

Received February 11, 2014; reviewed; accepted March 21, 2014

*kamienie bloczne, metody eksploatacji,
eksploatacja podziemna*

Krzysztof GALOS, Katarzyna GUZIK¹
Alicja KOT-NIEWIADOMSKA, Ewa LEWICKA¹
Andrzej STACHOWIAK²

EKSPLOATACJA PODZIEMNA KAMIENI BLOCZNYCH W EUROPIE

Podziemna eksploatacja kamieni blocznych jest rozpowszechniona w wielu krajach europejskich. Jej popularność będzie niewątpliwie rosła, przede wszystkim w związku z uwarunkowaniami środowiskowymi, przestrzennymi i ekonomicznymi. Najczęstszą przyczyną uruchamiania eksploatacji podziemnej skał blocznych jest rosnące zapotrzebowanie na materiały kamienne, których wydobycie metodą odkrywkową jest ograniczone. Istotnym aspektem tej eksploatacji musi być gwarantowana długoterminowa stabilność geomechaniczna górotworu. Eksploatacja podziemna umożliwia pozyskiwanie tylko wybranych partii złoża, bez konieczności usuwania nadkładu, przy minimalnym wpływie na powierzchnię terenu oraz niższych kosztach rekultywacji w porównaniu do eksploatacji odkrywkowej. Obecnie dotyczy ona niemal wyłącznie skał osadowych (głównie wapienie i piaskowce) oraz niektórych metamorficznych (głównie marmury). Najbardziej znane przykłady występują we Włoszech, także w Wielkiej Brytanii, Belgii, Portugalii, Słowenii, Chorwacji i Grecji. Najczęstszym stosowanym systemem jest komorowo-filarowy. Uzysk bloków jest zwykle wyższy niż w przypadku eksploatacji odkrywkowej, rzadko poniżej 60%. W Europie środkowej i wschodniej (w tym w Polsce) metoda podziemnej eksploatacji kamieni blocznych nie była do tej pory stosowana.

1. WSTĘP

Skały bloczne pozyskiwane są z reguły w wyrobiskach odkrywkowych. W określonych przypadkach istnieją jednak przesłanki przemawiające za uruchomieniem ich eksploatacji podziemnej. Należą do nich przede wszystkim uwarunkowania środowi-

¹ Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków, kgalos@min-pan.krakow.pl
guzik@min-pan.krakow.pl a.kot-niewiadomska@min-pan.krakow.pl lewicka@min-pan.krakow.pl

² PIG-PIB, Oddział Dolnośląski, Wrocław, andrzej.stachowiak@pgi.gov.pl

skowe, np. ochrona krajobrazu oraz kwestia dostępności terenu pod odkrywkową eksploatację złóż. Istotne znaczenie mają także czynniki techniczno-ekonomiczne, takie jak wysokie koszty zdejmowania i składowania nadkładu oraz rekultywacji, znaczna głębokość wyrobisk odkrywkowych, niestabilność skarp i sezonowość produkcji (Del Greco i in. 1999, Kortnik 2009). Uwarunkowania te powodują, że liczba podziemnych kopalń kamieni blocznych rośnie, w szczególności w Europie. Pierwsze podziemne kamieniołomy istniały w Egipcie już około 3000 lat temu, a na greckiej wyspie Paros około 2500 lat temu. Liczne wyrobiska świadczące o prowadzeniu tego rodzaju wydobywania już w średniowieczu, znane są m.in. z Grecji, Chorwacji, Włoch, Francji i Wielkiej Brytanii. Prawdopodobną przyczyną ich powstawania były trudności techniczne w usuwaniu i przemieszczaniu znacznej masy nadkładu nad kamieniem blocznym. Na większą skalę metoda ta zaczęła być stosowana w Europie dopiero w ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat (Coli i in. 2003). Związane było to z rosnącym zapotrzebowaniem na materiały kamienne ze strony budownictwa i renowacji zabytków. Coraz częstsze uruchamianie wyrobisk podziemnych było możliwe dzięki rozwojowi nowych technologii urabiania skał, głównie metod mechanicznych: odpajanie diamentową piłą linową, wrębniarek łańcuchowych oraz cięcia wysokociśnieniową strugą wody. Eksploatacja podziemna w chwili obecnej dotyczy niemal wyłącznie skał osadowych i niektórych metamorficznych, a zdecydowanie rzadziej skał magmowych. Wynika to zarówno z braku uzasadnionej ekonomicznie techniki urabiania tych skał metodami mechanicznymi (rozważane jest użycie wysokociśnieniowej strugi wody w połączeniu z diamentową piłą linową), jak też z faktu większej dostępności bloków w kopalniach odkrywkowych w licznych krajach świata.

2. PODSTAWOWE ZALETY I WADY PODZIEMNEJ EKSPLOATACJI KAMIENI BLOCZNYCH

Ważną zaletą metody podziemnej jest minimalny jej wpływ na krajobraz, gdyż na powierzchni terenu widoczne są tylko wyrobiska udostępniające, np. sztolnie. Umożliwia ona równoczesne zagospodarowanie powierzchni terenu nad złożem w inny sposób, czego przykładem są pola krykietowe nad kopalnią górnourajskich wapieni na angielskiej wyspie Portland. W niektórych przypadkach dopuszczalne jest uruchomienie podziemnej eksploatacji na obszarach chronionych. Dodatkową zaletą jest możliwość całorocznego wydobywania, niezależnie od warunków pogodowych, co ma szczególne znaczenie w przypadku kopalń położonych na terenach górskich. Podziemna eksploatacja wybranych partii złóż, o najkorzystniejszych parametrach jakościowych, pozwala na wyższy przeciętny uzysk bloków niż w warunkach eksploatacji odkrywkowej. Należy też zauważyć, że w głębiej położonych częściach złóż wielokrotnie stwierdzany jest wzrost możliwości pozyskania bloków związany z grubszym uławiczeniem skał. Jednocześnie emisja hałasu i pyłów jest tu nieporównanie mniejsza.

Komory poeksploatacyjne mogą być wykorzystywane do innych celów, np. do składowania odpadów górniczych i przeróbczych, pod warunkiem zachowania stabilności stropu (Fornaro, Lovera 2004, Oggeri 2000).

Z drugiej strony za podjęciem wydobywania podziemnego muszą przemawiać względy ekonomiczne oraz korzystne warunki geologiczne i geomechaniczne występowania złóż. Jednym z głównych mankamentów tej metody są z reguły wysokie koszty udostępnienia złoża, ponoszone w związku z koniecznością drażenia podziemnych korytarzy, oraz niska produktywność w pierwszej fazie eksploatacji. W późniejszym okresie parametry te zazwyczaj ulegają skokowej poprawie. Podkreślić należy również, że część zasobów złoża zostaje uwięziona w filarach ochronnych. Innym kluczowym aspektem tej eksploatacji musi być gwarantowana długoterminowa stabilność geomechaniczna wyrobisk, a w późniejszym okresie pozostawionych pustek poeksploatacyjnych. Dlatego też niezbędne jest prowadzenie odpowiednich badań z zakresu mechaniki górotworu na etapie eksploatacji, jak też przed jej uruchomieniem. Kolejnym istotnym problemem jest konieczność zapewnienia odpowiedniej wentylacji i oświetlenia wyrobisk, a także przestrzegania innych zastrzonych warunków bezpieczeństwa pracy (Fornaro, Lovera 2004, Oggeri 2000).

3. PRZYKŁADY EKSPLOATACJI PODZIEMNEJ KAMIENI BUDOWLANYCH

Rozwój podziemnej eksploatacji w krajach europejskich dotyczy przede wszystkim kamieni architektonicznych o długich tradycjach stosowania na rynku krajowym, a czasami również międzynarodowym. Najbardziej znane przykłady podziemnej eksploatacji kamieni budowlanych występują we Włoszech, głównie w Alpach i Toskanii (Cotman, Vujec 1998, Kortnik 2009). Są to m.in.: kopalnie marmuru: białego – Carrara i Lasa, różowego – Cardoglia; kopalnie różnych odmian wapieni, np.: Berica, Portoro, Cutrofiano; kopalnie zielonych ofiokalcytów w dolinie Aosty. Inne ważniejsze znane w Europie kopalnie podziemne kamieni budowlanych, to m.in.: kopalnie marmurów w Grecji (Dionyssos i Volakas) oraz w rejonie Estremoz/Villa Vicosa w Portugalii, a także kopalnie wapieni w Chorwacji, Słowenii, Wielkiej Brytanii i Belgii (tabela). Skały te wykorzystywane były do wznoszenia wielu zabytkowych budowli, m.in. Pałacu Buckingham i londyńskiej Tower (brytyjskie wapienie górnourajskie), katedry w Milanie (włoskie różowe marmury Cardoglia), a także katedr we Florencji i Sienie (włoskie białe marmury Carrara).

W mniejszym zakresie metoda podziemna stosowana jest do eksploatacji złóż piaskowców (m.in. kopalnia piaskowca Pietra Serena k. Florencji) oraz łupków (Portugalia, Hiszpania, Włochy, Wielka Brytania i Francja), a sporadycznie tylko skał magmowych i niewęglanowych skał metamorficznych (włoska kopalnia zielonego kwarcytu w dolinie Spluga w Alpach).

Tabela. Najważniejsze przykłady eksploatacji podziemnej kamieni blocznych w Europie
Table. The most important examples of dimension stone underground extraction in Europe

Kraj	Kopalnia	Region	Kopalnia	Przeznaczenie eksploatacji podziemnej	Rozpoczęcie eksploatacji
Belgia	Golzarne	SE Belgia	czarne wapienie górnoweńskie	miąższość nadkładu	1928
Chorwacja	Kanfanar II	SW Istria	żółte wapienie kredowe	ochrona terenów, miąższość nadkładu	1994
Grecja	Volakas	Góry Falakron, N Grecja	białe marmury dolomityczne	miąższość nadkładu	2007
Grecja	Dionysos	Góry Pentelikon koło Aten	biały marmur	miąższość nadkładu	1994
Portugalia	Pardais	Estremoz/Vila Viçosa, Alentejo	różnobarwne marmury	miąższość nadkładu	2004?
Słowenia	Hotavje I	Kras, centralna Słowenia	barwne odmiany wapieni górnego trąsu	miąższość nadkładu	1993
Słowenia	Lipica II	SW Słowenia	jaskrawe wapienie dolnokredowe	miąższość nadkładu	2001
Wielka Brytania	Bower	Wyspa Portland	górnijurajskie wapienie oolitowe	zasięg występowania, ochrona powierzchni	2002
Wielka Brytania	Jordans	Wyspa Portland	górnijurajskie wapienie oolitowe	zasięg występowania, ochrona powierzchni	2008
Wielka Brytania	Stoke Hills Stone	SW Anglia	beżowe środkowojurajskie wapienie oolitowe	miąższość nadkładu	ponownie od 1983
Włochy	Carlone	Alpy Apenińskie, Toskania	białe marmury dolnojurajskie Carrara	morfologia terenu	1973
Włochy	Acqua Bianca	Dolina Verosty, Tyrol Półd.	białe marmury Lasa	morfologia terenu	koniec XIX wieku
Włochy	Brento Alto	Fienzuola Toskania	trzciorzędowe szare piaskowce Pietra Serena	morfologia (złocze góry), duża miąższość nadkładu	inwestycja
Włochy	Valchiavenna	Dolina Spluga, Sondrio	zielone kwarcyty Verde Spluga	morfologia (złocze góry)	inwestycja
Włochy	Su Cuccuruiu	Orosio, NE Sardynia	beżowe wapienie jurajskie i kredowe	wątków środowiskowy miąższość nadkładu	planowana

Poniżej i w tabeli na stronie 52 zaprezentowano szczegółową charakterystykę ważniejszych podziemnych kopalń kamieni blocznych w Europie.

3.1. WAŻNIEJSZE KOPALNIE WŁOSKIE

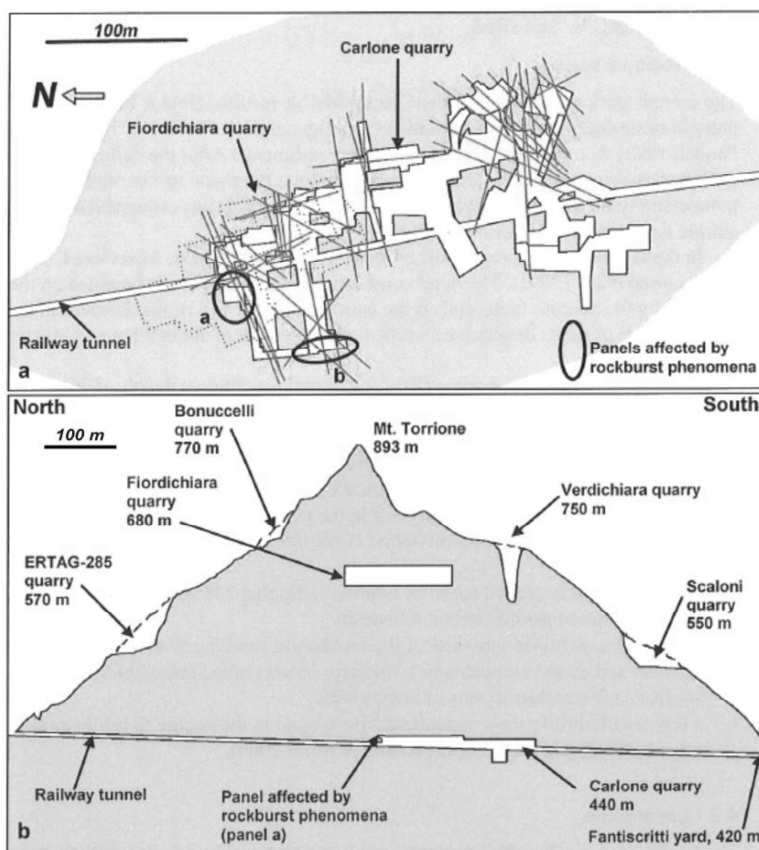
Carlone – kopalnia marmurów Carrara (Alpy Apuańskie, Toskania)

Marmury eksploatowane są w rejonie Carrary od czasów rzymskich, a być może nawet etruskich. Prowadzone przez tysiące lat wydobywanie miało bardzo duży wpływ na naturalne środowisko i krajobraz (Coli i in. 2012).

Marmury rejonu Carrary występują w obrębie dolnojurajskiego kompleksu skał metamorficznych Alp Apuańskich. W wyniku deformacji tektonicznych powstały systemy nieciągłości dzielące masyw skalny na bloki, których rozmiary i kształt determinują możliwości uruchomienia wydobywania. Kamieniołom Carlone położony jest w strefie występowania marmurów białych (Ordinario) z przewarstwieniami marmurów odmiany chmurowej Nuvalato. W obrębie masywu główne płaszczyzny podzielnosci ciosowej reprezentowane są przez dwa wzajemnie ortogonalne zespoły spękań zwane *contro* z W na E i *secondo* z N na S (rys. 1). Spękania te zgrupowane są w pasy o szerokości od kilku do kilkudziesięciu metrów. Ponadto skały pocięte są regularną siecią spękań pokładowych. Odmiany marmurów Carrara charakteryzują się korzystnymi parametrami fizyko mechanicznymi, przy średniej wytrzymałości na jednoosiowe ścisnienie około 96 MPa, wartości indeksu GSI około 85 i średniej wartości modułu Younga – 49,5 GPa.

Optymalizacja procesu wydobywania, mająca na celu ograniczenie ilości powstających odpadów oraz zwiększenie uzysku bloków, doprowadziła do uruchomienia w rejonie Carrary na przestrzeni ostatnich 30 lat około 40 kopalń podziemnych, w miejscach wcześniej prowadzonej działalności odkrywkowej. Podziemne komory eksploatacyjne mogą osiągać szerokość do 120 m, długość do 50 m i wysokość do 80 m, pod warunkiem korzystnych cech geomechanicznych i geostukturalnych masywu skalnego (Coli 2001).

Kopalnia Carlone uruchomiona została w 1973 r. w obrębie góry Torrione. Położona jest na głębokości ok. 450 m pod powierzchnią terenu, podczas gdy większość czynnych w regionie Carrary wyrobisk podziemnych znajduje się znacznie płycej, z reguły do 100 m.

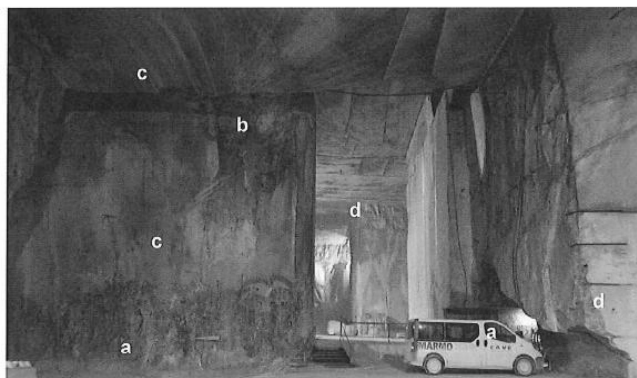


Rys. 1. Lokalizacja kopalni Carlone w obrębie góry Torrione
 a) plan wyrobisk ze śladami występujących spekań (nieregularne kreskowania),
 b) przekrój poprzeczny wzdłuż tunelu nieczynnej kolejki (Coli 2001)

Fig. 1. Location of Carlone mine in Torrione mountain:

- a) workings plan with trace of cracks (irregular hatch),
 b) cross-section along a disused rail tunnel (Coli 2001)

Kopalnię uruchomiono wykorzystując tunel nieczynnej kolejki, wydrążony pod koniec XIX wieku i wykorzystywany obecnie do transportu urobku. Wyrobiska eksploatacyjne kopalni Carlone, zlokalizowane wzdłuż osi tunelu, zajmują obszar o powierzchni ok. 5,5 ha. Wydobywanie prowadzone jest metodą komorowo-filarową, przy średniej wysokości komór ok. 15 m (rys. 2). Od lat 1980. do urabiania skał wykorzystywana jest diamentowa piła linowa i piła łańcuchowa. Komory udostępniane są w górnej części za pomocą poziomych szybików o wysokości ok. 3 m, a następnie wykonywane jest cięcie w płaszczyźnie pionowej, w celu ich pogłębienia o kolejne 12 metrów.



Rys. 2. Wielkie komory eksploatacyjne w kopalni Carlone: a) ślady drażenia tunelu starej podziemnej kolejki, b, c, d) ślady cięcia skał różnymi technikami (Coli 2001)

Fig. 2. Large extraction chambers in Carlone mine: a) traces of tunneling of old rail line, b, c, d) traces of rock cutting with use of various techniques (Coli 2001)

Acqua Bianca – kopalnia białych marmurów Lasa (Dolina Venosty, Tyrol Płd.)

Białe marmury typu Lasa ze względu na unikatowe walory dekoracyjne i wysoką białość (95–97%) należą do jednych z najważniejszych odmian marmurów pozyskiwanych w Europie. Przez wieki wykorzystywane były w budownictwie na terenie Włoch, Austrii i Niemiec. Dewońskie marmury Lasa tworzą wydłużone soczewy o szerokości dochodzącej do 6 km i miąższości do 100 m. Występują one w otoczeniu paragnejsów i łupków mikowych, należących do alpejskiego masywu Ortles-Cevedale.



Rys. 3. Eksploatacja tzw. marmurów „użyłonych” z czarnymi smugami związanymi z obecnością domieszek grafitu w kopalni Acqua Bianca (www.eacd.cc)
Fig. 3. Extraction of so-called „vein” marble with black streaks related to presence of graphite in Acqua Bianca mine (www.eacd.cc)

Marmury Lasa eksploatowane w kopalni Acqua Bianca udokumentowane zostały w obrębie soczewki o miąższości ok. 40 m. W jej dolnej części występują marmury barwy białej, przechodzące ku górze w marmury użylone Fantastico (rys. 3). Lokalnie wzdłuż występujących zespołów spękań rozwinięte są zjawiska krasowe. Odmiany marmurów Lasa wykazują wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie około 89 MPa, średnią wartość modułu Younga 68 GPa oraz wskaźnik stopnia spękania górotworu RQD od 74 do 92 (Coli i in. 2003).

Kopalnia Acqua Bianca położona jest na wysokości 1526 m n.p.m. w Parku Narodowym Stelvio. W związku z niewielkimi zasobami dostępnymi do eksploatacji odkrywkowej oraz trudnymi warunkami prowadzonej działalności na stromym górskim zboczu przy krótkim sezonie wydobywczym, podziemna eksploatacja marmurów została tu zapoczątkowana pod koniec XIX wieku. W wyniku wieloletniego wydobycia powstał system sztolni, chodników oraz niekiedy ogromnych komór (do 40 m wysokości, 100 m długości i 30 m szerokości). Eksploatacja prowadzona w bardzo zróżnicowanym pod względem litologicznym kompleksie skalnym skutkowałą nierównomiernym rozmieszczeniem wyrobisk. W kopalni stosowany jest komorowo-filarowy system eksploatacji. Skała odpajana jest przy użyciu wrębiarki łańcuchowej, w połączeniu z diamentową piłą linową (rys. 4). W zależności od parametrów jakościowych skał stropowych pozostawiona jest warstwa marmurów (półka bezpieczeństwa) o miąższości co najmniej 5 metrów. Dotychczas w kopalni nie było istotnych opadów skał ani zawałów stropu. Lokalnie stosowane jest wzmocnienie skał przy użyciu kotew i metalowej siatki. Miąższość odspojonych ław skalnych wynosi od 8 do 10 m. Szerokość i wysokość komór są ograniczone obecnie do maksymalnych rozmiarów rzędu 20 m, a rozkład długich komór przedzielonych filarami jest obecnie nieco bardziej regularny. Do transportu bloków do doliny od 1928 r. wykorzystywana jest kolejka linowa.



Rys. 4. Cięcie marmurów za pomocą wrębiarki łańcuchowej i diamentowej piły linowej w kopalni Acqua Bianca (www.angusboulton.net, www.sagen.at)

Fig. 4. Marble cutting with use of chain cutter and diamond rope saw in Acqua Bianca mine (www.angusboulton.net, www.sagen.at)

Brento Alto – kopalnia piaskowców Pietra Serena (Toskania, Włochy)

Piaskowce znane pod nazwą Pietra Serena są cenionym materiałem kamiennym, o długich tradycjach stosowania w budownictwie, sięgających czasów etruskich (IV wiek p.n.e.). Ich kopalnie były i położone są w Toskanii, na północ od Florencji. Znaczenie historyczne mają podziemne wyrobiska w rejonie wzgórz otaczających miasteczko Fiesole. Piaskowiec pozyskiwany w Fiesole zyskał dużą popularność jako materiał budowlany i rzeźbiarski w epoce renesansu. Z jego użyciem wybudowano m.in. wiele historycznych pałaców we Florencji (Coli i in. 2003). Obecnie szare piaskowce Pietra Serena pozyskiwane są niemal wyłącznie w oddalonej o kilkadziesiąt kilometrów na NE miejscowości Firenzuola (rys. 5). Wydobywanie prowadzone jest głównie w wyrobiskach odkrywkowych. Podziemna eksploatacja uruchomiona została przez firmę Calamini w kopalni Brento Alto.



Rys. 5. Kopalnia piaskowca Brento Alto – wyrobisko odkrywkowe oraz korytarze udostępniające część podziemną – po lewej stronie u dołu (www.calamini.it)

Fig. 5. Brento Alto sandstone mine – open-pit and underground providing passages – bottom left (www.calamini.it)

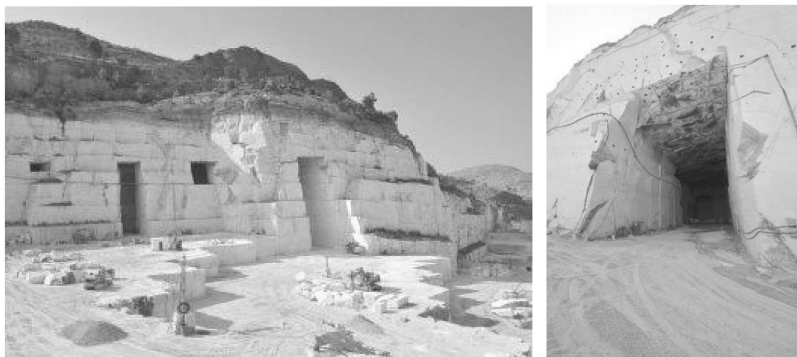
W rejonie Firenzuoli przedmiotem eksploatacji są miocénские piaskowce wchodzące w skład formacji Marnoso Arenacea. Łączna miąższość naprzemianległych warstw piaskowców z przewarstwieniami margli i mułowców oceniana jest na około 60 m (Fornaro, Lovera 2004), jednak zaledwie 10–15% tej wielkości stanowią piaskowce o grubszym uławiceniu (maksymalnie 5 m) i wysokiej wartości użytkowej. Wykazują one wytrzymałość na ściskanie rzędu 100 MPa, w klasyfikacji RMR uzyskały 70–80 punktów, a w klasyfikacji GSI 65–75%.

Główną przyczyną uruchamiania podziemnego wydobywania piaskowców Pietra Serena w kopalni Brento Alto są względy ekonomiczne i środowiskowe związane

z koniecznością usuwania znacznej miąższości cienkoławicowych piaskowców przewarstwionych skałami ilastymi, zalegających w nadkładzie piaskowców gruboławicowych. Kopalnia w części podziemnej eksploatuje profil warstw o miąższości około 10 m., z zachowaniem półki stropowej o miąższości ponad 2 m. W kopalni stosowany jest system eksploatacji komorowo-filarowy. Do urabiania skał wykorzystywana jest wrębiarka łańcuchowa (cięcie w pionie i w poziomie) w połączeniu z diamentową piłą linową (cięcie z tyłu).

3.2. GRECJA – KOPALNIA BIAŁYCH MARMURÓW DIONYSSOS (GÓRY PENTELIKON)

Białe marmury z rejonu Dionyssos w Górach Pentelikon koło Aten są jednymi z najbardziej znanych marmurów greckich. Historia ich eksploatacji w tym obszarze sięga 2500 lat. Łączna grubość triasowo-jurajskiej formacji Kesarini (wraz z łupkami metamorficznymi) należącej do tzw. serii północno-attyckiej, przekracza 800 m. Złóża marmurów udokumentowane zostały w spągowej jej części (Exadaktylos i in. 2007). Eksploatacja podziemna prowadzona jest w kopalni Dionyssos od 1994 roku (rys. 6). Główną przyczyną jej podjęcia były zarówno czynniki ekonomiczne i środowiskowe, jak też formalnoprawne. Coraz większy problem stanowiło bowiem usuwanie, a zwłaszcza składowanie nadkładu.



Rys. 6. Eksploatacja podziemna w kopalni Dionyssos (www.dionyssosmarble.gr)

Fig. 6. Underground extraction in Dionyssos mine (www.dionyssosmarble.gr)

Eksploatacja prowadzona jest metodą komorowo-filarową przy łącznym użyciu piły łańcuchowej i liny diamentowej. Rozmiary pozostawionych filarów wynoszą zwykle 15×15 m, natomiast wysokość komór sięga od 3 m na wyższych poziomach eksploatacji, do 5–6 m na niższych (Exadaktylos i in. 2007).

3.3. SŁOWENIA – KOPALNIA BARWNYCH WAPIENI HOTAVLJE I (GÓRA BLEGOS)



Rys. 7. Kopalnia wapieni Hotavlje I – korytarz udostępniający część podziemną oraz wyrobiska podziemne (www.marmor-hotavlje.si, www.fg.uni-mb.si)

Fig. 7. Hotavlje I limestone mine – underground providing passage and underground workings (www.marmor-hotavlje.si, www.fg.uni-mb.si)

Górnotriasowe wapienie były eksploatowane odkrywkowo od 1721 r. w miejscowości Hotavlje, u podnóża góry Blegoš na terenie subalpejskiego krasu środkowej Słowenii. Głównym powodem podjęcia eksploatacji podziemnej w 1993 r. był wzrost miąższości nadkładu i konieczność jego zagospodarowania. Za podjęciem podziemnego wydobywania przemawiały korzystne parametry geomechaniczne górotworu oraz wysokie zapotrzebowanie budownictwa na wapien o dużych walorach dekoracyjnych. Pozyskiwane są tu obecnie liczne odmiany barwne wapieni: szare, czerwone, różowe, niekiedy prawie czarne, z białymi żyłkami kalcytu, a także szczątkami glonów i koralii. Metoda podziemna umożliwiła na selektywne wydobycie najcenniejszych odmian kamienia, ograniczenie negatywnego oddziaływania na środowisko (mniejsza ilość odpadów, hałas) oraz wyeliminowanie sezonowości eksploatacji. Skutkuje to wyższą efektywnością ekonomiczną prowadzonej działalności niż w przypadku zastosowania metody odkrywkowej.

W masywie skalnym, wyróżnia się dwa główne systemy spękań ciosowych oraz pojedyncze szczeliny. Ocenę geomechaniczną górotworu przeprowadzono na podstawie klasyfikacji RMR. Złoże zaliczono do klasy II (skała dobra). Odmiany wapieni Hotavlje wykazują zmienną wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie 15–93 MPa oraz moduł Younga 21–60 GPa.

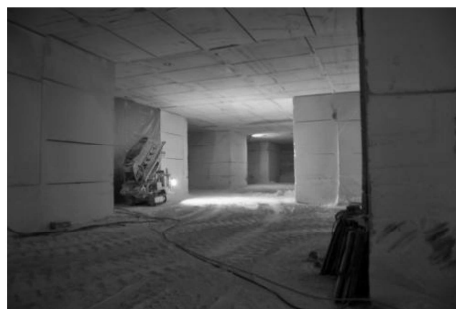
Udostępnienie złoża wykonano trzema chodnikami o szerokości 8 m, wysokości 4 m i długości maksymalnie 45 m, które połączono wyrobiskami poprzecznymi. Wydobywanie prowadzone jest zmodyfikowaną metodą komorowo-filarową (rys. 7), z nieregularnie rozmieszczonymi filarami bezpieczeństwa. Skała odpajana jest wrębiarką łańcuchową, w połączeniu z diamentową piłą linową. Maksymalna szerokość komór eksploatacyjnych nie przekracza 12 m, a wysokość 24 m. W zachodniej części kopalni, gdzie stwierdzono większe zagęszczenie spękań i niekorzystne ich zapadanie, maksymalna obliczona szerokość komór wyniosła 8 m, a ich wysokość – 16 m. Szeroko-

kość filarów w górnej części wynosi min. 4,5 m, ale będzie rosła z głębokością. Obecnie eksploatacja prowadzona jest na głębokości 35–40 m pod powierzchnią terenu (Bizjak 2003).

3.4. CHORWACJA – KOPALNIA ŻÓŁTYCH WAPIENI KANFANAR (ISTRIA)

Kamieniołom Kanfanar jest jednym z kilku kopalń warstwowych żółtych wapieni wieku kredowego na półwyspie Istria o długich tradycjach eksploatacji. Roczna produkcja kopalni Kanfanar sięga 20 tys. m³. Do 1994 r. eksploatacja prowadzona była metodą odkrywkową. Powodem rozpoczęcia eksploatacji podziemnej stały się przede wszystkim czynniki środowiskowe i techniczno-ekonomiczne. Pierwsze z nich związane były z pokryciem powierzchni złoża przez cenne przyrodniczo tereny zielone, drugie natomiast wynikają z geologiczno-górnictwowych warunków zalegania złoża, tu miąższości nadkładu.

Eksploatacja podziemna wyklucza konieczność usunięcia nadkładu, tym samym obniżając koszty produkcji bloków. Jednocześnie kopalnia pozbawiona została problemu składowania i przeróbki znacznej masy materiałów odpadowych. Przedmiotem eksploatacji jest seria skalna o grubości około 6,8 m (rys. 8). Miąższość poszczególnych warstw wynosi od 80 do 180 cm i zapadają one pod niewielkim kątem (do 4°) na wschód. Eksploatacja prowadzona jest w dwóch poziomach; pierwszym o miąższości 4,2 m i drugim – 2,65 m.



Rys. 8. Kopalnia wapieni Kanfanar – korytarze udostępniające część podziemną oraz wyrobiska podziemne (www.kamen-pazin.hr)

Fig. 8. Kanfanar limestone mine – underground providing passages and underground workings (www.kamen-pazin.hr)

Odmiany wapieni Kanfanar wykazują wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie 85–92 MPa oraz moduł Younga 14–15 GPa (Cotman, Vujec 1998). Wydobywanie jest metodą komorowo-filarową. Skala odspajana jest przy użyciu wrębiarki łańcuchowej, w połączeniu z diamentową piłą linową.

3.5. WIELKA BRYTANIA – KOPALNIA WAPIENI JORDANS (WYSPA PORTLAND)

Górnijurajskie wapienie oolityczne na wyspie Portland położonej w hrabstwie Dorset, u południowego wybrzeża Anglii, są cennym materiałem kamiennym, wykorzystanym m.in. przy budowie katedry Westminster i londyńskiego Tower. Obecnie wyspa Portland jest częścią tzw. Wybrzeża Jurajskiego, wpisanego na listę światowego dziedzictwa UNESCO. Eksploatacja prowadzona jest w obrębie warstw Base Bed i wyżejległej warstwy Whit Bed, należących do formacji Portland Stone. Każda z tych warstw ma miąższość ok. 2–3 m. Wapienie zalegają niemal poziomo lub zapadają pod niewielkim kątem, a stopień scementowania skały jest wystarczająco duży, aby zachować odporność na niszczące działanie warunków atmosferycznych, ale i na tyle niski, że ułatwia cięcie i obróbkę kamieniarską (West 2013).

Eksploatacja podziemna prowadzona jest w kopalniach Bowers i Jordans. Łączna miąższość, będących przedmiotem eksploatacji warstw wapieni, wynosi około 10 m. Podziemna kopalnia Jordans powstała w 2008 r. przy południowej granicy kopalni odkrywkowej Inmosthay (rys. 9), w centrum północnej części wyspy Portland.



Rys. 9. Kopalnia wapieni Jordans – korytarze udostępniające część podziemną oraz wyrobiska podziemne z maszynami do odstawy bloków (źródło: Albion Stone plc)

Fig. 9. Jordans limestone mine – underground providing passages and underground workings with machines for blocks transportation (Albion Stone plc)

Większość zasobów południowej części kopalni leży poniżej terenu miejscowego klubu krykietowego. Wydobywanie wapieni, przy braku możliwości rozwoju eksploatacji odkrywkowej ze względu na zagospodarowanie powierzchni, ogranicza jednocześnie emisję pyłów i hałasu. Podziemne poziome wyrobiska stanowią regularną sieć komór i filarów o rozmiarach około 6×6 m. Dobry, naturalny strop wyrobisk tworzy warstwa wapieni Basal Purbeck Cap. Dodatkowo strop jest kotwiony długimi kotwami w żywicy epoksydowej. Eksploatacja prowadzona jest z użyciem pił łańcuchowych.

wych, a następnie klinowania z użyciem cienkich stalowych, rozszerzanych hydraulicznie poduszek (Hydro-bags) o powierzchni 1 m².

4. PODSUMOWANIE

Podziemna eksploatacja należy do coraz częściej stosowanych metod wydobywania skał blocznych. Rozpowszechniona jest ona w szczególności w wysoko rozwiniętych krajach Europy. Dotyczy głównie niektórych metamorficznych skał węglanowych (np. marmury) oraz skał osadowych (np. wapienie, piaskowce, łupki). O wyborze tej metody decydują obecnie przede wszystkim względy ekonomiczne i środowiskowe. Najważniejsze korzyści wynikające z eksploatacji podziemnej to przede wszystkim: nieznaczny wpływ na powierzchnię terenu nad złożem związany m.in. z brakiem konieczności przemieszczania znacznych ilości nadkładów, ograniczenie potrzeby składowania powstających odpadów oraz obniżenie związanych z tym kosztów. Istotne znaczenie mają również niższe koszty rekultywacji niż w przypadku metody odkrywkowej. Możliwość prowadzenia eksploatacji wybranych partii złóż o najkorzystniejszych parametrach jakościowych pozwala na większy uzysk bloków (w stosunku do łącznej wielkości wydobywania). Metoda ta preferowana jest ze względów środowiskowych, stąd też może być ona stosowana po spełnieniu odpowiednich warunków, również na obszarach chronionych.

Zaprezentowane przykłady podziemnej eksploatacji w krajach europejskich pozwalają wnioskować, że najczęstszą przyczyną jej uruchomienia była znaczna miąższość nadkładu. Sytuacja taka ma miejsce m.in. w złożach greckich marmurów Dionysos, słoweńskich wapieni w rejonie Hotavlje, chorwackich wapieni w Kanfanar, włoskich piaskowców Pietra Serena we Florencji. Względami środowiskowymi odegrały z kolei zasadniczą rolę w przypadku wapieni na brytyjskiej wyspie Portland. Wyrobiska podziemne powstały w miejscu prowadzonej wcześniej eksploatacji odkrywkowej lub jeszcze przed jej zakończeniem. Równoczesne stosowanie obydwu metod ma obecnie miejsce w greckim złożu marmurów Dionysos i chorwackim złożu Kanfanar.

W celu zastosowania podziemnej eksploatacji niezbędne jest wcześniejsze dokładne rozpoznanie masywu skalnego pod względem geomechanicznym (identyfikacja występujących odmian skał, stref spękań, ocena stanu naprężeń panujących w górotworze). Korzystne parametry geomechaniczne masywów skalnych, w obrębie których położone są kopalnie, umożliwiły zastosowanie komorowo-filarowego systemu eksploatacji. Największe rozmiary komór eksploatacyjnych (szerokość do 120 m, długość do 50 m i wysokość do 80 m) notowane są w przypadku marmurów Carrary w Alpach Apuańskich, charakteryzujących się niewielkim stopniem spękania i znaczną miąższością ławic.

Głównym mankamentem stosowanej metody są z reguły wysokie koszty udostępnienia złoża oraz konieczność monitorowania stabilności powstających w trakcie jego

eksploatacji pustek skalnych. Podziemna eksploatacja wymusza także potrzebę zapewnienia właściwej wentylacji i oświetlenia wyrobisk oraz przestrzegania innych wymogów bezpieczeństwa.

Podziemna eksploatacja skał blocznych nie była w Polsce dotychczas prowadzona. Perspektywy rozwoju eksploatacji tą metodą wiązać można z występowaniem m.in. marmurów, serpentynitów, piaskowców i sjenitów na Dolnym Śląsku oraz wapieni (marmurów technicznych) w rejonie Krakowa i Kielc.

LITERATURA

- BIZJAK K., 2003, *Stability analysis of underground openings form extraction of nature stone*, Geologija 46, 1, Ljubljana.
- COLI M., 2001, *Underground exploitation of the Carrara marble* [w:] *Modern Tunneling Science and Technology*, Adachi et al. Eds.
- COLI M., LIVI E., BALDI M., 2012, *Studies for rockburst prediction in the Carrara Marble – II: geostructural/geomechanical rivisitation and 2D FEM modeling of a large underground quarry*, ISMR International Symposium – Eurorock, Stockholm, Sweden.
- COLI M., LIVI E., TANINI C., 2003, *Historical and cultural recovery of the Pietra Serena Quarrying in Fiesole (Firenze – Italy)*, Atti 4th Europ. Congr. On Reg. Cartography and Inf. System, Bologna.
- COTMAN I., VUJEC S., 1998, *Planiranje i pocetna iskustva podzemnog otkopavanja arhitektonsko-gradevnogo kamena u Istri*, Rudarsko-geolosko-naftni zbornik, 10, Zagreb.
- CRAVERO M., IABICHINO G., 1997, *Geomechanical study for the exploitation of an underground marble quarry*, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 34, 3–4.
- DEL GRECO O., FORNARO M., OGGIERI C., 1999, *Underground dimension stone quarrying: rock mass structure and stability*, ISMST Int. Symp. on Mining Sciences and Technology, Beijing.
- EXADAKTYLOS G., TSOUVALA S., LIOLIOS P., BARAKOS G., 2007, *A three-dimensional model of an underground excavation and comparison with in situ measurements*, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 31, 411–433.
- FORNARO M., LOVERA E., 2004, *Geological-Technical and Geo-Engineering Aspects of Dimencional Stone Underground Quarrying*, [w:] 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.
- KORTNIK J., 2009, *Underground natural stone excavation technics in Slovenia*, RMZ – Materials and Geoenvironment, 56, 2.
- OGGIERI C., 2000, *Design methods and monitoring in ornamental stone underground quarrying*, Proc. of Int. Conf. GEOENG, Melbourne.
- WEST I., 2013, *The Isle of Portland: Geology of the Quarries. Part of the Geology of the Wessex Coast (Jurassic Coast – Dorset and East Devon UNESCO World Heritage Site)*, *Geological field description*, <http://www.southampton.ac.uk/~imw/Portland-Quarries.htm>

UNDERGROUND EXTRACTION OF DIMENSION STONE IN EUROPE

Underground extraction of dimension stone is widespread in many European countries. Its popularity will undoubtedly grow, mainly due to environmental considerations and the accessibility of deposits for extraction. The most common reason for launch of underground dimension stone mining is demand for some stone materials which commonly can not be obtained from opencast mining. An important aspect of such operation is guaranteed long-term geomechanical stability of post-mining voids. This method allows to extract only selected parts of the deposit, without necessity of overburden removal, reduced impact on surface and lower costs of reclamation as compared to open pit mining. Currently, underground mining relates almost entirely of sedimentary rocks (mainly limestone) and some metamorphic rocks (e.g. marble). The best-known examples of underground exploitation of building stones are found in Italy, but also in the UK, Belgium, Portugal, Slovenia, Croatia and Greece. The room-and-pillar system is the most common operating system of extraction. It is important to have the opportunity for selective mining of parts of deposit showing the best quality parameters, which allows for higher yield of the blocks, which is rarely less than 60%. In the Central and Eastern Europe (also in Poland), underground method of dimension stone extraction until now was not used.