

Underground “Green” Mining of Dimension Stone – Limestone in Slovenia

In total eleven dimension stone – limestone quarries in Slovenia, underground mining is carried out today in five quarries, Hotavlje I quarry, Lipica I quarry, Lipica II quarry, Doline quarry, and Debela griža quarry. In all five quarries the reason was primarily the geological structure of the site, the quarry's condition, the potentially large amounts of the overburden in the event of an expansion of the surface part of the quarry, and the increasing needs for this raw material, i.e., natural/dimension stone. The Management of the companies with a transition to underground extraction of dimension stone meets the highest environmental standards,

greater competitiveness of their dimension stone on the market, and provides environmentally-friendly mining or so-called green mining. The underground extraction of dimension stone blocks is done using a modified room-and-pillar excavation method that is adjusted to each site's geological and geomechanical characteristics, with regularly or irregularly distributed high safety pillars. In this article will be shown in more detail the current state in the quarries with technical parameters of underground dimension stone extraction and the results of the geotechnical monitoring by measuring the stress state of the high safety stone pillars.

Abbau von Kalksteinblöcken in Slowenien: Durchführung und Vorteile einer untertägigen Gewinnung von Natursteinen

Heute sind in Slowenien insgesamt elf Bergwerke in Betrieb, in denen Kalk blockweise als Natur- bzw. Werkstein abgebaut wird. In fünf dieser Werke, nämlich Hotavlje I, Lipica I, Lipica II, Doline und Debela Griža, findet der Abbau unter Tage statt. Neben der hohen Nachfrage nach Kalksteinen war der Übergang in einen untertägigen Abbau nach vorangegangenem Tagebau auch durch die entsprechend großen Reserven und die mächtigen Deckgebirgsschichten, die es bei weiterer Gewinnung im Tagebau zu entfernen gegolten hätte, motiviert. „Green Mining“, eine verbreitete Bezeichnung für umweltschonenden Bergbau, spielt

hierbei eine große Rolle. Der untertägige Abbau findet im Örtterbau statt, wobei die genaue Ausrichtung mit regelmäßigen oder unregelmäßigen Pfeilern speziell an die lokalen geologischen und geotechnischen Gegebenheiten angepasst wird. Der vorliegende Artikel behandelt die Situation dieser Abbaubetriebe und führt die relevanten technischen Daten zum untertägigen Abbau der Natursteinblöcke auf. Weiterhin werden die Ergebnisse des geotechnischen Monitoring-Programms zur Überwachung der Sicherheitspfeiler vorgestellt.

1 Introduction

Slovenia is a land of sedimentary rocks, they form the predominantly part of the land's surface (Figure 1, coloured bright grey). Mountainous and hilly areas are mostly built from limestone and dolomite. The oldest are colourful limestone from the Hotavlje I quarry. They were formed in the shallow sea in the Triassic, about 225 million years ago. Younger, about 93 million years old of Repen limestone are from the surroundings of Sežana, from the Doline and Debela griža quarries. Because of the fossil shells caught in the rock, this is one of the most beautiful natural stones in southwestern Slovenia. It is also more resistant to weathering than other types of karstic natural stones, because of the dense (micritic) base. The “fiorito” or “rosy limestone” and “unito” or “unity limestone” come from the quarry Lipica I and Lipica II. It was named after the flower-like cross-sections of fossil rudist bivalve molluscs, which inhabited the Tetida ocean

1 Einleitung

Slowenien ist größtenteils von Sedimentgesteinen bedeckt (Bild 1, grau dargestellt). In den bergigen und hügeligen Landesteilen finden sich bedeutende Formationen aus Kalkstein und Dolomit. Die ältesten (oberflächennahen) Sedimentite sind sehr farbenprächtige Kalksteine, die im Betrieb Hotavlje I gewonnen werden. Sie entstanden im Flachmeer der Trias vor etwa 225 Mio. Jahren. Der Repen-Kalkstein, der in der Region um Sežana in den Betrieben Doline und Debela Griža gewonnen wird, ist mit 93 Mio. Jahren dagegen deutlich jünger. Dieser zählt dank der eingeschlossenen Muschelschalen zu den schönsten Natursteinen im südwestlichen Slowenien. Außerdem zeigte sich der Repen als wesentlich witterungsbeständiger als andere Karstgesteine, was auf die feine Matrix (Mikrit) zurückzuführen ist. Andere Variationen des Kalksteins (Lipica Fiorito und Lipica Unito) werden aus den Werken Lipica I und II geliefert. Diese wurden nach den im

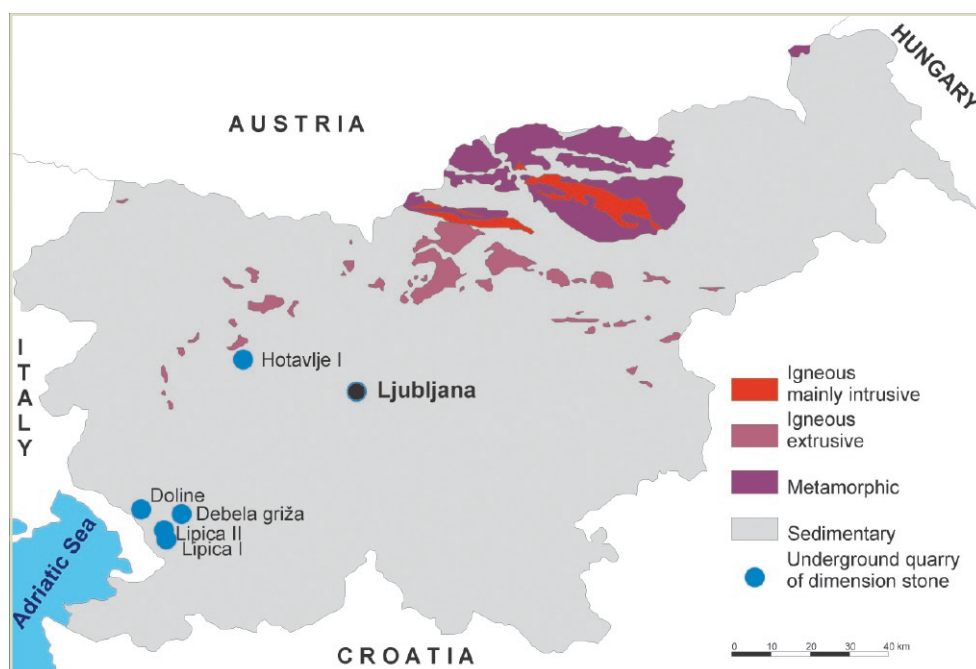


Fig. 1. Simplified geological map of Slovenia with exposed sites of underground dimension stone – limestone quarries.

Bild 1. Geologische Karte (vereinfacht) von Slowenien mit untertägigen Kalksteinwerken.

in Cretaceous, more than 80 million years ago. Both limestones are distinguishing only because of the size of the rudist fossils (5). Currently, eleven dimension stone – limestone quarries are operating (3).

Igneous rocks, which were formed from the magma under the surface, called intrusive igneous rocks (Figure 1, coloured red), are only found on Pohorje mountains and in a narrow belt in Karavanke mountains in Carinthia. The most known intrusive rocks are tonalite, which build the belt in the Karavanke Mountains, and granodiorite on the Pohorje Mountains. Extrusive igneous rocks (Figure 1, coloured brown), those that were formed after the magma broke through to the surface, can be found on smaller areas in Jezersko, between Jezersko and Škofja Loka, near Idrija, in Selška dolina and the Bohor Mountains. The majority of extrusive rocks lies south of the Karavanke Mountains, on the Smrekovec Mountain and its wider surroundings. The most often used extrusive rock is actually a sandstone formed from the volcanic ash, called tuff (6). Currently, two dimension stone – tonalite and granodiorite quarries are operating (3).

Metamorphic rocks (Figure 1, coloured pink) were formed by the transformation of igneous or sedimentary (or even older metamorphic) rocks under the influence of high temperature and pressure. Transformed rocks are found in areas surrounding igneous rocks on the Pohorje Mountains, the Kozjak Mountain and surroundings, and along the igneous rocks in the Karavanke Mountains. The most known metamorphic rocks in Slovenia are marble and slate (6). Currently, thirteen dimension stone – tonalite (granodiorite) quarries are operating (3).

The total annually production for dimension stone quarries – limestone in Slovenia (Figure 2), before introducing underground mining, was less than 40,000 t (approximately 15,000 m³). After the introduction of underground mining, the production of dimension stone – limestone with fluctuations was constantly increasing up to 70,000 t in 2009, in 2005 even up to 100,000 t. Due to the crisis in the Slovenian construction sector in 2009, there was a marked decline in production until 2012 (21,000 t). Af-

Anschnitt blumenförmig erscheinenden Mollusken benannt, die in der Tethys zur Kreidezeit vor über 80 Mio. Jahren lebten. Beide Typen Kalkstein unterscheiden sich lediglich in der genauen Art der Muscheln (Rudisten) (5). Derzeit sind insgesamt elf Werke auf Kalkstein in Betrieb (3).

Neben den Sedimentgesteinen sind in Slowenien auch Gesteine magmatischen Ursprungs zu finden. Hier wird in Intrusiv (Plutonite) und Extrusivgesteine (Vulkanite) unterschieden, also Magmen, die entweder unterirdisch erkaltet sind oder erst nach Austritt an der Tagesoberfläche erstarrten. Die Intrusivgesteine (Bild 1, rot dargestellt) sind dabei als Tonalite im Bachergebirge und als Granodiorite in einem bis nach Kärnten reichenden schmalen Gürtel in den Karawanken vertreten. Extrusivgesteine (Bild 1, braun dargestellt) sind hauptsächlich südlich der Karawanken und im Gebiet um den Berg Smrekovec, in kleineren Dimensionen auch in Jezersko, zwischen Jezersko und Škofja Loka, in der Nähe von Idrija, in Selška Dolina und dem Bohor-Gebirge zu finden. Das am häufigsten auftretende Gestein ist dabei ein Gefüge aus Tuff (6). Derzeit bestehen zwei aktive Steinbrüche auf Tonalit und Granodiorit (3).

Zuletzt seien auch metamorphe Gesteine (Bild 1, rosa dargestellt) genannt, also jene, die unter Einfluss hoher Temperaturen und Drücke aus anderen Gesteinen hervorgegangen sind. Von dieser Art werden in Slowenien in dreizehn Betrieben Marmor und Schiefer gewonnen (3, 6). Mit Vorkommen im Bachergebirge, um den Weitensteiner Zug (Kozjak) und in den Karawanken, orientiert sich die Verteilung der Metamorphite überwiegend an den Vorkommen der bereits genannten Intrusivgesteine.

Vor der Einführung der untertägigen Gewinnung, lag die jährliche Fördermenge von Kalksteinen in Slowenien bei unter 40.000 t (etwa 15.000 m³). Seit Beginn des Untertagebaus auf Kalkstein ist die jährliche Fördermenge mit gewissen Schwankungen deutlich angestiegen. Im Jahr 2009 wurden 70.000 t, bereits im Jahr 2005 sogar über 100.000 t erreicht. Die Im Jahr 2009 aufkommende Krise, die auch die slowenische Bauindustrie betraf, führte zu sinkenden Fördermengen, bis im Jahr 2012 nur

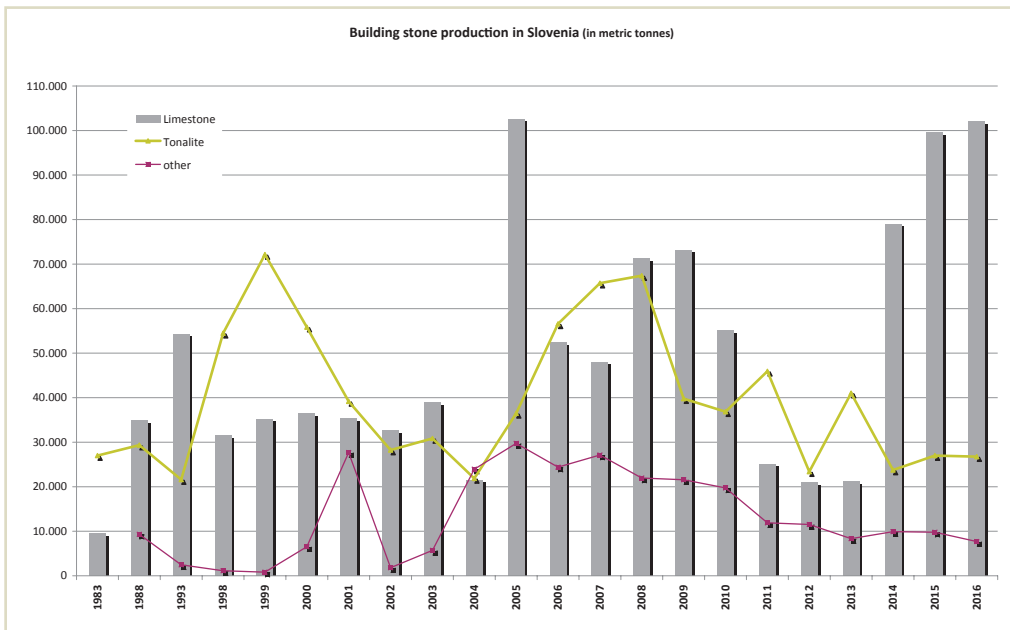


Fig. 2. Production of dimension (building) stone in Slovenia (14).
Bild 2. Abbaumengen von Kalk-Natursteinblöcken in Slowenien (14).

ter 2012 production started to increase again – in 2015 it reached 99,540 t and in 2016 over 100,000 t (13). Leading dimension stone – limestone producing companies in terms of tonnage in the Slovenia today were companies Marmor Sežana, Marmor Hotavlje, Kamnoseštvo Tavčar, and Mineral.

The abrupt increase in the production of dimension stone – limestone in recent years has enabled the introduction of underground mining in the aforementioned Slovenian dimension stone quarries. In the case of other dimension stone (tonalite and other) quarries, all with surface mining, a rapid decline in production of dimension stone can be seen in the last eight years.

2 Slovenian dimension stone – limestone quarries with underground mining

In Slovenia, the underground mining of dimension stone – limestone was first introduced on a trial basis at the Hotavlje I quarry in 1993, of the company Marmor Hotavlje (1,10). After several years of interruption the introduction of underground mining was also continued in the quarries of the company Marmor Sežana. In 2002 it was first implemented at the Lipica II quarry, and 2009 at the Lipica I quarry and Doline quarry. In 2014 the underground extraction of dimension stone blocks was also introduced in the Repen limestone Debela griža quarry of the company Kamnoseštvo Tavčar (17). Quarries of dimension stone – limestone with underground mining will be briefly presented.

As one of the leading Slovenian stone-cutting company Marmor Hotavlje (MH) (14) began the organized excavation of dimension stone at the Hotavlje I quarry in 1948, but the actual beginnings of the excavation of natural stone blocks at the Hotavlje I quarry date back to the 1800's. The natural stone found here, the so-called Hotaveljčan limestone, is colourful (grey, red, pink, and sometimes almost black) and has white calcite veins as well as the remnants of individual corals and algae (5) (Figure 3). It was deposited in shallow marine environments of the Triassic period some 225 millions years ago. The MH management decided in 1993 to introduce a modified irregular room-and-pillar underground mining method, primarily due to the geological condition

noch 21.000 t Kalkstein gewonnen wurden. Danach stiegen die Zahlen wieder, auf bis zu 99.540 t im Jahr 2015 und über 100.000 t im darauffolgenden Jahr (13). Weitere Einzelheiten können Bild 2 entnommen werden. Die nach Tonnage größten Betreiber von Kalksteinwerken in Slowenien sind derzeit Marmor Sežana, Marmor Hotavlje, Kamnoseštvo Tavčar und Mineral.

Die zuletzt stark ansteigende Nachfrage nach Kalksteinen hat schließlich die Überführung einiger Tagebau- in Tiefbaubetriebe ermöglicht. Hinsichtlich des Abbaus von Tonalit und anderen ausschließlich im Tagebau gewonnenen Natursteinen ist ein künftiger untertägiger Abbau derzeit allerdings nicht zu erwarten, da die Nachfrage in den letzten acht Jahren stark gesunken ist.

2 Die slowenischen Untertagebetriebe für die Gewinnung von Kalksteinblöcken

In Slowenien wurde Kalkstein untertägig erstmalig und zunächst nur testweise im Jahr 1993 von der Firma Marmor Hotavlje im Betrieb Hotavlje I abgebaut (1, 10). Jahre später nahm auch die Firma Marmor Sežana den Abbau unter Tage auf: im Jahr 2002 im Betrieb Lipica II und im Jahr 2009 in den Betrieben Lipica I und Doline. Der Repen-Kalkstein wird schließlich seit dem Jahr 2014 auch unter Tage gewonnen, nämlich in der Grube Debela Griža der Firma Kamnoseštvo Tavčar (17). Diese Betriebe sollen im Folgenden kurz vorgestellt werden.

Die Firma Marmor Hotavlje (MH) zählt heute zu den führenden Unternehmen im Abbau von Natursteinen in Slowenien (14). Die erste organisierte Gewinnung fand im Jahr 1948 im Tagebau Hotavlje I statt, wo bereits seit dem 19. Jahrhundert rudimentär Natursteinblöcke abgebaut wurden. Der dort gefundene Hotaveljčan-Kalk entstand in Flachmeerzonen des Trias vor rd. 225 Mio. Jahren. Er zeichnet sich durch eine besondere Farbvielfalt – von rot und rosa über blau bis hin zu fast schwarz – aus und ist durchzogen von Adern aus Calcit. Auch können einzelne Korallenstücke und Algen enthalten sein (5) (Bild 3). Aufgrund der gestiegenen Nachfrage nach Natursteinen, der geologischen Situation der Lagerstätte und der verhältnismäßig großen Mengen an Deckgebirge, beschloss die Leitung von MH im Jahr 1993 die

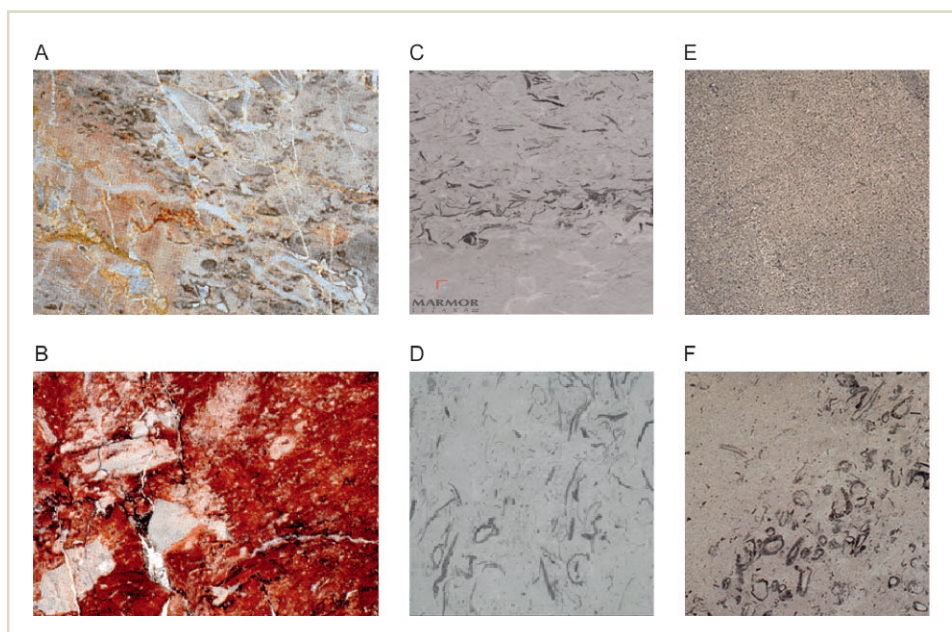


Fig. 3. Dimension stone – limestone from Slovenian underground quarries. A, B limestone so-called Hotaveljčan (grey, pink/red), C Repen limestone (Doline quarry), D Repen limestone (Debela griža quarry), E Lipica Unito homogenous limestone and F Lipica Fiorito rose limestone (Lipica I quarry and Lipica II quarry).

Bild 3. Anschnitte verschiedener in Slowenien abgebauter Kalksteinarten. A, B Hotaveljčan-Kalk (grau, rosa/rot), C Repen-Kalkstein (Betrieb Doline), D Repen-Kalkstein (Betrieb Debela Griža), E Lipica Unito, F Lipica Fiorito (Betriebe Lipica I und II).

of the quarry, the large amounts of the overburden in case of an expansion of the surface quarry and the increasing needs of natural stone as a raw material. Today, the total surface area of the underground rooms is around 3,300 m², and together around 15,000 m³ of stone massive were excavated.

The Marmor Sežana company (15), which has been the leading stone-cutting company in the karst region for more than a half century, began its excavation of natural stone at the Lipica I quarry in 1960, at the Doline quarry in 1976 and at the Lipica II quarry in 1986. In the Lipica I quarry and Lipica II quarry it excavates two types of natural stone, which were named by the Karst stone-cutters as “Lipica Unito” (homogenous stone) and “Lipica Fiorito” (rose stone) (Figure 3). The flowery limestones, named after the flower-like intersections of fossilized rudist shells, were common 80 million years old. In terms of size, the Lipica II quarry ranks among the largest Slovenian natural stone quarries. As of similar reasons to the Hotavlje I quarry, for the Lipica II quarry it was also decided for a trial underground excavation of natural stone blocks in 2001 which was introduced in 2002. In the Lipica I and Doline quarry, trial underground excavation of natural stone blocks started in 2009. In all these quarries a modified irregular room-and-pillar excavation method is used.

Kamnoseštvo Tavčar (KT), a family business company, began the extraction of natural stone at the Debela griža quarry in 1985 (9). The natural stone found here, the so-called Repen limestone, is a grey coloured, high-quality crystallized limestone with fossilized clam shells trapped inside (Figure 3). It has a proper physical-chemical property, compactness, colourful, rich pleasant appearance, which is a nice set up and is quite durable for outdoor use. Repen limestone taken from the Debela griža quarry and Doline quarry was approximately 93 million years old. The regular room-and-pillar underground mining method was introduced in Debela griža quarry in 2014. The extraction of dimension stone blocks takes place around 24 m under the surface. Today, the total surface area of the underground rooms in Debela griža quarry is around 1,500 m², and together around 14,000 m³ of stone massive were excavated.

untertägige Fortführung des Abbaus im Örterbau mit unregelmäßigen Pfeilern. Heute beträgt das hergestellte Hohlraumvolumen rd. 15.000 m³ bei einer Grundfläche von ca. 3.300 m².

Im Jahr 1960 nahm auch die Firma Marmor Sežana (15) den Abbau von Natursteinen auf und zählte schließlich für mehr als ein halbes Jahrhundert als das führende Unternehmen der Branche in der Karst-Region. Die Gewinnung fand zunächst im Betrieb Lipica I statt, wurde dann aber um die Betriebe Doline (ab 1976) und Lipica II (ab 1986) erweitert. Die Betriebe Lipica I und II fördern die beiden Kalksteinvariationen „Lipica Unito“ und „Lipica Fiorito“ (Bild 3). Lipica Unito ist in seinem Erscheinungsbild vergleichsweise homogen (= unito), wohingegen Lipico Fiorito blumen- bzw. blütenförmige (= fiorito) Muster aufweist. Letztgenannte Strukturen sind durch die enthaltenen Rudisten – eine ausgestorbene Ordnung der Muscheln – zu erklären, die vor 80 Mio. Jahren sehr zahlreich waren. In Bezug auf die Größe zählt der Betrieb Lipica II zu den größten Natursteinwerken in Slowenien. Wie im Betrieb Hotavlje I, wurde aus vergleichbaren Gründen auch hier ein Untertagebetrieb eingeführt, der nach Beschluss im Jahr 2001 zunächst testweise im Jahr 2002 umgesetzt wurde. Die Betriebe Lipica I und Doline folgten im Jahr 2009. Auch hier findet der Abbau in unregelmäßigem Örterbau statt.

Das Familienunternehmen Kamnoseštvo Tavčar begann im Jahr 1985 im Betrieb Debela Griža mit dem Abbau von Naturstein (9). Der dort und im Betrieb Doline abgebaute sogenannte Repen-Kalkstein ist etwa 93 Mio. Jahre alt, erscheint in verschiedenen Grautönen und enthält Muschelschalen (Bild 3). Er zeichnet sich dank seines hohen Kristallisierungsgrads durch hohe Kompaktheit und sehr gute chemisch-physikalische Eigenschaften aus, ist daher relativ witterungsbeständig und somit gut für den Einsatz im Außenbereich geeignet. Seit dem Jahr 2014 wird der Kalkstein im Betrieb Debela Griža etwa 24 m unter der Tagesoberfläche unter Anwendung eines Örterbaus – hier allerdings mit regelmäßigen Pfeilern – gewonnen. Das gesamte Hohlraumvolumen beträgt derzeit etwa 14.000 m³ bei einer Grundfläche von ca. 1.500 m².

Type of investigation / Merkmal	Unit / Einheit	Lipica Unito	Lipica Fiorito	Hotavlje red / rot	Hotavlje grey / grau	Hotavlje grey/pink grau/rosa
Density without pores and cavities / Reindichte (ohne Porenvolumen)	t m ³	2.71	2.71	2.90	2.74	2.73
Density / Dichte (einschl. Porenvolumen)	t m ³	2.66	2.67	2.74	2.71	2.71
Coefficient of density Verhältnis Dichte zu Reindichte		0.97	0.98	0.94	0.99	0.99
Porosity / Porosität	%	2.90	2.70	0.06	0.01	0.70
Water absorption / Wasseraufnahme	%	0.62	0.54	0.36	0.23	0.25
Wear of the grinding / Abriebfestigkeit	cm ³ 50cm ²	21.5	17.7	29.5	27.1	–
Modulus of elasticity / E-Modul	GPa	78.5	74.4	25.0	25.0	25.0
Angle of internal friction / Winkel der inneren Reibung	°	53.0	–	22–35	–	–
Bending tensile strength / Biegezugfestigkeit	MPa	6.14	–	–	14.7	–
Bending tensile strength after 48 cyclic freezing/thawing / Biegezugfestigkeit nach 48 Gefrier- und Auftauvorgängen	MPa	–	–	–	13.6	–
Average compressive strength:					90.2	
- dry / trocken	MPa	219.6	230.4	137.8	114.0	–
- wet / nass	MPa	209.9	195.8	150.8	156.0	–
- after 25 cyclic freezing/thawing - nach 25 Gefrier- und Auftauvorgängen	MPa	220.9	201.7	187.8	118.0	–

Table 1. Mechanical properties of the natural stones Hotaveljčan (2), Lipica Unito and Lipica Fiorito.
Tabelle 1. Mechanische Eigenschaften der Natursteine Hotaveljčan (2), Lipica Unito und Lipica Fiorito.

Mechanical properties of different colour variations of dimension stones – limestones are given in tables 1 and 2. Examinations of mechanical and physical properties of natural stone were carried out in accordance with European Union standards EN 12058:2004 “Natural stone products – Slabs for floors and stairs – Requirements”.

Die verschiedenen Variationen slowenischer Kalksteine weisen neben ihren rein optischen Unterschieden auch unterschiedliche physikalische und mechanische Eigenschaften auf. Diese wurden unter Beachtung der EU-Norm EN 12058:2004 „Natursteinprodukte – Bodenplatten und Stufenbeläge – Anforderungen“ bestimmt und sind in den Tabellen 1 und 2 aufgeführt.

Type of investigation / Merkmal	Unit / Einheit	Doline	Debela Griža	
		Repen	Repen (bright / hell)	Repen (dark / dunkel)
Density without pores and cavities / Reindichte (ohne Porenvolumen)	t m ³	2.72	2.79	2.78
Density / Dichte (einschl. Porenvolumen)	t m ³	2.70	2.68	2.68
Coefficient of density Verhältnis Dichte zu Reindichte		0.99	0.96	0.96
Porosity / Porosität	%	0.70	4.10	3.60
Water absorption / Wasseraufnahme	%	0.17	0.23	0.11
Wear of the grinding / Abriebfestigkeit	cm ³ 50cm ²	18.4	23.9	18.0
Modulus of elasticity / E-Modul	GPa	82.7	–	–
Angle of internal friction / Winkel der inneren Reibung	°	34.0	–	–
Bending tensile strength / Biegezugfestigkeit	MPa	–	–	–
Bending tensile strength after 48 cyclic freezing/thawing / Biegezugfestigkeit nach 48 Gefrier- und Auftauvorgängen	MPa	–	–	–
Average compressive strength:				
- dry / trocken	MPa	210.0	206.0	221.0
- wet / nass	MPa	190.0	190.0	212.0
- after 25 cyclic freezing/thawing - nach 25 Gefrier- und Auftauvorgängen	MPa	172.0	197.0	223.0

Table 2. Mechanical properties of the natural stones Repen Doline and Repen Debela griža.
Tabelle 2. Mechanische Eigenschaften der Natursteine Repen Doline und Repen Debela Griža.

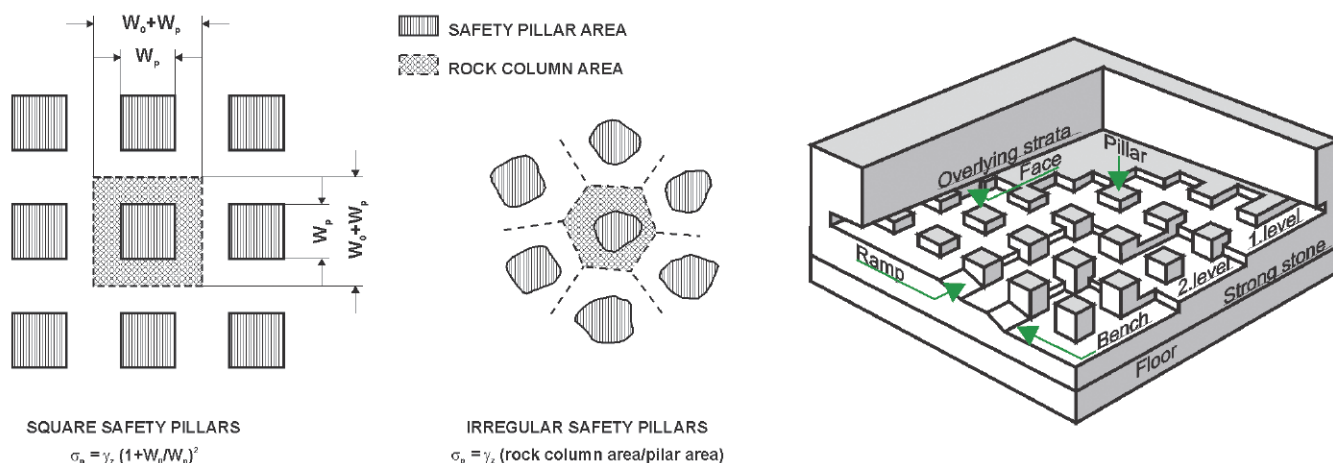


Fig. 4. Typical room-and-pillar layout with regular or irregular spaced high safety stone pillars. Regularly spaced room-and-pillar layout is used only in the Debela griža quarry (2, 4, 7).

Bild 4. Klassisches Bild eines Örterbaus mit regelmäßig oder unregelmäßig angeordneten Pfeilern. Die Anordnung gleichmäßiger Pfeiler kommt allerdings nur im Betrieb Debela Griža zur Anwendung (2, 4, 7).

The main factors to have a crucial role to introduce underground mining methods in Slovenian quarries are:

- geological factors: overburden thickness, site compactness – wall masses, waste rock, shape of the rock body;
- technical and technological factors: development of the technology and the mining methods enables efficient, simple and safe mining; and
- regulatory factors: there are no restrictions in the legislation of the room-and-pillar mining method, therefore regulations on the performance of underground work are reasonably applied. The mining authority had certain concerns with regarding to introduce this mining method in Slovenia.

Against surface mining there are the following advantages for underground mining:

- ecological factors: lesser surface damage to the environment, smaller rock waste deposits and significantly lower noise burden on the surroundings (because works are performed underground); and
- economic factors: expensive overburden works are unnecessary; mining can be done all year round and even in poor weather conditions (winter, rain); the costs of mining are initially higher due to quarry opening works and additional research costs, but they decrease rapidly with the development of open underground spaces called galleries.

Following some of the most important elements of design and monitoring of underground extraction will be briefly presented.

3 Design of underground dimension stone quarries

In all five Slovenian underground dimension stone quarries, the excavation of dimension stone blocks is done using the modified regular or irregular room-and-pillar excavation method (Figure 4), which is adjusted to the characteristics of the sites with irregularly spaced high safety pillars. Since in all cases the underground excavation is done at a relatively shallow depth of about 15 to 34 m,

Um die Entscheidung für einen untertägigen Abbau treffen zu können, müssen folgende Faktoren besonders berücksichtigt werden:

- Geologische Faktoren: Mächtigkeit des Deckgebirges bzw. Menge der unproduktiven Massen, Form der Lagerstätte, Nebengebirge.
- Technische und technologische Faktoren: Machbarkeit, Abbaumethode, Effizienz, Sicherheit.
- Rechtliche Faktoren: umzusetzende Maßnahmen. Eine Bestimmung zur Durchführung eines Örterbaus existiert in Slowenien nicht, weshalb die allgemeinen Vorschriften für den Untertagebau angewandt werden. Die Bergbehörde trat der Einführung des Örterbaus daher skeptisch entgegen.

Im Vergleich zum übertägigen Abbau ergeben sich durch eine untertägige Gewinnung folgende Vorteile:

- Ökologische Faktoren: geringere Beanspruchung der Tagesoberfläche, es werden keine oder nur kleine Halden benötigt, verringerte Lärmemissionen.
- Wirtschaftliche Faktoren: Abtragen des Deckgebirges entfällt, Abbau ist unabhängig von der übertägigen Witterung über das ganze Jahr durchführbar, zunächst höhere Kosten für Exploration sowie Vor- und Ausrichtung vermindern sich schnell nach der notwendigen Erstinvestition.

Im Folgenden werden nun die wichtigsten Punkte hinsichtlich Design und Überwachung der untertägigen Hohlräume erläutert.

3 Design der fünf Kalksteingruben

In allen fünf slowenischen Untertagebetrieben für Kalkstein findet der Abbau mittels eines Örterbaus statt, der entsprechend den örtlichen Gegebenheiten angepasst ist. So kommen teilweise regelmäßige, teilweise unregelmäßige Pfeiler zum Einsatz (Bild 4). Da der Abbau in allen Fällen in vergleichsweise geringen Teufen (15 m bis 34 m) stattfindet, sind die Gebirgsdrücke entsprechend gering (< 1,0 MPa). Dies bedeutet allerdings auch, dass ein erhöhtes Risiko in Bezug auf hereinbrechende Firststücke besteht.

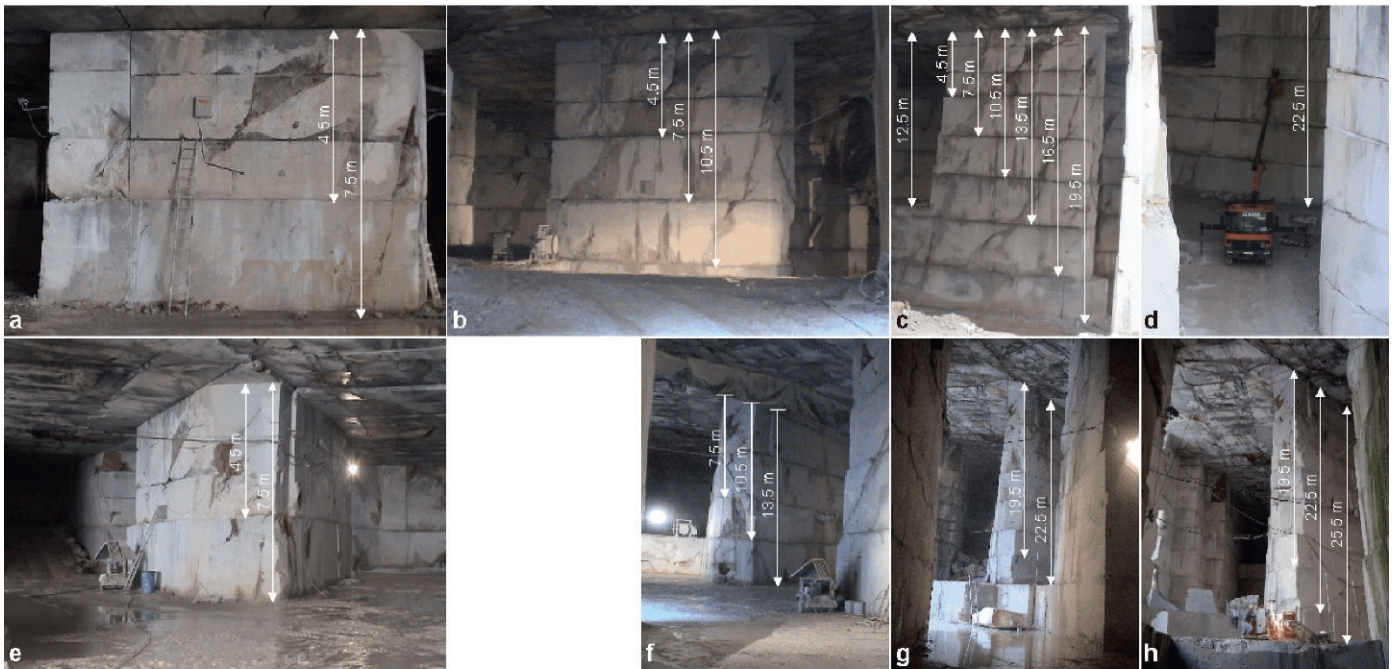


Fig. 5. Deepening (from 4.5 m (a) to 25.5 m (h)) of rock safety pillar (pillar cross-section area 72 m²) in Lipica II quarry (11, 13).
 Bild 5. Durch den sohlwärtigen Abbau bedingte Erhöhung der Pfeiler von 4,5 m (a) auf 25,5 m (h) bei einem Pfeilerquerschnitt von 72 m² im Betrieb Lipica II (11, 13).

the value of the primary vertical stress state is relatively low (<1.0 MPa). This significantly increases the risk that wedge-shaped pieces or blocks may fall out of the ceiling in open underground rooms.

When planning the underground excavation, special attention therefore had to be paid to the engineering-geological mapping, which was initially done for the external surfaces of the future area of the underground spaces, i.e., galleries, transverse roads and niches, and, after deepening, also the rooms, and the structure of the productive layer. On the basis of these data, the predominant dike systems, which are important for the stability and consequentially also the safety of the underground spaces, were determined. Underground excavation design includes high safety pillar sizing, layout of drifts and entries, dimensions of openings, and support. With planning we seek optimum designs that balance the competing goals

Für jede Planung eines untertägigen Bergwerks ist eine vorherige Kartierung des entsprechenden Gebiets unter geologisch-technischen Gesichtspunkten notwendig. Diese wurde im Fall der slowenischen Kalksteinwerke zunächst nur für die Übertagebereiche, schließlich auch für die Rohstoffkörper selbst durchgeführt. Daraus wurden mögliche Maßnahmen zur Entwässerung der anzulegenden Gruben abgeleitet, die für die Erhaltung der Stabilität der Hohlräume und damit insgesamt für die Sicherheit von größter Bedeutung ist. Die Planung der Abbaubereiche selbst wurde dann hinsichtlich der Dimensionierung der Pfeiler, der Anordnung von Strecken und Örtern, der Ausgestaltung der Tagesöffnungen und der Maßnahmen zum Ausbau durchgeführt. Die Planung der Grube soll schließlich dazu dienen, die wichtigsten Aspekte wie Gebirggsicherheit, Maschinenauswahl, Produktivität, Bewetterung und Kosten optimal miteinander zu vereinen. Weitere Einzelheiten der Pla-



Fig. 6. VW biaxial stressmeter (left) and horizontal EL-beam gauge (right).
 Bild 6. Biaxialer Spannungsmesser (links) und horizontales Dehnungsmessgerät (rechts).

Pillar width Pfeilerbreite W_p [m]	Pillar depth Pfeilerlänge W_p [m]	Gallery width Breite des Zwischenraums W_o [m]	Pillar area Pfeilerquerschnittsfläche A [m ²]	"Tributary area" Systemfläche [m ²]	Extraction/Yield ratio Ausnutzungsgrad [/]
16.8	16.8	16.8	282.2	846.7	1 : 3.0
16.8	14.0	16.8	235.2	799.7	1 : 3.4
14.0	14.0	16.8	196.0	752.6	1 : 3.8
14.0	14.0	14.0	196.0	588.0	1 : 3.0
14.0	11.2	14.0	156.8	548.8	1 : 3.5
11.2	11.2	14.0	125.4	509.6	1 : 4.1
11.2	11.2	11.2	125.4	376.3	1 : 3.0
11.2	8.4	11.2	94.1	345.0	1 : 3.7
8.4	8.4	11.2	70.6	313.6	1 : 4.4
8.4	8.4	8.4	70.6	211.7	1 : 3.0
8.4	5.6	8.4	47.0	188.2	1 : 4.0
5.6	5.6	8.4	31.4	164.6	1 : 5.3
5.6	5.6	5.6	31.4	94.1	1 : 3.0

Table 3. Calculation of natural stone yield for the regular distribution of predicted safety stone pillars (12).
Tabelle 3. Berechnung der Ausnutzungsgrade im Fall einer gleichmäßigen Pfeileranordnung (12).

of ground control, ventilation, equipment type, production requirements, and costs. However, this issue will not be addressed in greater detail in this paper.

With deepening of the galleries/pillars decreases the high safety stone pillars width-to-height ratio r . Figure 5 shows the decreasing width-to-height ratio r from 1.8 (a) to final 0.3 (h) in case of one of the high safety stone pillar in Lipica II quarry. For safety reasons the pillars are under constant control of an electronic VW stressmeter (Figure 6). From American National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) it is recommended a minimum high safety rock pillar factor of safety 1.8 – Slovenia's mining law permits 1.6 – and a minimum width-to-height ratio of 0.8, which represents the lower bound of current experiences (5). The pillars should also be designed so that the average high safety stone pillar stress does not exceed 25 % of the uniaxial compressive strength (5).

In the planning of underground excavation of dimension stone – limestone blocks using the room-and-pillar mining method it is also important to determine the appropriate dimensions (width and height) of large open spaces (galleries, transverse roads/crosscuts, niches and rooms) and high safety pillars (Figure 4) in order to achieve the optimal natural stone yield ratio (utility value). Table 3 presents yields for different dimensions of regular safety stone pillars and open spaces. In practice the yield ratio of 1 : 4.4 or 1 : 4.1 was found to be potentially optimal for high safety stone pillars with respect to the mechanical properties of stone.

4 In-situ measurements

In-situ control measurements for the room-and-pillar mining method include measurements of the stress state as well as the strains in high safety stone pillars and the ceilings of large underground rooms and galleries.

For monitoring of compressive stress changes in high safety stone pillars a 2D stressmeter (VW – vibrating wire – biaxial stressmeter) model 4350-1 manufactured by Geokon was used (Figure 6, left). Three or six vibrating wire sensors allow the principal stress changes to be measured in the plane perpendicular

nung sind allerdings nicht Bestandteil der weiteren Ausführungen in diesem Artikel.

Hinsichtlich der Sicherheitspfeiler kann als Kenngröße das Schlankheitsmaß r (Seitenverhältnis aus Breite zu Höhe der Pfeiler) angegeben werden. Bei fortschreitendem Abbau auf der Sohle stellt sich dementsprechend ein kleiner werdender Wert für r ein. Am Beispiel in Bild 5 wird gezeigt, wie sich der Wert in dem Betrieb Lipica II von $r = 1,8$ (a) bis hin zu $r = 0,3$ (h) verändert hat. Um die fortwährende Sicherheit durch die Pfeiler zu gewährleisten, werden diese ständig geotechnisch mittels Spannungsmessern überwacht (Bild 6). Die US-amerikanische Behörde für Arbeitssicherheit, Umwelt- und Gesundheitsschutz (NIOSH) schreibt hier eine Sicherheit von 1,8 vor, das slowenische Bergrecht hingegen fordert lediglich einen Sicherheitsfaktor von 1,6, allerdings mit einem erfahrungsgemäß sinnvollen Schlankheitsmaß von minimal 0,8 (5). Außerdem sollte die mittlere Druckbelastung der Sicherheitspfeiler einen Wert von 25 % der einaxialen Druckfestigkeit nicht übersteigen (5).

Neben der Dimensionierung der Sicherheitspfeiler ist natürlich auch die Dimensionierung der zwischen den Pfeilern zu erzeugenden Örter (Bild 4) und anderer Hohlräume (Stollen/Strecken, Querschläge) von Bedeutung, die maßgeblichen Einfluss auf den erreichbaren Ausnutzungsgrad der Lagerstätte hat. Tabelle 3 enthält einige Beispiele zu Dimensionen von Pfeilern und deren Zwischenräumen. In der Praxis haben sich unter Berücksichtigung der geomechanischen Eigenschaften der Gesteine Relationen von 1 : 4,4 bzw. 1 : 4,1 für einen gleichmäßigen Örtterbau als am geeignetsten herausgestellt.

4 Geotechnische Objektüberwachung

Zur Objektüberwachung im geotechnischen Sinn werden zum einen die Pfeiler auf die vorherrschende Belastung und daraus resultierenden Spannungen überprüft und zum anderen Pfeiler sowie Firsten auf Verformungen untersucht und diese kontrolliert.

Um die Änderungen der Spannungszustände in den Pfeilern messen zu können, werden biaxiale Spannungsmesser vom Typ 4350-1 der Firma Geokon eingesetzt (Bild 6, links). Mit jeweils drei oder sechs dieser Sensoren können die Änderungen der Span-

Quarry / Betrieb	VW biaxial stressmeter / biaxiale Spannungsmesser	EL-beam gauge Dehnungsmessgeräte	
		vertical	horizontal
Lipica II	4	2	–
Hotavlje I	3	–	2
Doline	2	–	–
Debela Griža	1	–	–

Table 4. In-situ monitoring in Slovene underground dimension stone – limestone quarries.

Tabelle 4. Sensoren zur Überwachung der slowenischen Untertage-Kalksteingruben.

to the stressmeter installed in the borehole. The stressmeter also has a sensor for temperature measurements (8).

The EL beam gauges (Figure 6, right) are used to measure vertical movements, declination or movements of discontinuity, observation of the stability and convergences of stone wedges, observation of the galleries stability, observation of the structures around exploitation areas, etc. EL beam sensors monitor differential movement and rotation in structures. Two types of sensors are used – horizontal and vertical type. Horizontal beam sensors monitor settlement and heave. Vertical beam sensors monitor lateral displacement and deformation (16).

Installed in-situ control measurement systems for measurements of the stress state as well as the strains in high safety stone pillars and the ceilings of large underground rooms and galleries in Slovene underground dimension stone – limestone quarries are given in table 4.

For transferring data from the VW Biaxial stressmeter and EL beam gauges, a memory unit (datalogger CR10 module, AVW1, SC32B) is used for the data capture, along with the appropriate software (PC200W software package). A monitoring of the compressive stress changes is currently carried out in Hotavlje I quarry, Lipica II quarry, Doline quarry, and Debela griža quarry and lateral displacement in Lipica II quarry and Hotavlje I quarry. With installations of appropriate electronic sensor systems for continuous monitoring the identification of instability phenomena, especially in areas of difficult access can be made.

5 Conclusions

For the time being, no methodology is available for dimensioning high safety stone pillars with a low width-to-height ratio ($r < 1$) for underground dimension and technical stone quarries. The experience and results of measurements currently obtained in five Slovenian dimension stone – limestone quarries that employ the underground excavation of dimension stone will be beneficially used in the development of a new methodology for the implementation of this underground method also in other Slovenian dimension stone quarries (tonalite and others) that are suitable for its use. With transition from surface to underground extraction, the EU dimension stone mining industry can reach the highest environmental standards, greater competitiveness of EU dimension stone on the world market, and provide environmentally-friendly dimension stone mining or so-called green urban mining.

nungszustände ausreichend genau gemessen werden. Die Messung erfolgt jeweils in den Ebenen senkrecht zum Sensor respektive zum Bohrloch, in das der Sensor eingeführt wurde. Darüber hinaus wird auch die Temperatur durch die Sensoren aufgezeichnet (8).

Das in Bild 6 rechts dargestellte Dehnungsmessgerät dient der Messung von Relativ- und Rotationsbewegungen am zu überwachenden Objekt. Es wird in horizontale und vertikale Sensoren unterschieden, wobei mit horizontal angebrachten Sensoren Setzungen bzw. Hebungen und mit vertikal angebrachten Sensoren laterale Verschiebungen bzw. Verformungen gemessen werden können. So können im Wesentlichen alle relevanten Veränderungen der Pfeiler und Hohlräume, wie Konvergenzen oder Verschiebungen, festgestellt und überwacht werden, um schlussendlich die Sicherheit des Grubengebäudes bestätigen zu können (16).

Einen Überblick über die Anzahl der in den slowenischen Kalkstein-Untertagebetrieben zur Überwachung der Pfeiler- und Hohlraumstabilität zum Einsatz kommenden Sensoren gibt Tabelle 4.

Die von den Sensoren ermittelten Daten werden über einen Datenlogger (CR10, AVW1, SC32B) gesichert und mit einer geeigneten Software (PC200W) ausgewertet. Messungen zu den Spannungszuständen in den Pfeilern werden derzeit in den Betrieben Hotavlje I, Lipica II, Doline und Debela Griža durchgeführt. In den Betrieben Lipica II und Hotavlje I werden zudem Verschiebungsmessungen vorgenommen. Dank der elektronischen Überwachung der geomechanischen Zustände in Pfeilern und Firsten können kritische Bereiche leicht identifiziert werden. Dieser Vorteil gilt insbesondere für die schwer zugänglichen Bereiche in den Gruben.

5 Zusammenfassung

Bis heute existiert für untertägige Natursteinwerke kein einheitliches Vorgehen bei der Dimensionierung von Sicherheitspfeilern mit einem geringen Schlankheitsmaß ($r < 1$). Die Durchführung und geotechnische Überwachung eben dieser Pfeiler in fünf untertägigen Natursteinwerken in Slowenien und die Erfahrungen, die daraus erwachsen, können hilfreich beim Design zukünftiger Betriebe sein, für die eine Gewinnung im Örterbau ebenfalls sinnvoll erscheint – beispielweise zum Abbau von Tonalit. Durch den Übergang von Tagebau zu Tiefbau können schließlich zahlreiche Vorteile erreicht werden, die neben höherer Effizienz und damit größerer Wettbewerbsfähigkeit insbesondere auch eine geringere Belastung für die Umwelt, ganz im Sinne von „Green Mining“, bedeuten würden.

Author / Autor

Assist. Prof. Dr. Jože Kortnik, Institut für Geotechnik, Bergbau und Umweltschutz, Universität Ljubljana, Ljubljana/Slowenien

References / Quellenverzeichnis

- (1) Bajželj, U.; Kortnik, J.; Petkovišek, B.; Fifer, K.; Beguš, T.: Environment friendly underground excavation of dimension stone. *RMZ* 46/2 (1999), pp. 203–214.
- (2) Bieniawski, Z. T.: *Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling*. Balkema, Rotterdam. 1984, pp. 193–209.
- (3) *Bulletin Mineral Resources in Slovenia* 2007. 2009. 2011. 2013 and 2015. (cited 20/8/2017). Available on: <http://www.geo-zs.si/>
- (4) Brady, B. H. G.; Brown, E. T.: *Rock Mechanics for Underground Mining*. George Allien & Unwin (Publisher) Ltd. (1985). pp. 316–350.
- (5) Esterhuizen, S. G.; Dolinar, R. D.; Ellenberger, L. J.; Prosser, J. L.: *Pillar and Roof Span Design Guidelines for Underground Stone Mines*. NIOSH 2011 (cited 28/8/2017). Available on: <https://www.cdc.gov/niosh/mining/UserFiles/works/pdfs/2011-171.pdf>.
- (6) Geocache (2017) (cited 30/8/2017). Available on: https://www.geocaching.com/geocache/GC798oD_geoloska-zgodovina-v-7-kamnih-7-stones-history.
- (7) Hoek, E.; Brown, E. T.: Practical Estimation of Rock Mass. *Int. J. Rock Mech.* Vol. 34. No. 8. (1997). pp. 1165–1186.
- (8) Instruction manual Model 4350BX Biaxial stressmeter (cited 28/8/2017). Available on: <http://www.geokon.com/>.
- (9) Kamnoseštvo Tavčar (2017) (cited 28/8/2017). Available on: <http://www.kamnosestvo-tavcar.si/>.
- (10) Kortnik, J.; Bajželj, U.: Underground mining of natural stone in Slovenia. 20th World Mining Congress 2005. Tehran/Iran. pp. 277–286.
- (11) Kortnik, J.: High safety pillars stability assessment in underground dimension stone quarries. *Proceedings of XIV. International Conference of the Open and Underwater Mining of Minerals*. July 3rd – 7th 2017. Varna/Bulgaria. pp. 395–404.
- (12) Kortnik, J.: Optimization of the high safety pillars for the underground excavation of natural stone blocks. *Acta Geotechnica Slovenica*. Vol. 2009/1. pp. 34–48.
- (13) Kortnik, J.: Stability assessment of the high safety pillars in Slovenian natural stone mines. *Arch. Min. Sci.* Vol. 60 (2015). No 14. pp. 403–417.
- (14) Marmor Hotavlje (2017) (cited 28/8/2017). Available on: <http://www.marmor-hotavlje.si/>
- (15) Marmor Sežana (2017) (cited 28/8/2017). Available on: <http://www.marmorsezana.com/>
- (16) Slope Indicator Manual (cited 28/9/2017) Available on: <http://www.slopeindicator.com/.../tilt-elbeam.html>
- (17) Tavčar, M.; Kvartič, M.; Žarn, J.; Kortnik, J.: Underground dimension stone extraction at the Debela griža quarry. *Proceedings of 18th conference with international participation "Waste Management – GzO'17 Urban Mining" and 13th conference "at 45th jump over the leather skin"*. April 7th to 8th, 2017. Ljubljana/Slovenia. pp. 93–101.