

# UWARUNKOWANIA EKSPLOATACJI PODZIEMNEJ SKAŁ BLOCZNYCH

## CONDITIONS OF DIMENSION STONE UNDERGROUND EXPLOITATION

Katarzyna Guzik, Krzysztof Galos, Alicja Kot-Niewiadomska - IGSMiE PAN, Kraków  
Andrzej Stachowiak - PIG-PIB Oddział Dolnośląski, Wrocław

*Eksploatacja podziemna kamieni bocznych jest rozpowszechniona w wielu krajach europejskich. Jej popularność będzie ciągle wzrastać w związku z narastającymi problemami z prowadzeniem wydobywania metodą odkrywkową w wielu kamieniołomach. O możliwości podjęcia eksploatacji sposobem podziemnym decyduje jednak szereg czynników, które podzielić można na trzy zasadnicze grupy: geologiczno-górnictwo, środowiskowe i ekonomiczne. Wprowadzenie omawianej metody wymaga szczegółowego rozpoznania geologicznego górotworu, co w dalszej kolejności pozwala na wybór odpowiedniego systemu eksploatacji podziemnej i określenie jego parametrów. Dodatkowym czynnikiem determinującym konieczność wprowadzenia podziemnego wydobywania mogą być coraz liczniejsze konflikty środowiskowe i przestrzenne. Z drugiej strony metoda podziemna, mimo swoich wysokich kosztów związanych przede wszystkim z udostępnieniem złoża, musi przynosić ekonomiczne korzyści.*

**Słowa kluczowe:** eksploatacja podziemna, skały boczne, uwarunkowania geologiczno-górnictwo, uwarunkowania środowiskowe, uwarunkowania ekonomiczne

*Underground exploitation of dimension stone is widespread in numerous European countries. Its popularity will be continuously increasing due to growing problems related to open pit exploitation in many quarries. Possibility of underground exploitation of dimension stone depends on many factors, grouped into three main areas: geological and mining factors, environmental factors and economic factors. Introduction of such mining method requires detailed geological recognition of rock formation, which is necessary for the selection of an appropriate underground mining system and its parameters. An increasing number of environmental and land use conflicts is the additional factor determining use of underground exploitation. On the other hand, underground exploitation, in spite of commonly high costs of providing works, must bring economic benefits.*

**Keywords:** underground exploitation, dimension stone, geological and mining conditions, environmental conditions, economic conditions

### Wprowadzenie

Podziemna eksploatacja kamieni bocznych rozpowszechniona jest w szczególności w wysoko rozwiniętych krajach Europy o długich tradycjach pozyskiwania i stosowania kamienia w celach architektonicznych i rekonstrukcyjnych. Należą do nich zarówno państwa zajmujące czołowe miejsca wśród europejskich dostawców tego rodzaju surowca, takie jak Włochy, Hiszpania, Portugalia, Grecja i Francja – z poziomem wydobywania powyżej 1 mln t/r., jak też mniejsi producenci – Wielka Brytania, Belgia, Słowenia i Chorwacja [13]. Omawiana metoda z powodzeniem stosowana jest także w Rosji, Kanadzie czy USA, gdzie znajduje się największy tego typu kamieniołom marmurów na świecie (kamieniołom *Danby*). Znane są przypadki funkcjonowania podziemnych kopalń wyłącznie na potrzeby rekonstrukcji konkretnych obiektów architektonicznych. Należy do nich m.in. kamieniołom *Candoglia* w północnych Włoszech, w którym pozyskiwany jest różowy marmur wykorzystywany

do renowacji gotyckiej katedry w Mediolanie [16]. Znacznie częściej tego rodzaju eksploatacja dotyczy jednak skał znanych i cenionych na rynku międzynarodowym, takich jak odmiany włoskich marmurów typu *Statuario*, *Ordinario*, *Nuvalato* oraz *Lasa*, czy greckie marmury typu *Dionyssos* i *Volakas*.

Większość z funkcjonujących obecnie podziemnych kopalń kamieni bocznych pozwala na przedłużenie żywotności kopalń odkrywkowych, a czasami obie metody eksploatacji prowadzone są równolegle. Z jednej strony uwarunkowane jest to ciągłym zapotrzebowaniem na dany surowiec, z drugiej – w miarę postępu wydobywania – pojawiają się czynniki utrudniające prowadzenie eksploatacji metodą odkrywkową. Wśród nich wymienić należy: wzrost miąższości nadkładu i związane z tym problemy z jego składowaniem, znaczną głębokość wyrobisk i trudności w utrzymaniu stabilności wysokich skarp, a także ograniczenia wynikające z konieczności ochrony środowiska, czy też zagospodarowania powierzchni nad złożem. W obszarach górskich istotne znaczenie ma rów-

niez klimat warunkujący sezonowość eksploatacji w kopalniach odkrywkowych. Czynniki te powodują, że liczba wyrobisk podziemnych w ostatnich latach wzrasta, a kolejne kopalnie są na etapie ich projektowania. Dotyczy to nie tylko eksploatacji złóż kamieni blocznych, ale również innych kopalni skalnych, takich jak leukogranity [15] wykorzystywane do produkcji mączek skaleniowo-kwarcowych (kopalnia w Canal San Bovo, północne Włochy). Prawdopodobnie w miarę wyczerpywania się zasobów dostępnych z powierzchni, a także wraz z postępem technologii wydobywania skał (m.in. urabiania skał silnie związłych) metoda podziemna będzie stosowana coraz częściej. W rejonie Carrary (Alpy Apuańskie, północne Włochy) słynącym z wydobywania marmurów, gdzie wielowiekowa eksploatacja przyczyniła się do poważnego przekształcenia krajobrazu, około 30% z ponad 100 czynnych kopalń stanowią wyrobiska podziemne [12]. Mnożyć można również przykłady zastosowania tej metody w USA, gdzie funkcjonuje około 100 podziemnych kopalń wapieni [10].

Uruchomienie i prowadzenie eksploatacji podziemnej wymaga rozważenia wielu istotnych czynników, dotyczących z jednej strony możliwości technicznych budowy kopalni, a z drugiej opłacalności ekonomicznej takiej działalności górniczej i jej uwarunkowań środowiskowych. W artykule przedstawione zostaną główne uwarunkowania eksploatacji podziemnej kamieni blocznych w krajach Europy i Ameryki Północnej, w podziale na czynniki geologiczno-górnicze (litologiczne i tektoniczne oraz techniczno-operacyjne), środowiskowe i ekonomiczne.

### Uwarunkowania geologiczno-górnicze

Kluczową kwestią z punktu widzenia prowadzenia wydobycia metodą podziemną jest długoterminowa stabilność wyrobisk eksploatacyjnych. Ma to zasadnicze znaczenie zarówno dla zapewnienia bezpiecznych warunków pracy, jak też dla możliwości potencjalnego wykorzystania pustek poeksploatacyjnych w przyszłości. Eksploatacja podziemna złoża może spowodować problemy ze stabilnością górotworu w skali lokalnej, a w skrajnych przypadkach uniemożliwić dalsze funkcjonowanie kopalni. Z tego względu decyzja o uruchomieniu tego rodzaju działalności powinna być poprzedzona dokładnym rozpoznaniem budowy geologicznej złoża oraz szczegółową charakterystyką geomechaniczną górotworu.

#### Czynniki litologiczne i tektoniczne

Na wstępnym etapie oceny przydatności masywu skalnego do eksploatacji podziemnej przeprowadzane są badania geologiczne. Ich celem jest wyróżnienie podstawowych litotypów skał i przedstawienie ich zmienności, identyfikacja przerostów skał płonnych i stref obniżenia związłości kopaliny, a także stwierdzenie występujących nieciągłości, zwłaszcza uskoków i stref uskokowych wraz z określeniem ich znaczenia oraz zasięgu [7, 12]. Wśród uwarunkowań geologiczno-górniczych istotne znaczenie ma również miąższość nadkładu oraz warunki hydrogeologiczne w złożu. Znajomość tych czynników pozwala wybrać najkorzystniejszą partię górotworu z punktu widzenia udostępnienia złoża i jego przyszłej podziemnej eksploatacji, a w skrajnych przypadkach (skomplikowana budowa geologiczna) zdyskwalifikować tę metodę. Przedstawienie zmienności budowy geologicznej prowadzone jest głównie w oparciu o obserwacje odsłonięć i rdzeni wiertniczych. Dodat-

kowo wykorzystuje się metody geofizyczne, głównie w celu lokalizacji stref silnie spękanych i rozluźnionych, uskoków oraz kontaktu ze skałami otaczającymi.

Obecność przerostów skał płonnych jest niepożądana z punktu widzenia stabilności wyrobisk eksploatacyjnych. Problem ten obserwowany jest na przykład we włoskich kopalniach piaskowców typu *Pietra Serena* we Florencji, w których pomiędzy ławicami piaskowców licznie występują wkładki marglisto-lupkowe. W takich sytuacjach konieczne jest dokonanie oceny wytrzymałości pojedynczych warstewek o miąższości maksymalnie kilkunastu centymetrów, pozostawianych w stropie wyrobisk eksploatacyjnych. Ocenie podlega także stabilność filarów stanowiących naprzemianległą sekwencję piaskowców i plastycznych margli lub łupków [12]. W skałach węglanowych niekorzystne jest występowanie krasu, związanego głównie ze strefami spękań. Przykładowo, w niektórych słoweńskich i portugalskich kopalniach zjawiska te wpływają negatywnie na uzysk bloków, niekiedy nawet uniemożliwiając prowadzenie eksploatacji w danej części górotworu.

Kolejnym, rozpatrywanym elementem jest stopień skomplikowania budowy tektonicznej masywu skalnego, w tym w szczególności zlokalizowanie uskoków oraz stref silnie spękanych. Występujące w skałach naturalne płaszczyzny podzielności pionowej, dzielące masyw skalny na bloki, determinują przestrzenne rozmieszczenie wyrobisk podziemnych. Jednocześnie uznawane są za główny czynnik warunkujący stabilność filarów i komór położonych na niewielkich głębokościach [3]. Silne spękanie masywu skalnego, związane zarówno z procesami tektonicznymi, jak też wietrzeniowymi zachodzącymi na zboczach dolin, było jedną z przyczyn zaprzestania podziemnej eksploatacji eoceńskich wapieni w rejonie Rheims w północno-wschodniej Francji, uznawanych za najważniejszy kamień budowlany basenu paryskiego [9]. W połączeniu z niewielką miąższością ławic nie pozwalało to na tworzenie dużych kopalń, a wysokość podziemnych wyrobisk nie przekraczała 2,5 m. Tymczasem skały tego samego wieku są nadal eksploatowane w trzech kopalniach w pobliżu miejscowości Soissons. W tym przypadku korytarze udostępniające poprowadzono w głąb górotworu na odległość ponad 100 m. Odległość między spękaniem w tej części masywu wzrasta do ponad 20 m (z ok. 2 m w strefie kontaktu z powierzchnią terenu).

W kontekście zastosowania podziemnej metody wydobywania nadkład rozumiany jest jako łączna ilość skał zalegających powyżej stropu wyrobisk eksploatacyjnych. Mogą stanowić go utwory nieprzydatne dla uzysku bloków, w tym np. silnie spękane z odprężenia skały w strefach przypowierzchniowych, co ma miejsce w portugalskich kopalniach marmurów [14], bądź też skały o zbyt małej miąższości ławic, jak w przypadku florenckich piaskowców [5,6]. Wzrastająca miąższość nadkładu wpływa na koszty jego zdejmowania i składowania oraz późniejszej rekultywacji. W wielu kopalniach Europy południowej i wschodniej był on główną przyczyną wprowadzenia eksploatacji metodą podziemną. Poza wymienionymi przypadkami sytuacja taka miała miejsce m.in. w greckich kopalniach marmurów *Dionyssos*, słoweńskich wapieni w rejonie Hotavlje, czy wreszcie chorwackich wapieni w Kanfanar. Miąższość nadkładu osiągała w nich maksymalnie kilkadziesiąt metrów. W terenach górzystych strop wyrobisk podziemnych może zalegać znacznie głębiej, jak w przypadku kopalni marmurów *Carlone* (Włochy, Alpy Apuańskie), w której miąższość skał nadległych dochodzi do 450 m [4]. Znaczne zróżnicowanie litologiczne skał

Tab. 1. Wielkości wskaźnika RMR i GSI oraz wytrzymałość na ściskanie skał w wybranych kopalniach podziemnych kamieni blocznych  
 Tab. 1. RMR and GSI index and rock compressive strength in selected underground mines of dimension stone

Typ skały	Kopalnia/rejon	RMR/GSI*	Wytrzymałość skał [Mpa]
Piaskowce	Pietra Serena (Toskania, Włochy)	70-80	100
Marmury	Carlone (Alpy Apuańskie, Włochy)	85*	131
Marmury	Acqua Bianca (Włochy)	b.d.	76±6
Marmury	Pardais (Portugalia)	81	65
Wapień	Hotavlje I (Słowenia)	50*	15-93
Wapień	Lipica II (Słowenia)	b.d.	170
Wapień	Volokas (Grecja)	b.d.	108
Wapień	Loyalhanna (Północne Apallachy, USA)	85-90	b.d.

Źródło: [2,5,10]

nadkładu oraz ich zmienna miąższość są jedną z przyczyn, dla których w kopalniach stosuje się nieregularne rozmieszczenie komór i sztolni [8]. Taka sytuacja ma miejsce m. in. w kopalni marmurów *Acqua Bianca* (Południowy Tyrol, Włochy).

Szczególnie ważne, z punktu widzenia eksploatacji metodą podziemną, jest określenie warunków hydrogeologicznych masywu skalnego. Optymalne jest prowadzenie wydobywania w suchym górotworze, a już niewielki stopień zawodnienia wpływa negatywnie na jego stabilność. Z kolei konieczność odwadniania kopalni wyraźnie zwiększa koszty pozyskiwania surowca. Stąd zazwyczaj maksymalna głębokość eksploatacji sięga pierwszego poziomu wodonośnego.

#### Czynniki techniczno-operacyjne

Na etapie projektowania podziemnej kopalni rozważyć należy wybór systemu i kierunku eksploatacji oraz docelową wielkość wyrobisk eksploatacyjnych. Decyzje te podejmowane są na podstawie wyników badań geomechanicznych. Podstawą oceny jakości górotworu są klasyfikacje geotechniczne (m. in. RMR, Q, GSI), uwzględniające parametry wytrzymałościowe skał, stopień spękania masywu skalnego i jego zawodnienie. W celu uzyskania wysokiej wiarygodności wyników najczęściej stosowanych jest kilka systemów klasyfikacji, a ich wskazania są porównywane. Najpopularniejszym jest wskaźnik jakości masywu skalnego RMR według Bieniawskiego [1], będący sumą następujących składowych: wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie, wskaźnik stopnia spękania górotworu (RQD), odstęp spękań, charakter spękań, warunki hydrogeologiczne i orientacja spękań. Komplet informacji jest punktem wyjścia do modelowań numerycznych, których wyniki stanowią podstawę optymalnego rozmieszczenia wyrobisk eksploatacyjnych. Skały bloczne eksploatowane w Europie i USA metodą podziemną wykazują dużą zmienność w zakresie wytrzymałości na ściskanie, jak też wskaźników RMR i GSI (tab. 1). Pierwszy z wymienionych parametrów na ogół jest wyższy od 65 MPa, natomiast RMR wynosi zwykle powyżej 70 punktów (na 100 punktów możliwych do uzyskania), co odpowiada dobrej i bardzo dobrej jakości górotworu.

Poza wymienionymi czynnikami istotne znaczenie mają również parametry zalegania warstw. W większości kopalń podziemnych kąt upadu nie przekracza 10°, co stwarza najkorzystniejsze warunki dla zastosowania komorowo-filarowego systemu eksploatacji. Rzadziej nachylenie ławic jest większe (w przypadku nieczynnych już francuskich kopalń wapieni do 30° [9]), co wpływa na zróżnicowanie rozkładu naprężeń poziomych. Eksploatacja warstw nachylonych powoduje dodatkowe

problemy w doborze właściwego rozmieszczenia wyrobisk podziemnych i kierunku wydobywania. Kierunek eksploatacji podporządkowywany jest najczęściej czynnikiem operacyjnym, takim jak możliwości techniczne sprzętu do odpajania bloków oraz ich załadunku i transportu na powierzchnię. Z tego względu w przypadku warstw nachylonych wydobywanie prowadzone jest z reguły skośnie do rozciągłości warstw. Taka sytuacja ma miejsce w jednej z kopalń wapieni formacji Linden Hall w Centralnej Pensylwanii, w której warstwy zapadają pod kątem 10-15°, a dzięki odchyleniu kierunku eksploatacji o 30° w stosunku do rozciągłości warstw, nachylenie spągu wyrobisk korytarzowych i eksploatacyjnych nie przekracza 5-10° [10]. Bardzo rzadko przedmiotem podziemnego wydobywania są utwory zalegające pionowo. Przykładem jest żyła różowych marmurów eksploatowana w kamieniołomie Candoglia w północnych Włoszech. W kopalni zastosowano tunelowy system eksploatacji o znacznych rozmiarach wyrobisk korytarzowych [16].

Istotnym zagrożeniem dla funkcjonowania kopalni jest zawał lub opad skał stropowych. Niesie on poważne konsekwencje ekonomiczne, skutkujące często koniecznością przeniesienia eksploatacji w inne miejsce. Zapewnienie stabilności wyrobisk podziemnych, poza odpowiednio dobranym rozmieszczeniem filarów, wymaga pozostawienia w stropie drążonych komór ławicy skał o znacznej wytrzymałości. Jej miąższość uzależniona jest od parametrów jakościowych skał. Przykładowo w kopalni *Acqua Bianca* w celu uniknięcia niekontrolowanego rozprężania występujących w nadkładzie słabej jakości łupków, pozostawiona została warstwa marmurów o minimalnej miąższości 5 metrów [8]. Z kolei w kopalniach wapieni w USA miąższość stropowej warstwy zabezpieczającej wynosi średnio od 1,3 m w kopalniach, w których stosowano regularne kotwienie, do 2,25 m w kopalniach, które takiego wzmocnienia nie wymagały [10].

#### Uwarunkowania środowiskowe

W obrębie kryteriów środowiskowych najważniejsze ograniczenia wynikające z konieczności ochrony walorów przyrody ożywionej i krajobrazu wiążą się z objęciem znacznych fragmentów terenu wielkoobszarowymi formami ochrony. W przypadku najbardziej rygorystycznych form, jakimi są parki narodowe i rezerwy przyrody, niejednokrotnie uznaje się całkowity priorytet ochrony przyrody. Wśród europejskich kopalń podziemnych można jednak znaleźć przykłady ich funkcjonowania w obrębie obszarów podlegających ścisłej ochronie. Kopalnia *Acqua Bianca* położona jest na wysokości

1526 m n.p.m. w Parku Narodowym Stelvio. Eksploatacja marmurów zapoczątkowana została w 1883 r., a metoda podziemna wprowadzona została pod koniec XIX wieku w związku z niewielkimi zasobami dostępnymi do eksploatacji odkrywkowej oraz trudnymi warunkami prowadzonej działalności na stromym górskim zboczu. W związku z położeniem kopalni na terenie Parku Narodowego Stelvio transport urobku musi odbywać się w sposób bezpieczny i przyjazny dla środowiska. Od 1928 r. wykorzystywana jest do tego celu kolejka usytuowana na stromym górskim zboczu.

Konflikty środowiskowe dotyczą jednak w szczególności form ochrony o randze parków krajobrazowych, gdzie dopuszczalne są różne formy zagospodarowania terenu, ale istnieją duże ograniczenia dla działalności wydobywczej. Istotnym ograniczeniem dla prowadzenia eksploatacji kopalni metodą odkrywkową jest położenie złóż w obrębie zwartych kompleksów leśnych, w szczególności lasów ochronnych. W przypadku położenia złoża w obrębie parku krajobrazowego eksploatacja jest możliwa po uzgodnieniach z władzami parku i jej uwzględnieniu w planach urzędzenia parku. Dokument ten formułuje wymagania dotyczące ograniczeń związanych z zasięgiem i skalą wydobycia, czasem jej trwania, stosowanymi metodami urabiania i in. Niekiedy lokalizacja w granicach parku krajobrazowego oraz względy ochrony środowiska i rzadkich ekosystemów stawiane są na pierwszym planie, wykluczając możliwość zagospodarowania złoża.

Jedną ze szczególnych form ochrony przyrody jest objęcie obszaru europejską siecią NATURA 2000. Ograniczenia i utrudnienia dotyczące prowadzenia na takich terenach działalności wydobywczej mogą wykluczyć z rozważań surowcowych znaczną ilość zasobów różnych kopalni, a w przypadku złóż już zagospodarowanych spowodować konieczność zaniechania eksploatacji wraz ze wszystkimi konsekwencjami prawnymi i ekonomicznymi.

Czynniki środowiskowe zdecydowały o uruchomieniu eksploatacji podziemnej w chorwackim kamieniołomie *Kanfanar*, gdzie na powierzchni obszaru złoża znajdują się cenne przyrodniczo tereny zielone. Ochrona środowiska stała się również jednym z podstawowych czynników, które wpłynęły na uruchomienie podziemnej eksploatacji marmurów w licznych kamieniołomach w rejonie *Carrary*. Względy środowiskowe odegrały również istotną rolę w kopalni białych wapieni i dolomitów *Su Cuccumiau* (NE Sardinia). Pierwszorzędne znaczenie w tym przypadku miała rosnąca wrażliwość społeczna na kwestie związane z ochroną środowiska oraz wprowadzone regulacje prawne określające maksymalną wysokość, do której możliwe jest prowadzenie działalności, tj. 230 m n.p.m. Miały one na celu ochronę krajobrazu, ograniczenie widoczności wyrobisk eksploatacyjnych oraz emisji pyłu i hałasu [3].

W kontekście możliwości prowadzenia dalszej eksploatacji odkrywkowej istotne są również uwarunkowania związane z kierunkiem użytkowania terenu. Powodują one niekiedy, że podjęcie eksploatacji podziemnej staje się jedyną szansą dla dalszego funkcjonowania kopalni i wykorzystania atrakcyjnych zasobów złoża. Podziemna kopalnia *Jordans* (Wielka Brytania) powstała w południowej części *Inmosthay Quarry*, grupy wyrobisk powierzchniowych eksploatowanych od drugiej połowy XIX w. w centrum północnej części wyspy *Portland*. Większość zasobów południowej części kopalni leży poniżej terenu miejscowego klubu krykietowego. Dla uniknięcia zakłóceń na powierzchni terenu rozpoczęto eksploatację podziemną

metodami, które musiały zniwelować szkodliwe oddziaływanie, np. pyłu i hałasu, na otaczające środowisko [18].

### Uwarunkowania ekonomiczne

Oplącalność ekonomiczna eksploatacji podziemnej skał blocznych jest wypadkową wielu czynników. Uzależniona jest przede wszystkim od rozmiarów komór eksploatacyjnych, przewidywanego uzysku bloków, stopnia wykorzystania zasobów złoża i stosowanej technologii urabiania. Uwzględnić należy również znaczne nakłady finansowe ponoszone na etapie udostępniania złoża (koszt projektu, a zwłaszcza koszty drążenia chodników i komór) oraz koszty związane z koniecznością monitorowania stabilności wyrobisk podziemnych w trakcie prowadzonego wydobycia i po jego zakończeniu. Znaczne oszczędności wynikające z zastosowania metody podziemnej związane są z wyeliminowaniem kosztów zdejmowania i zagospodarowania nadkładu oraz zakupu gruntów. Dodatkowe korzyści ekonomiczne przynieść może również późniejsze zagospodarowanie komór poeksploatacyjnych.

Najczęściej eksploatacja podziemna kamieni blocznych prowadzona jest systemem komorowo-filarowym, szczególnie popularnym w złożach o prostej budowie geologicznej [3]. Wielkość wyrobisk eksploatacyjnych jest zróżnicowana (tab. 2) w zależności od uwarunkowań litologicznych, tektonicznych i właściwości mechanicznych masywu skalnego. Optymalne wymiary komór, zapewniające efektywną pracę ładowarek i wozideł w większości kopalń wahają się od 10 do 17 m, tylko sporadycznie przekraczając 15 m szerokości. W praktyce górniczej, często zdarza się jednak, że ich wielkość jest mniejsza, a rozmieszczenie nieregularne.

Utrzymanie stabilności komór niejednokrotnie wymaga dodatkowego wsparcia w postaci punktowego lub regularnego kotwienia (np. kopalnia marmuru typu *Lasa*, kopalnie wapieni *Bowers i Jordans*), opcjonalnie w połączeniu ze stalową siatką, podnosząc dodatkowo koszty prowadzonego wydobycia. Stopień wykorzystania zasobów złoża w przypadku eksploatacji podziemnej systemem komorowo-filarowym zasadniczo nie przekracza 65-70%, ale rzadko jest mniejszy niż 60%. Podszadanie wyrobisk podziemnych w tego typu kopalniach, mające na celu m.in. eksploatację pozostawionych filarów, zwykle nie jest opłacalne. Wskaźnik uzysku bloków (liczony w stosunku do łącznej wielkości wydobycia) wykazuje znaczne zróżnicowanie w zależności od rodzaju skały oraz występujących systemów spękań, wahając się od 10% do 60% w przypadku skał metamorficznych, do nawet 80% w przypadku jednorodnych masywów skał osadowych (głównie węglanowych).

Spośród czynników ekonomicznych istotne znaczenie ma dostępność opłacalnej ekonomicznie technologii urabiania skał. W obecnych uwarunkowaniach eksploatacja podziemna została zaadoptowana wyłącznie dla skał „miękkich”, takich jak marmury, wapień i łupki. Skały te urabiane są głównie przy użyciu diamentowych pił linowych w połączeniu z wrębiarkami łańcuchowymi. Metody te dają słabe efekty w skałach magmowych oraz innych niż węglanowe skałach metamorficznych, w których podziemna metoda eksploatacji stosowana była dotychczas w pojedynczych złożach [17]. Prace nad inną technologią urabiania, m. in. z zastosowaniem liny diamentowej i wysokociśnieniowego strumienia wodnego, prowadzone są w m. in. kopalni granitu w Japonii, niebieskiego kwarcytu w Brazylii i zielonego kwarcytu we Włoszech.

Tab. 2. Rozmiary komór eksploatacyjnych w wybranych kopalniach podziemnych w Europie  
 Tab. 2. Size of mining chambers in selected underground mines in Europe

Typ skały	Kopalnia/rejon	Szerokość komory [m]	Wysokość komory [m]	Długość komory [m]
Ofiokalcyty	Dolina Aosty (Włochy)	6-12	do 24	Kilkadziesiąt
Marmury	Alpy Apuańskie (Toskania, Włochy)	10-20	do 30	Kilkadziesiąt
Zielone kwarcyty	Dolina Spluga (Lombardia, Włochy)	10-12	do 20	do 30
Marmury	Pardais (Vila Viçosa, Portugalia)	5	6	6
Marmury	Acqua Bianca (Południowy Tyrol, Włochy)	20	b.d.	b.d.
Marmury	Candoglia (Północne Włochy)	21	48	80
Marmury	Hotavlje I (Słowenia)	8	4	do 45
Wapienie	Jordans (wyspa Portland, Wielka Brytania)	6	6	b.d.

Źródło: [2,5,8,12,18]

Poza względami technicznymi, opłacalność wydobycia uzależniona jest w wysokim stopniu od jakości pozyskiwanej kopaliny. Znaczenie w tym zakresie mają parametry fizykomechaniczne eksploatowanych skał oraz ich walory dekoracyjne. Przykładowo, jedną z przyczyn zaniechania podziemnego wydobycia marmurów w portugalskich kopalniach w prowincji Alentejo była niejednorodność odcieni barw, utrudniająca pozyskiwanie materiału kamiennego o identycznych cechach wizualnych. Z reguły jednak, skały występujące w głębszych partiach górotworu wykazują korzystniejsze od zalegających płytko parametry jakościowe. Spowodowane jest to obecnością coraz rzadszych spękań pokładowych, co pozytywnie wpływa na możliwość pozyskania bloków.

## Podsumowanie

W związku z postępującym ograniczeniem dostępności terenów pod eksploatację odkrywkową oraz coraz większą wrażliwością społeczną na kwestie związane z ochroną środowiska w krajach Europy i Ameryki Północnej coraz większa część złóż skał blocznych eksploatowana jest metodą podziemną. Dotyczy to w szczególności skał węglanowych, tj. marmurów i wapieni, rzadziej piaskowców i łupków, a tylko sporadycznie innych odmian skał (np. kwarcytów), dla których nie opracowano opłacalnej ekonomicznie technologii urabiania. Koszty eksploatacji podziemnej są na ogół wyższe od tych, które ponoszone są w przypadku działalności odkrywkowej. W pewnych sytuacjach zastosowanie tej metody staje się nieuniknione i pozwala na przedłużenie żywotności kopalni. W szczególności ma to miej-

sce w przypadku znacznej miąższości nadkładu złoża, dużej głębokości wyrobisk eksploatacyjnych, czy też pojawienia się konfliktów środowiskowych i przestrzennych.

Uruchomienie i prowadzenie eksploatacji podziemnej wymaga rozważenia wielu czynników, w szczególności uwarunkowań geologiczno-środowiskowych, możliwości technicznych budowy kopalni, oraz opłacalności ekonomicznej takiej działalności górniczej. Na etapie projektowania kopalni niezbędne jest dokładne rozpoznanie budowy geologicznej złoża, m. in. w zakresie litologii skał, tektoniki, w tym występujących powierzchni nieciągłości i spękań, oraz warunków hydrogeologicznych. Równie istotne jest przeprowadzenie wyprzedzającej charakterystyki geomechanicznej górotworu, a także monitorowanie stabilności wyrobisk podziemnych w czasie prowadzenia eksploatacji i po jej zakończeniu. Opisane w artykule czynniki geologiczne i geomechaniczne uwzględniane podczas planowania i prowadzenia eksploatacji podziemnej mają wpływ na sposób udostępnienia złoża i późniejsze pozyskiwanie surowca. Stanowią podstawę odpowiedniego rozmieszczenia wyrobisk górniczych oraz określenia ich optymalnych wymiarów. Ma to znaczenie z punktu widzenia opłacalności procesu wydobycia, długoterminowej stabilności komór (umożliwiającej ich potencjalne przyszłe zagospodarowanie) oraz bezpieczeństwa warunków pracy. Właściwe zaprojektowanie wyrobisk podziemnych zapewnia maksymalny uzysk bloków skalnych o regularnych kształtach, a także umożliwia swobodną pracę maszyn i urządzeń wykorzystywanych do odpajania bloków i transportu urobku na powierzchnię.

## Literatura

- [1] Bieniawski Z.T., *Engineering rock mass classification*. Wiley. New York, 1989
- [2] Bizjak K.F., *Stability analysis of underground openings for extraction of natural stone*, Geologija 46/1, Ljubljana, 2003
- [3] Careddu N., Siotto G., Tuveri A., *Evolution of a marble quarry: from open cast to underground exploitation*, Global Stone Congress. Alicante, Spain, 2010

- [4] Coli M., Livi E., Baldi M. – *Studies for rockburst prediction in the Carrara Marble - II geostructural/geomechanical rivisitation and 2D FEM modeling of a large underground quarry*, ISMR International Symposium - Eurock, Stockholm, Sweden, 2012
- [5] Coli M., Livi E., Pandeli E., Tanini C., *Pietra Serena mining In Fiesole*, Part II: Geological situation. Journal of Mining Science, Vol. 39, No 1, 2003
- [6] Coli M., Livi E., Tanini C., *Pietra Serena mining In Fiesole*, Part III: Structural-mechanical characterization and mining. Journal of mining Science, Vol.42, No 1, 2006
- [7] Costa e Silva M.M., Falcao Neves P., *Management Procedures for an Underground Excavation of Marble*, ISRM Int. Symp. on Rock Mechanics for Mountains Regions. EUROCK'02, 2002
- [8] Cravero M., Iabichino G. *Geomechanical study for the exploitation of an underground marble quarry*, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, No 01; 34:58, 1997
- [9] Devos A., Fronteau G., Lejeune O., Sosson Ch. Chopin E., Barbin V., *Influence of geomorphological constraints and exploitation techniques on stone quarry spatial organization*, Example of Lutetian underground quarries in Rheims, Laon and Soissons areas. Engineering Geology 115, 268–275, 2010
- [10] Esterhuizen G.S., Iannacchione A.T., *Effect of the dip and excavation orientation on roof stability on moderately dipping stone mine workings*, 40<sup>th</sup> US Rock Mechanics Symposium. Rock Mechanics for Energy, Mineral and Infrastructure Development in the Northern Regions. Anchorage, Alaska, USA, 2005
- [11] Esterhuizen E., Dolinar D., Ellenberger J., *Roof Span Design for Underground Stone Mines*. Hard Rock Mining Issue, 29 th Conference on Ground Control in Mining, 2010
- [12] Fornaro M., Lovera E., *Geological-Technical and Geo-Engineering Aspects of Dimencional Stone Underground Quarrying*, Hack R., Azzam R., Charlier R. (Eds.) - Engineering Geology for Infrastructure Planning in Europe. Lecture Notes in Earth Sciences No. 104. Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2004
- [13] Guzik K., Smakowski T., *Kamienie budowlane i drogowe*, Bilans gospodarki surowcami mineralnymi Polski i świata 2012 (red. Smakowski T., Ney R., Galos K.), Wyd. PIG-PIB Warszawa, 2014
- [14] Lopes L., *The geology as an indispensable tool for optimizing the exploration of dimension stone*, Processing of the MERSEM'2012 8th International Marble and Natural Stone Congress. Afyonkarahisar – Turkey, 2012
- [15] Peila D., Pelizza S. & Guardini C., *Underground exploitation of a granite mine by large voids: stability aspects*, Underground Space – the 4th Dimension of Metropolises. 33 th ITA-AITES World Tunnel Congress. Londyn, 651-659, 2007
- [16] Pelizza S., Oreste P.P., Peila D., Oggeri C., *Stability analysis of a large cavern for quarrying exploitation of a pink marble in Italy*. Tunnelling and Underground Space Technology, 15, nr 4, 421-435, 2000
- [17] Smith M.R. (Ed.), *Stone: Building Stone, Rock Fill and Armourstone in Construction*. Geological Society Engineering Geology Special Publication No. 16, London, 1999
- [18] West, Ian M., *The Isle of Portland, Dorset - Geology of the Quarries*. Geology of the Wessex Coast of Southern England, <http://www.southampton.ac.uk/~inw/Portland-Quarries.htm>, 2014



Arboretum w Wojsławicach

fot. z archiwum Arboretum