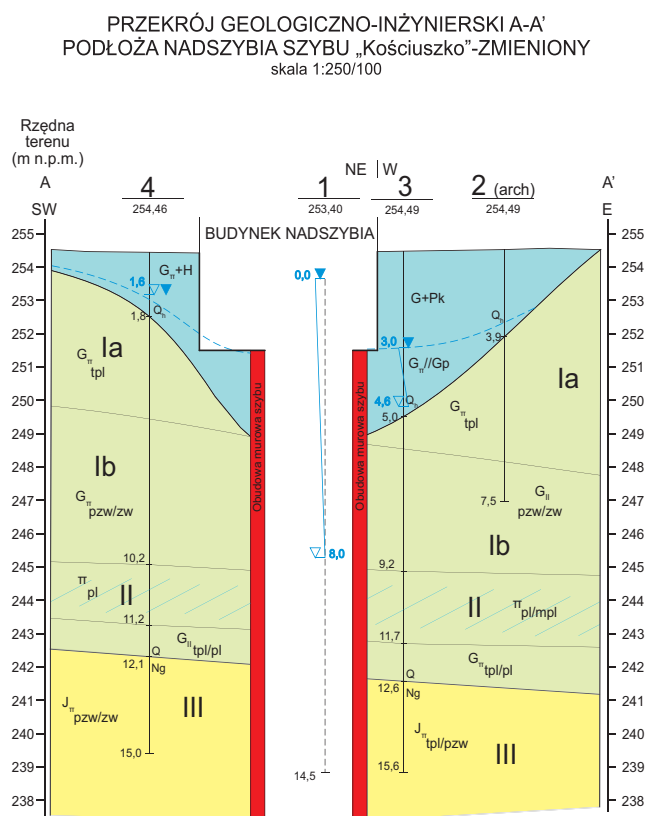
Istniejące warunki geologiczne i hydrogeologiczne połączone z ponad siedmiowiekową działalnością człowieka doprowadziły do powstaniu wielu dopływów wody do Kopalni Soli „Wieliczka”. Dzięki prowadzonym od wielu lat pracom zabezpieczającym kopalnię udało się opanować nawet katastrofalne wycieki, jakim był np. dopływ z poprzeczni Mina w 1992 r. [1]. Jedną z ostatnio zakończonych prac zabezpieczających było uszczelnienie obudowy szybu Kościuszko przy zastosowaniu iniekcji strumieniowej (jet grouting).

## Wstęp

Kopalnia Soli „Wieliczka” jest unikatowym zabytkiem w skali światowej i konieczne jest jej zabezpieczenie, aby zachować obiekt dla przyszłych pokoleń. Jednym z funkcjonujących szybów w Kopalni Soli „Wieliczka” jest szyb Kościuszko, który pełni funkcję szybu wentylacyjnego, wydechowego. Usytuowany jest na terenie miasta Wieliczka, w zachodniej części Kopalni Soli „Wieliczka”. Został wykonany w latach 1790–1791 (pierwotna nazwa Józef II) i jego zadaniem było udostępnienie złoża oraz przewietrzanie wyrobisk zlokalizowanych w zachodniej części kopalni. Ze względu na stan techniczny szybu w połowie XX w. przebudowano jego odcinek [2] od powierzchni do głębokości 59,76 m. Został wykonany w obudowie murowej o przekroju beczkowym o wymiarach 6,14 x 3,29 m i grubości muru 0,55 m. Poniżej, od głębokości 59,76 m aż do głębokości końcowej, tj. do 297,89 m, szyb miał przekrój prostokątny o wymiarach 5,5 x 2,2 m i obudowę drewnianą z bali o przekroju 0,2 m i 0,3 x 0,3 m. W roku 1985 wykonano nową głowicę szybu, a pod koniec 1989 r. rozpoczęto przebudowę szybu według projektu technicznego opracowanego przez Biuro Projektów Bipropok w Chorzowie [3]. Przebudowę szybu na odcinku od poziomu I do poziomu VIII prowadzono do połowy lat 90. XX w. Obecnie szyb Kościuszko ma głębokość 297,5 m i posiada wloty od I do VIII poziomu.

## Budowa geologiczna i warunki hydrogeologiczne

Z powodu wykonywanych wcześniej prac górniczych i budowlanych w rejonie szybu Kościuszko zdecydowano, że przed rozpoczęciem robót iniekcyjnych należy przeprowadzić badania geologiczno-inżynierskie [4] i określić parametry gruntów występujących w najbliższym otoczeniu szybu oraz warunki hydrogeologiczne. Na podstawie badań stwierdzono, że wokół szybu występują nasypy antropogeniczne oraz utwory czwartorzędowe – gliny i gliny pylaste w zróżnicowanym stanie konsystencji, od twaroplastycznych po płynne, w przedziale głębokości 0,0 do ok. 12,0 m p.p.t. Poniżej czwartorzędów rozpoznano trzeciorzędowe (Neogen) iły i iłowce budujące otulinę iłowo-gipsową złoża solnego. Stwierdzono, że powyższe utwory występują w stanie twaroplastycznym i półzwałym. Na rycinie 1 przedstawiono



Ryc. 1. Zmodyfikowany przekrój geologiczno-inżynierski podłoża nadszybia szybu Kościuszko

zmodyfikowany przekrój geologiczno-inżynierski podłoża nadszybia szybu Kościuszko.

W powyższych utworach nawiercono dwa poziomy wodonośne o charakterze naporowym. Płytszy na głębokości ok. 3,0 m p.p.t. w antropogenicznych utworach zbudowanych z różnorodnych gruntów wymieszanych z gruzem, którego ciśnienie piezometryczne stabilizowało się na głębokości ok. 3,0 m p.p.t. Drugi poziom wodonośny został nawiercony w glinach pylastych w stanie płynnym na głębokości ok. 9,5 m p.p.t., którego ciśnienie piezometryczne stabilizowało się nieznacznie powyżej poziomu terenu.

Wody podziemne występujące wokół szybu to solanki o mineralizacji 27–300 g/dm<sup>3</sup>, agresywne w stosunku do stali i betonu. Według danych archiwalnych [5], całkowity dopływ do szybu Kościuszek wynosił od 0,5 do 0,6 dm<sup>3</sup>/min.

### Technologia uszczelniania obudowy szybu

Projektując technologię wykonania ekranu przeciwfiltracyjnego wokół obudowy szybu Kościuszek, należało wziąć pod uwagę wiele istniejących zagrożeń i ograniczeń. Jak napisano w pracy [6], przy przebudowie szybu w latach 50. XX w. na głębokości 15 m od powierzchni natrafiono na półpłynne średnioziarniste, ilowate piaski, które powyżej przeszły w kurzawkę i nie można jej było utrzymać za obudową tymczasową. W związku z dostaniem się upłynnionego materiału gruntowego do szybu, co wywołało osiadanie powierzchni terenu, doszło do poważnego odchylenia wieży nadszymbia w kierunku południowym w stopniu zagrażającym stateczności konstrukcji. Po wstrzymaniu prac związanych z przebudową szybu uzupełniono obudowę. Pomimo podjętych działań stwierdzono pęknięcie sąsiednich budowli, spowodowane najprawdopodobniej rozwojem niecki osiadań, powstałej wskutek wytworzenia się pustek w górotwie podczas wpływu kurzawki do szybu. Powstałe pustki wypełniono zaczynem cementowym i zabezpieczono popękany fundament wieży szybowej. Podczas dalszej przebudowy szybu stwierdzono dalsze osiadanie i wychylenie się wieży szybowej od pionu. Dopiero po odpowiednim zabezpieczeniu wieży szybowej kontynuowano uszczelnianie przestrzeni poza obudową szybową zaczynem cementowym przez otwory wiercone z wnętrza szybu, gdyż wcześniej wierconymi otworami za obudową szybu nie można było wtłoczyć zaczynu w górotwór.

Ze względu na warunki geologiczne i hydrogeologiczne otoczenia szybu oraz jego konstrukcję zaobserwowano dopływ wody do szybu przez obudowę, która ze względu na wydajność dopływu i skład chemiczny niekorzystnie oddziaływała na obudowę szybu oraz stalowe elementy zabudowane wewnątrz szybu.

W celu ograniczenia dopływu wody zaprojektowano ekran przeciwfiltracyjny wokół obudowy szybu [7, 8]. Do jego wykonania przewidziano zastosowanie iniekcji strumieniowej (jet grouting) i iniekcji klasycznej [9]. Otwory wiercono na zewnątrz obudowy szybu, dzięki czemu szyb Kościuszek podczas prac iniekcyjnych mógł spełniać swą zasadniczą funkcję szybu wentylacyjnego, co było jednym z najważniejszych kryteriów doboru technologii wykonania ekranu. Równocześnie należy podkreślić, że ekran przeciwfiltracyjny stanowi dodatkowe wzmocnienie obudowy szybu, co przy jego nieznanymi rzeczywistych parametrach wytrzymałościowych jest jego istotną zaletą. Ze względów finansowych i konieczności utrzymania ciągłości pracy szybu Kościuszek nie zdecydowano się na szczegółowe badania stanu technicznego obudowy szybu.

Docelowy ekran przeciwfiltracyjny powstał po wykonaniu otworów badawczych, otworów pierwszej, drugiej i trzeciej kolejności wykonania. Każdy z otworów był wyznaczany przez pracowników Działu Mierniczego KSW zgodnie z zaleceniami podanymi w projekcie [4]. Ze względu na ogólny poziom rozpoznania otoczenia szybu i wcześniejsze problemy przy jego przebudowie w projekcie zaplanowano cztery otwory badawcze wiercone rdzeniowo o głębokości 25 m. Kompleksowa analiza otrzymanego rdzenia wiertniczego była podstawą do dalszych

ustaleń dotyczących doboru receptur zaczynów uszczelniających i parametrów technologii ich zatłaczania w górotwór.

W dalszym harmonogramie prac doszczelniających szyb Kościuszek realizowano otwory iniekcyjne pierwszej kolejności wykonywania. W celu dokładniejszego rozpoznania zjawiska wtłaczania zaczynu uszczelniającego w górotwór w otoczeniu szybu Kościuszek opracowano karty wiercenia otworu, karty kontroli zaczynu uszczelniającego i karty iniekcji.

Dwie pierwsze karty spełniały zasadnicze funkcje informacyjne o technologii wiercenia otworów i parametrach zastosowanego zaczynu uszczelniającego. Na szczególną uwagę zasługuje karta iniekcji, która oprócz podstawowych danych opisujących profil geologiczny i recepturę zaczynu zawierała obliczenia różnych wielkości, pozwalające racjonalnie opracować zalecenia dotyczące procesu iniekcji zaczynu w górotwór, a także przeprowadzić jego optymalizację. Są w niej takie wielkości, jak: średnice dysz iniekcyjnych i ich ekwiwalentne powierzchnie, ciśnienie tłoczenia zaczynu, prędkość wypływu zaczynu z dysz, moc wypływającego zaczynu z dysz, parcie zaczynu wypływającego z dysz, jednostkowa energia zaczynu wypływającego z dysz, jednostkowa praca zaczynu wypływającego z dysz.

Po analizie danych dotyczących warunków geologicznych i technicznych zdecydowano prowadzić roboty wiertnicze i iniekcyjne z poziomu piwnicy szybowej. Zaletą takiego rozwiązania było znaczne przybliżenie odległości otworów do obudowy szybowej i jednocześnie znaczące zmniejszenie liczby otworów niezbędnych do wytworzenia ekranu przeciwfiltracyjnego w stosunku do alternatywnej lokalizacji otworów wokół budynku nadszymbia szybu.

Wadą takiego rozwiązania było natomiast znaczące ograniczenie przestrzenne, wynikające z wysokości pomieszczenia piwnicy szybowej wynoszącej ok. 2,20 m. Dodatkowe ograniczenie stanowiły elementy konstrukcyjne posadowienia wieży szybowej czy składowe infrastruktury kopalnianej zabudowanej w piwnicy szybowej. W piwnicy znajdowało się tylko urządzenie wiertnicze i niezbędny osprzęt do wykonania otworu, a składniki i mieszalniki zaczynu oraz pompa iniekcyjna znajdowały się na zewnątrz budynku.

Podczas doboru technologii iniekcji wzięto pod uwagę założony cel robót, warunki geologiczne, hydrogeologiczne, techniczne oraz bezpieczeństwo obudowy szybowej, której konstrukcja nie mogła zostać naruszona podczas prac iniekcyjnych.

W związku z powyższym w celu uszczelnienia szybu Kościuszek jako wiodącą metodę wybrano technologię wysokociśnieniowej iniekcji strumieniowej (jet grouting). Jako uzupełniającą wybrano technologię iniekcji klasycznej [9], którą zastosowano do doszczelnienia nasypu antropogenicznego znajdującego się pod płytą piwnicy szybowej.

Wykonawcą prac było Przedsiębiorstwo Geologiczne Budownictwa Wodnego Hydrogeo w Krakowie, które zastosowało zmodyfikowane urządzenie wiertnicze MDR-06 oraz pompę iniekcyjną Tecniwell TW 400 DCZ-CI i mieszalniki CIMA JMP8. Dzięki temu, że po wywierceniu otworu do zaplanowanej głębokości przystępowano bezpośrednio do przeprowadzenia iniekcji strumieniowej, prace przebiegały szybko i sprawnie, gdyż wyciągając przewód wiertniczy z otworu, zatłaczano zaczyn uszczelniający w górotwór. Schemat takiego działania przedstawiono na rycinie 2.

Kolejność wiercenia otworów iniekcji zaprojektowano w taki sposób, aby zagęszczenie otworów na linii osi ekranu przeciwfiltracyjnego wzrastało równomiernie.

Dobór parametrów iniekcji, tj. ciśnienie, wydajność tłoczenia, prędkość obrotowa, prędkość podnoszenia przewodu wiertniczego, były dostosowywane w pierwszej kolejności do nadrzędnego kryterium bezpieczeństwa konstrukcji obudowy szybowej, a następnie zgodnie z kryterium parametrów właściwych dla warunków geologicznych. Dla zapewnienia bezpieczeństwa obudowy szybu

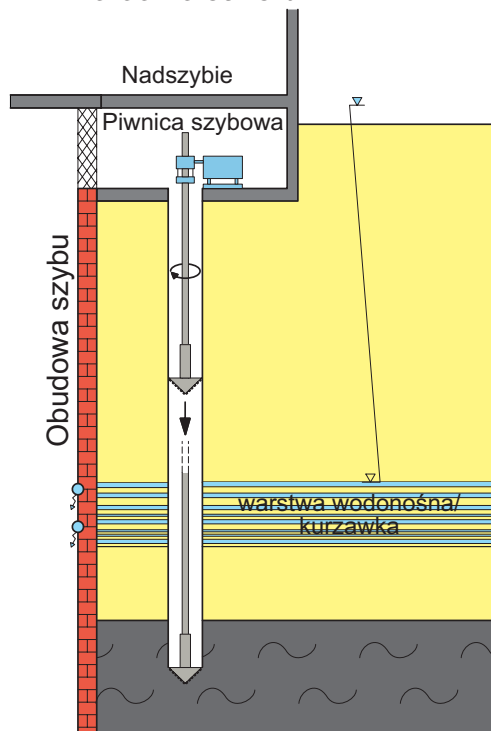
zaprojektowano i zainstalowano specjalny system monitoringu przemieszczeń, wizyjnego oraz obserwacji bezpośrednich [7]. Ustalono trzy poziomy zabezpieczeń: normalny, ostrzegawczy i alarmowy.

Podczas zatłaczania zaczynu iniekcyjnego należało zwrócić szczególną uwagę na odkształcenia obudowy szybowej. Musiał być prowadzony ciągły monitoring wewnątrz szybu i na całym powierzchniowym ciągu iniekcyjnym. Wskazania aparatury pomiarowej przemieszczeń w obudowie szybu o wartości do +/-0,5 mm/m oznaczało próg normalny, +/-1,5 mm/m oznaczało próg ostrzegawczy, a przekroczenie wartości +/-3,0 mm/m oznaczało próg alarmowy. Podczas wystąpienia powyższych warunków zalecono stosowanie w praktyce następujących procedur:

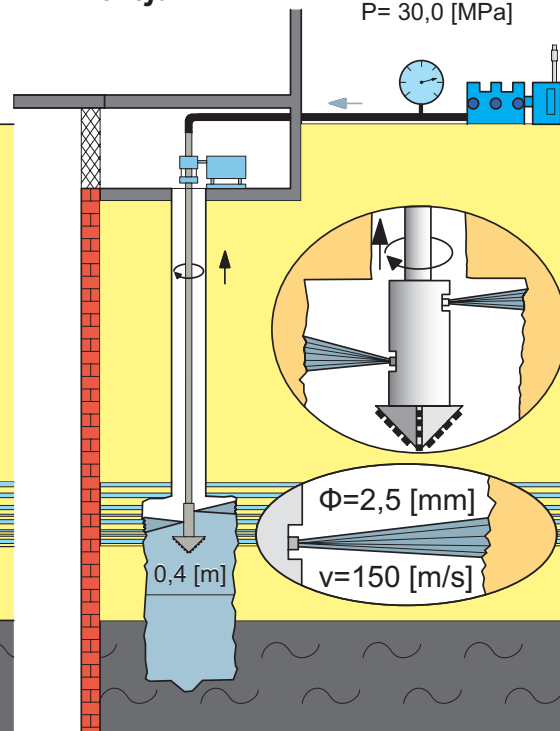
1. Jeżeli przemieszczenie obudowy szybu przekroczy wartość +/-1,5 mm/m, to wówczas należy przerwać tłoczenie zaczynu oraz obserwować przemieszczenia w obudowie szybu i ciśnienie na manometrze pompy tłocznej. Po przerwie technologicznej i powrocie odkształcenia do normalnego stanu można ponownie zatłaczać zaczynu, ale ze zmniejszonym wydatkiem zaczynu;
2. Jeżeli przemieszczenia osiągną wartość +/-3,0 mm/m należy natychmiast przerwać zatłaczanie zaczynu i zarządzić stójkę, prowadząc wzmożony monitoring i analizę zaistniałej sytuacji. Dopiero po powrocie do stanu normalnego można ponownie prace iniekcyjne.

Zalecono także obserwację objętości dopływu wody lub zaczynu do szybu wraz z określeniem wartości dopływu wody lub zaczynu w jednostce czasu. Jeżeli dopływ wody lub zaczynu do szybu przekroczyłby 2,0 dm<sup>3</sup>/min, należało przerwać iniekcję, prowadząc wzmożony monitoring i analizę zaistniałej sytuacji, wznowiając iniekcję po znacznym obniżeniu się dopływu do szybu.

### 1. Wiercenie otworu



### 2. Iniekcja



Ryc. 2. Schemat wiercenia otworu i iniekcji strumieniowej

Roboty rozpoczęto od wykonania pierwszego otworu rdzeniowego o długości 25,0 m z poziomu piwnicy szybowej. Następnie wykonano iniekcję strumieniową na całej długości otworu. Iniekcję rozpoczęto przy ciśnieniu 5,0 MPa i w dalszej realizowanych otworach o długości 15,0 m zwiększano stopniowo ciśnienia zatłaczania 15,0; 18,0; 25,0; 27,0; 30,0 MPa.

Zastosowanie ciśnienia 30,0 MPa spowodowało przebicie zaczynu uszczelniającego do szybu. W związku z powyższym w realizowanych sześciu kolejnych otworach zdecydowano o zastosowaniu ciśnienia tłoczenia zaczynu równego 20,0 MPa. Po ich wykonaniu ponownie podjęto próbę zwiększenia ciśnienia zatłaczania zaczynu iniekcyjnego do wartości 25,0 MPa, co przyniosło skutek podobny jak w przypadku poprzednich prób z wyższym ciśnieniem.

Na podstawie zebranych danych z monitoringu przemieszczeń, wizyjnego oraz obserwacji bezpośrednich zdecydowano o zastosowaniu ciśnienia zatłaczania o wartości 20,0 MPa w kolejnych 15 otworach. Po wykonaniu 32 otworów zdecydowano o podniesieniu ciśnienia zatłaczania do ok. 26,0 MPa. Na tym etapie robót nie zaobserwowano znaczących przebić zaczynu uszczelniającego do szybu, w związku z czym ciśnienie zatłaczania utrzymano. Następnie od 58 otworu w kolejności wykonania do końca robót (88 otworów) stosowano ciśnienie wynoszące 30,0 MPa.

W procesie dostosowania parametrów ciśnienia zatłaczania jako wiodącego parametru iniekcji, będącego zarazem wskaźnikiem bezpieczeństwa konstrukcji obudowy szybowej, stosowano wartości przemieszczeń oraz obserwację stanu obudowy szybowej i elementów konstrukcyjnych, realizowaną za pomocą monitoringu wizyjnego i osobistych rewizji z przedziału drabinowego. Poza powyższymi kryteriami obserwowano również wartość dopływu cieczy w jednostce czasu oraz mierzono wartość pH. Zaobserwowano, że wraz

ze wzrostem ciśnienia rośnie ilość wypychanej przez obudowę szybu wody.

Wyższe ciśnienie powodowało również przyspieszenie pojawienia się wody o podwyższonej wartości pH, dochodzącej nawet do 14. Wyższe ciśnienia powodowały również pojawienie się przebić zaczynu uszczelniającego do szybu w krótszym czasie od rozpoczęcia iniekcji i o większych wydajnościach.

Dopływ wody i zaczynu iniekcyjnego do szybu odbywał się głównie przez miejsca osłabienia obudowy murowej zabudową kotew, pomostów czy rozpór lub innych elementów naruszających ciągłość obudowy szybowej. Dopływ płynów przez pęknięcia czy powierzchni osłabienia zaprawy przez korozję chemiczną miał charakter drugorzędny.

Zaobserwowano również, że zasięg bezpośredniego wpływu iniekcji na wydatek dopływu wody do szybu i pojawienia się przebić zaczynu iniekcyjnego ogranicza się do odcinka głębokości rury szybowej od głowicy do ok. 16,0 m, co pokrywało się z danymi z monitoringu przemieszczeń, który również na tym odcinku wskazywał na większe przemieszczenia.

Bardzo istotne było to, że w toku prac – pomimo podwyższenia ciśnienia zatłaczania – przebiccia zaczynu uszczelniającego do szybu występowały z coraz mniejszym natężeniem. Świadczy to o sukcesywnym uszczelnianiu górotworu przez wytwarzanie kolumn iniekcyjnych tworzących ekran przeciwfiltracyjny oraz pośrednim wzmacnianiem górotworu wokół szybu.

Spośród innych parametrów iniekcji w trakcie prac zastosowano wartości zestawione poniżej:

- 1) wydatek tłoczenia [ $\text{dm}^3/\text{min}$ ]:  $75 \leq Q \leq 170$ ,
- 2) prędkość podnoszenia przewodu wiertniczego [ $\text{m}/\text{min}$ ]:  $0,25 \leq v_{\text{podn}} \leq 0,4$ ,
- 3) prędkość obrotowa przewodu wiertniczego [ $1/\text{min}$ ]:  $22,5 \leq \omega \leq 125$ ,
- 4) średnica dysz iniekcyjnych [ $\text{mm}$ ]:  $2,0 \leq d \leq 3,0$ .

Stosując technologię iniekcji strumieniowej, wytworzono kolumny iniekcyjne o średnicy ok. 400 mm i całkowitej długości 1313 m. W celu wytworzenia kolumn zużyto 347  $\text{m}^3$  zaczynu uszczelniającego.

Iniekcję klasyczną zastosowano w przypadku 12 otworów bezpośrednio po zakończeniu iniekcji wysokociśnieniowej oraz dla czterech otworów doszczelniających nasyp antropogeniczny, występujący pod posadzką piwnicy szybowej. Otwory doszczelniające zostały wykonane w ostatniej kolejności. Długość powyższych otworów wynosiła od 1,5 do 2,5 m. Iniekcja klasyczna została przeprowadzona przez paker mechaniczny zapinany w posadzce piwnicy szybowej przy zachowaniu jednej strefy tłoczenia w każdym z otworów.

Tłoczenie zaczynu iniekcyjnego odbywało się przy stałym ciśnieniu, nie większym niż 0,3 MPa, i zmiennym wydatkiem zależnym od oporów tłoczenia.

Iniekcję klasyczną w otworach doszczelniających zaprojektowano w taki sposób, że tłoczenie odbywało się zawsze tylko w jednym otworze, a pozostałe pełniły w tym czasie rolę otworów odprężających, przez które była wypychana solanka spod posadzki piwnicy szybowej. Stosując metodę klasyczną, zatłoczono całkowitą objętość zaczynu iniekcyjnego równą 42,0  $\text{m}^3$ .

W wyniku przeprowadzonych prac, dopływ do szybu [5] zmniejszył się do 0,2  $\text{dm}^3/\text{min}$ , co oznacza spadek wydajności o ok. 60% z zaznaczeniem, że ok. 80% aktualnego

całkowitego dopływu do szybu kształtowane jest przez dopływ wody przez kanał wentylacyjny, który nie był objęty pracami uszczelniającymi. W związku z powyższym szacuje się, że wartość całkowitego dopływu wody do szybu przez obudowę szybową objętą robotami uszczelniającymi wynosi ok. 0,05  $\text{dm}^3/\text{min}$ .

## Wnioski

1. Technologia iniekcji strumieniowej (jet grouting) okazała się efektywną i bezpieczną metodą uszczelniania i wzmocnienia przypowierzchniowej obudowy szybu Kościuszkowski. Było to możliwe dzięki temu, że proces uszczelniania rozpoczęto od mniejszych ciśnień tłoczenia zaczynu uszczelniającego i sukcesywnie zwiększano w kolejnych otworach przy jednoczesnym monitoringu efektów i wpływu iniekcji na obudowę szybową.

2. Dla uszczelnienia nasypu antropogenicznego występującego pod płytą posadzki piwnicy szybowej właściwą metodą okazała się technologia iniekcji klasycznej.

3. Monitoring przemieszczeń i monitoring wizyjny obudowy szybu był niezbędną częścią technologii uszczelniania szybu, gdyż zapewniał bezpieczeństwo obudowy szybu.

4. Parametry technologii iniekcji strumieniowej należy dostosować do występujących warunków geologiczno-inżynierskich bezpośredniego otoczenia górotworu i parametrów wytrzymałościowych obudowy szybu.

## Literatura

- [1] Gonet A., Stryczek S., Garlicki A., Szybist A.: „Projekt techniczny likwidacji poprzeczni Mina na odcinku od tamy wodnej do tamy T-4 w Kopalni Soli »Wieliczka«”. WwNiG AGH. Kraków 2011, mps.
- [2] Zalewski F., Woźniak S.: *Przebudowa szybu „Kościuszkowski” kopalni wielickiej*. „Inżynieria i Budownictwo” 1953, nr 6, s. 181–183.
- [3] Bipropok: Projekt techniczny nr 2-535-G/V. „Przebudowa szybu »Kościuszkowski« – aktualizacja wlot i stopa szybu w rejonie poziomu I”. Chorzów 1989.
- [4] Gonet A., Stryczek S., Wojnar W.: „Projekt robót geologicznych dla rozpoznania warunków geologiczno-inżynierskich w rejonie szybu »Kościuszkowski« w Kopalni Soli »Wieliczka«”. WwNiG AGH. Kraków 2013, mps.
- [5] „Książka kontroli zagrożenia wodnego w szybach Kopalni Soli »Wieliczka«”, założona 1981, archiwum działu geologicznego Kopalni Soli „Wieliczka”.
- [6] Gonet A., Stryczek S.: „Opracowanie technologii uszczelniania szybów górniczych przez Kopalnię Soli „Wieliczka””. WwNiG AGH. Kraków 2015, mps.
- [7] Jaśkowski W., Lipecki T.: *Projekt wykonania instalacji monitorującej przebieg uszczelniania szybu górniczego wraz z jej zabudową w szybie Kościuszkowski od zrębu szybu do poziomu I*. FAGH. Kraków 2014.
- [8] PN-EN 12716 *Wykonawstwo specjalnych robót geotechnicznych – iniekcja strumieniowa*, 2002.
- [9] Stryczek S., Gonet A.: *Geoinżynieria*. IGSMiE PAN. Kraków 2000.

Praca wykonana w ramach Badań Statutowych Wydziału Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, nr 11.11.190.555.

