

Computergestützte geowissenschaftliche Entscheidungshilfen bei Planung und Optimierung der untertägigen Gewinnung von Marmor

vorgelegt von
Diplom-Geologe
Matthias Koch-Moeck
aus Celle

von der Fakultät VI
Bauingenieurwesen & Angewandte Geowissenschaften
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Naturwissenschaften
- Dr. rer. nat. -

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:
Vorsitzender: Prof. Dr. G. Franz
Berichter: Prof. Dr. K. Germann
Berichter: Prof. Dr. W. Dominik

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 10.06.2005

Berlin 2005
D 83

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen des EU Projektes CAD-PUMA (Development of an Integrated Computer Aided Design and Planning Methodology for Underground Marble Quarries), das durch die Initiative von Herrn Prof. Dr.-Ing. F.-L. Wilke an die TU Berlin gelangte.

Ergebnisse aus dem Projekt CAD-PUMA wurden in dem „Eurothen Thematic Network on Extractive Industries“, Stockholm 2001 publiziert (Germann et al., 2001).

Mein besonderer Dank gilt dem Betreuer der Arbeit, Herrn Prof. Dr. K. Germann, der durch sein stetes Engagement und seine Bereitschaft zur Diskussion zum Erfolg dieser Arbeit wesentlich beigetragen hat. Des Weiteren danke ich Herrn Prof. Dr. Dominik, der sich als Gutachter für diese Arbeit zur Verfügung stellte. Dem Emeritus Prof. Wilke danke ich für die fachliche Diskussion. Darüber hinaus schulde ich Dank allen Projektpartnern für die Zusammenarbeit sowie allen hilfreich beteiligten Mitarbeitern der TU Berlin.

Matthias Koch-Moeck

Zusammenfassung

Zunehmend strengere Umweltauflagen bezüglich des Staub- und Lärmschutzes als auch des Landschaftsschutzes geben Anlass zur Überlegung, ob Natursteinbruchbetreiber, insbesondere die Betreiber von Marmorsteinbrüchen, die Gewinnung nach Untertage verlagern sollten.

Um die durch einen untertägigen Abbau von Marmor entstehenden höheren Unkosten zu kompensieren, wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit nach Möglichkeiten gesucht, die Gewinnungsprozesse unter Berücksichtigung geowissenschaftlicher Aspekte zu optimieren. Dafür wurde der Prototyp eines Wissensbasierten Systems entwickelt, das dem Anwender sowohl bei der Beurteilung der Lagerstätte als auch bei der Entscheidungsfindung zur optimalen Gewinnung Hilfestellung geben kann. Erfahrungen aus praktizierenden untertägigen Gewinnungsanlagen als auch neuere Untersuchungen aus einem EU-geförderten Projekt sind als Grundbestandteile in die Arbeit eingeflossen.

Ein Interviewsystem ermittelt systematisch alle zur Verfügung stehenden und notwendigen Eckdaten für die Beurteilung. Ein regelbasiertes Expertensystem leitet aus den ermittelten Daten Ergebnisse ab, die dem Nutzer Hilfen für die untertägige Gewinnung von Marmor zur Verfügung stellen. Zusätzlich entwickelte Tools und Schnittstellen ergeben ein Wissensbasiertes System, das in seiner Gesamtheit die Beurteilung eines Marmorvorkommens hinsichtlich seiner Abbaumöglichkeiten durch ein auf geowissenschaftlicher Grundlage optimiertes untertägiges Grubenlayout ermöglicht.

Exemplarisch wurden drei Steinbruchbetriebe mit untertägiger Marmorgewinnung untersucht. Die geologischen und gesteinsphysikalischen Eckdaten wurden gemeinsam mit dem existierenden untertägigen Grubenlayout dargestellt.

Aus dem derzeitigen Wissensstand lassen sich Themenbereiche ableiten, die für die Bearbeitung im Rahmen eines Wissensbasierten Systems als Analyse- und Entscheidungshilfen besonders geeignet sind. Die strukturierte Gliederung des Wissensbasierten Systems in Module nimmt diesen Wissensstand auf. Geologischen Einflüsse, Marmoreigenschaften, gewinnungstechnische Voraussetzungen und Teile der betriebswirtschaftlichen Faktoren bilden die modulare Basis des Wissensbasierten Systems. Die für Marmorlagerstätten charakteristischen Einflussgrößen werden systematisch erfasst und diskutiert. Insbesondere wird aufgezeigt, wie eine detaillierte Trennflächenanalyse eine Optimierung des Ausbringens ermöglicht.

Betreibern und Planern wird mit dieser Arbeit ein Entscheidungshilfesystem zur Beurteilung und Optimierung der untertägigen Gewinnung von Marmor zur Verfügung gestellt.

Abstract

Increasingly stricter environmental protection regulations regarding the dust and noise prevention and the conservation of the landscape require the quarry operators, particularly the operators of marble quarries, to switch to underground mining.

To compensate for the increased costs for the underground extraction, possibilities were sought, in the context of the paper on hand, for optimizing the extraction of marble. For this purpose, the prototype of a Knowledge-based System was developed, which can assist the user both with the judgement of the deposit and with the decision support in order to achieve an optimal extraction result. Experiences from already existing underground extraction plants and recent examinations from an EU-sponsored project have been incorporated in the paper as basic components.

A interview system finds systematically all basic data which are available and necessary for the judgement. A rule-based expert system derives results from the data found out, which signify aids to the user for the underground extraction of marble. Additionally developed tools and interfaces yield a Knowledge-based System which – as a whole - facilitates the judgement of a marble deposit with regard to its extraction possibilities through an optimized underground pit layout.

Three quarry enterprises with an underground marble extraction were examined as examples. The basic geological and rock physical data were represented together with the existing underground pit layout.

From the present state of knowledge topics can be derived, which are suited for processing in the context of a Knowledge-based System as analysis and decision aids. The structured organization of the Knowledge-based System in the form of modules incorporates this state of knowledge and also describes the priorities of the dependences. The geological influences, marble qualities, preconditions in regard to extraction technologies, and parts of the business management factors form the foundation of the Knowledge-based System. The characteristics that influence marble deposits are structured and discussed.

It is shown how a detailed interface analysis makes an optimization of the mineable marble possible. This paper provides an aid to operators and planners for the judgement and optimization of the underground extraction of marble.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	III
Zusammenfassung	IV
Abstract	V
Inhaltsverzeichnis	VI
Abbildungsverzeichnis	IX
Tabellenverzeichnis	XIV
1 Einleitung.....	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Naturwerksteine (Dimension Stones) als Mineralische Rohstoffe.....	1
1.2.1 Nomenklaturen und Normen	1
1.2.2 Wirtschaftliche Bedeutung	3
1.3 Methoden der Gewinnung von Naturwerksteinen.....	5
1.4 Optimierung der Gewinnung von Naturwerksteinen.....	5
1.4.1 Rohstoffwirtschaftliche, abbautechnische und ökologische Kriterien.....	6
1.4.2 Einsatz von Entscheidungshilfen bei Planung und Optimierung der Naturwerkstein-Gewinnung von Marmor	8
2 Computergestützte, wissensbasierte Systeme in der Bergbauplanung.....	9
2.1 Der Einsatz von WBS und XPS	9
2.2 Grundsätzlicher Aufbau und Leistungsfähigkeit von Expertensystemen	9
2.3 Expertensysteme für Exploration und Gewinnung von Mineralischen Rohstoffen	12
2.4 Das CAD-PUMA Projekt	13
2.4.1 Aufgabenstellung und Projektpartner	13
2.4.2 Aufgabenverteilung	14
2.4.3 Auffahrung untertägiger Marmorabbau	15
3 Der Naturwerkstein Marmor und seine Lagerstätten	17
3.1 Generelle Charakterisierung	17
3.1.1 Eigenschaften und Qualitätsmerkmale	18
3.1.2 Marmortexturen, Lithologie und Gefüge.....	20
3.1.3 Trennflächen im Naturwerkstein Marmor	22
3.1.4 Gewinnungs- und Verarbeitungs-technik	24
3.1.5 Fallbeispiele von Marmorlagerstätten bzw. –Steinbrüchen.....	26
3.2 Steinbruch Penteli / Griechenland (DMCO)	27
3.2.1 Geografische Lage.....	27
3.2.2 Geologische Situation.....	27

3.2.3	Regionalgeologische Position	27
3.2.4	Lithostratigraphische Situation, Mächtigkeit, Strukturgeologie	27
3.2.5	Abbau, Transport, Gewinnungs-produkte, Verarbeitungsprodukte	29
3.3	Weißwasserbruch bei Laas / Italien (LASA)	30
3.3.1	Geografische Lage	30
3.3.2	Geologische Situation	31
3.3.3	Regionalgeologische Position	31
3.3.4	Lithostratigraphische Situation, Mächtigkeit, Strukturgeologie	31
3.3.5	Abbau, Transport, Gewinnungs-produkte, Verarbeitungsprodukte	31
3.4	Steinbrüche am Monte Corchia / Italien (CCLL)	35
3.4.1	Geografische Lage	35
3.4.2	Geologische Situation	35
3.4.3	Regionalgeologische Position	35
3.4.4	Lithostratigraphische Situation, Mächtigkeit, Strukturgeologie	36
3.4.5	Abbau, Transport, Gewinnungs-produkte, Verarbeitungsprodukte	36
3.5	Zusammenfassende Beurteilung der bearbeiteten Lagerstätten	38
3.5.1	Klassifizierung der bearbeiteten Lagerstätten nach ihrer Bauwürdigkeit	38
3.5.2	Generelles beschreibendes Modell für Marmorlagerstätten.	38
4	Anforderungen an ein WBS für die untertägige Gewinnung von Marmor	40
4.1	Grundsätzliche Vorgehensweisen bei der Entwicklung von Wissensbasierten Systemen - Entwicklungsphasen	40
4.2	Entwicklungsphasen des WBS „Untertägige Marmorgewinnung“	42
4.3	Komponenten des WBS	43
4.4	Aufbau und Funktion des Systems	44
4.4.1	Programme	44
4.4.2	Zusätzlich für das WBS entwickelte Tools und Schnittstellen	48
4.4.3	Übersicht der verwendeten Programme	50
4.5	Quellen für das Wissen und die Inhaltliche Umsetzung	51
4.5.1	Recherche und Interview bei Steinbruchbetreibern	51
4.5.2	Diskussion und Übernahme geotechnischer Befunde	51
4.5.3	Diskussion und Übernahme von Ergebnissen aus den experimentellen Gruben der Steinbruchbetreiber	52
4.5.4	Umsetzung der Ergebnisse in Regeln	52
4.5.5	Ableitung von Bewertungskriterien für das Expertensystem	54
5	Die modulare Struktur des WBS	55
5.1	Vorbereitende Analyse des Systems „Untertägige Marmorgewinnung“	55
5.1.1	Geologie von Marmor Vorkommen – Modul GEO	57
5.1.2	Eigenschaften des Marmors – Modul MMP	67

5.1.3	Abbautechniken – Modul UQL	74
5.1.4	Wirtschaftliche Aspekte – Modul MEC	78
5.2	Ranking als Bewertungsmethode	78
6	Spezifische Geowissenschaftliche Parameter für die untertägige Gewinnung von Marmor.....	80
6.1	Lagerungsverhältnisse und Qualitätsverteilung im Untergrund	80
6.2	Störungszonen, Trennflächen und Schieferung	83
6.2.1	Störungszonen	83
6.2.2	Trennflächen.....	83
6.2.3	Schieferung.....	87
6.3	Verkarstung.....	87
6.4	Planung und Einrichtung der „experimental mines“	89
6.4.1	DMCO.....	89
6.4.2	LASA	89
6.4.3	CCLL.....	90
7	Quantitative Beiträge zur Planung der untertägigen Hohlräume	91
7.1	Numerische Simulation der Primär- und Rohblockverteilung bzw. –größe	91
7.1.1	Methoden der Abschätzung von Rohblockgrößen	91
7.1.2	Primär- und Rohblockanalyse - Berechnungen mit <i>RESOBLOK</i> und <i>Surpac2000</i>	94
7.1.3	Zusammenfassung der Primär- und Rohblockanalyse.....	112
7.2	Geomechanische Einschätzung der Marmormasse	114
7.3	Dimensionierung von untertägigen Hohlräumen in Marmor.....	115
8	Schlussfolgerungen.....	122
8.1	Einschätzung des mit einem wissensbasierten Entscheidungshilfe-System erreichbaren Optimierungserfolgs	122
8.2	Unabdingbare Voraussetzungen.....	123
8.3	Zusätzlicher Informationsbedarf – Mögliche Weiterentwicklung – Ausblick	123
9	Literatur	124
	Anhang	131
	Abkürzungen.....	134

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Rohblock, Netto- und Bruttomaß, DIN EN 1467.....	2
Abb. 2 Import-Export von Marmor und Travertin Italiens. (LABORAZIONE DA ICE SU FONTE ISTAT., 2002).	4
Abb. 3 Reduzierung der Ressourcen eines Natursteinvorkommens bis hin zum Produkt.	6
Abb. 4 United Nations Framework Classification (UNFC) — Solid Fuels and Mineral Commodities; (a) UNFC's E (Economic), F (Feasibility) and G (Geological) axes (b) Codified EFG classes (36 in total) potentially applicable using the UNFC (McKAY et al., 2001).	7
Abb. 5 Abgrenzung KI-Systeme, Wissensbasierte Systeme und Expertensysteme.	9
Abb. 6 Aufbau eines Expertensystems.	10
Abb. 7 Kumulativer Lernprozess (NORVIG, 1995).....	10
Abb. 8 Beziehung Objekte und Regeln.	10
Abb. 9 Zusammenarbeit der Partner im Projekt CAD-PUMA. Entwicklung eines Entscheidungshilfesystems mit computergestützten Methoden.	14
Abb. 10 Abbauplan der untertägigen Hohlräume von DMCO (Site A). Die Feste wird durch einen Hohlraum umfahren und eine Kammer entsteht. Der Vortrieb erfolgt aus dem Tagebau in den Abbau. Angaben zur Dimensionierung sind in Tabelle 3 zu finden.	15
Abb. 11 a-c: Korngrößen in Marmoren der drei untersuchten Lagerstätten. Die Abbildungen zeigen Dünnschliffe im polarisierten Durchlicht. A: Levigliani (CCLL); schlierige Textur mit Wechsel von feinen und groben Körnungen. B: LASA; homogene grobkörnige Kalzitkristalle. C: Penteli (DMCO); homogen, sehr feinkörnige Kalzitkristalle (Maßstab: oben rechts im Bild 1 cm; Darstellungstechnik nach CRAMER, 2004).	17
Abb. 12 Verschiedene Marmorvarietäten der Region Carrara (aus BRADLEY, 1997).	18
Abb. 13 Druckfestigkeit von Naturwerksteinen (nach PESCHEL, 1977).	19
Abb. 14 Biegefestigkeit von Naturwerksteinen (nach PESCHEL, 1977).	19
Abb. 15 Abnutzbarkeit von Naturwerksteinen (nach PESCHEL, 1977).	19
Abb. 16 Elastizitätsmodul von Naturwerksteinen (in Pascal nach PESCHEL, 1977).	20
Abb. 17 Schematisches Profil von Biegescherfalten in Lagen unterschiedlicher Mächtigkeiten bzw. Kompetenz; deutliche Asymmetrie in den Kleinfalten. Lokale Dilatationszonen überlagern sich gegenseitig bei zunehmender Einengung bzw. regionaler Metamorphose (EISBACHER, 1996).	21
Abb. 18 Faltungstypen, die im Marmor häufig auftreten (nach RAMSAY & HUBER, 1987).	21
Abb. 19 Anschnitte eines Quaders mit unterschiedlichen Faltensystemen und den daraus abzuleitenden Texturen (RAMSAY & HUBER, 1987).....	21
Abb. 20 Haupttypen von Trennflächen in Abhängigkeit von ihrer räumlichen Ausdehnung (PALMSTRÖM, 1995).	22
Abb. 21 Trennflächen und die daraus gebildeten, im Marmor häufigen Primärblockformen (PALMSTRÖM 2000).	23
Abb. 22 Schematische Darstellung der Verwendung einer Seilsäge. Das Seil ist durch den gesamten Tagebau verspannt. Eine kurze Seilführung verringert den Verschleiß (BRADLEY, 1997).	24
Abb. 23 Oben: Schrämmaschine (Kettensäge) im Einsatz bei DMCO. Unten: Abbauschnittfolge bei der untertägigen Gewinnung von Marmor.	25
Abb. 24 Mögliche Schnitte bezogen auf die Textur des Marmors. V = verso, C = contro, S = secondo.	26
Abb. 25 Geologische Übersichtskarte von Attika mit Lage des Steinbruches von DMCO (überarbeitet nach HIGGINS & HIGGINS, 1996).....	27
Abb. 26 Tagebau von DMCO mit Blick auf die Zugänge zur untertägigen Gewinnung.	29
Abb. 27 Geologische Übersichtskarte des Vinschgaus (Baumgarten et al., 1998).....	32
Abb. 28 Mundloch des Stollens vom Weißwasserbruch.	33

Abb. 29 Seilbahn um 1936 im Lasa Weißwasserbruch (Foto aus SEIP, 1936).	33
Abb. 30 Eingangsbereiches des Weißwasserbruches. Oben durch Bohrungen, unten durch Sprengungen hinterlassene alte Abbauspuren.	34
Abb. 31 Geografische Lage des Steinbruchs von CCLL in der Versilia.	35
Abb. 32 Geologische Karte der nördlichen Apenninen mit einem Profil durch den Kern der Alpi Apuane (MONTOMOLI, 2001).	35
Abb. 33 Die untertägige Gewinnung bei CCLL.	37
Abb. 34 Stufen des Prototypings eines WBS (nach CURTH et al., 1991).	40
Abb. 35 Vorgeschlagene Entwicklungsmethodik für felsmechanische Systeme, inklusive Entwicklungsprinzipien (BIENIAWSKI, 1992).	41
Abb. 36 Datenfluss und Verarbeitung im Projekt CAD-PUMA. Unterlegt sind die Anteile der TU Berlin, d. h. die in dieser Arbeit entwickelten Teile.	43
Abb. 37 Komponenten des WBS.	44
Abb. 38 Regelbasierte Trennflächen-, Primärblock- und Rohblockanalyse.	44
Abb. 39 CAD-PUMA Expertensystem Data Front End auf der Basis von MS Access.	45
Abb. 40 Bearbeitungsmaske des MS Access Data Front End. „Category“ beschreibt die Zugehörigkeit zu den Modulen (siehe Kap. 5.1). „EE Variable“ ist die für Elements Environment reservierte Variable. Der Typ der Variable wird in „EE Datatype“ definiert. Minimum, Maximum und Default Value beschreiben den Wert. Einen internen Vermerk über die Bewertung oder andere Informationen findet man unter „Appraisal“. „ID“ ist die fortlaufende Reihenfolge in der Datenbank, „QuestionSequenceNo“ die Reihenfolge im Abfragemodus.	46
Abb. 41 Setup des Experten Systems.	46
Abb. 42 Beispiel eines Fragedialogs mit dem MS Access Expert System Data Front End. Im rechten Fenster ist eine einfache schematische Abbildung, die geologische Lagerungsverhältnisse darstellt, ausgewiesen. Unten rechts das Eingabefeld mit dem möglichen Wertebereich.	47
Abb. 43 Ausgabefenster von Elements Environment.	47
Abb. 44 Arbeitsumgebung von Elements Environment.	48
Abb. 45 RESOBLOK dient zur Berechnung und Darstellung von Trennflächen und Blöcken im Festgestein.	49
Abb. 46 EE2Surpac konvertiert Daten von Elements Environment nach Surpac2000.	49
Abb. 47 Punkte-Bewertungssystem des Wissensbasierten Systems für Verkarstungsphänomene als eine wichtige geowissenschaftliche Einflussgröße bei der untertägigen Gewinnung von Marmor.	54
Abb. 48 Vereinfachtes System der Einflussgrößen auf die untertägige Gewinnung von Marmor.	55
Abb. 49 Modulare Struktur des Wissensbasierten Systems zur Gewinnung von Marmor untertage.	56
Abb. 50 Auswahl-dialog im Microsoft Access Data Front End zu den wählbaren Modulen.	57
Abb. 51 Schema möglicher Lagerungsverhältnisse in Marmorlagerstätten.	57
Abb. 52 Deckgebirge auf einem Marmorlager.	58
Abb. 53 Übergangszone zwischen Marmor und Deckgebirge, in der Regel Schiefer.	58
Abb. 54 Kontakte der Trennflächen.	58
Abb. 55 Haupttypen von Hangrutschungen und die dazugehörigen Stereoplots der strukturbildenden Komponenten mit dem Habitus der daraus entstehenden Rutschung (RAHN, 1986).	59
Abb. 56 Verkarstungserscheinungen.	60
Abb. 57 Karsthöhle.	60
Abb. 58 Speleotheme.	61
Abb. 59 Karren.	61

Abb. 60 Oberflächen-Depression durch Verkarstung im Untergrund.....	61
Abb. 61 Dolinen.....	61
Abb. 62 Lagerungsverhältnisse des Marmors und des Deckgebirges.....	62
Abb. 63 Ideale Hangsituation für die untertägige Gewinnung eines Marmorlagers.....	62
Abb. 64 Maximale, durchschnittliche und minimale Schichtmächtigkeit des Marmorlagers.....	63
Abb. 65 Fläche des bauwürdigen Marmorlagers.....	63
Abb. 66 Wechsellagerung innerhalb des Marmorvorkommens bei unterschiedlicher Deformation.....	63
Abb. 67 Verteilung von verschiedenen Qualitäten im Marmor.....	64
Abb. 68 Höhenlage des Mundloches.....	64
Abb. 69 Schieferung und Schichtung im Marmor.....	64
Abb. 70 Intensitäten der Schieferung im Marmor.....	64
Abb. 71 Raumlage der Schieferung im Verhältnis zur Schichtung.....	64
Abb. 72 Störung in einem Marmorvorkommen.....	65
Abb. 73 Unterschiedliche bruchtektonische Situationen.....	65
Abb. 74 Granitintrusion in Marmor und Schiefer.....	65
Abb. 75 Lage des Grundwasserspiegels.....	66
Abb. 76 Bohrrasterdichte.....	67
Abb. 77 Orientierte Probennahme.....	69
Abb. 78 Anzahl an Kluftfamilien.....	69
Abb. 79 Streichen und Einfallen der Kluftfamilie.....	69
Abb. 80 Beschreibung der Trennflächenrauigkeit (Brown, 1981).....	70
Abb. 81 Kluftöffnungsweiten.....	70
Abb. 82 RQD Bohrkern-Auswertung (DEERE & DEERE, 1988).....	70
Abb. 83 Mittlerer Trennflächenabstand.....	71
Abb. 84 Ermittlung der durchschnittlichen Rohblockgröße nach SINGEWALD (1992).....	71
Abb. 85 Spannweiten von Hohlräumen im Gestein in Abhängigkeit vom RMR (WANG et al., 2002).....	72
Abb. 86 Geological Strength Index - GSI (HOECK 1998).....	72
Abb. 87 Q-System und Hohlraumdimensionierung (BARTON & GRIMSTAD, 1994).....	73
Abb. 88 Korrelation von RMR und Q (BIENIAWSKI, 1989).....	73
Abb. 89 Spannweiten von ungesicherten Hohlräumen in Abhängigkeit von RMR-Wert und Q-Faktor (BIENIAWSKI, 1989).....	74
Abb. 90 Lage der Spannungen Sigma 1 (σ_1) und 3 (σ_3) im Gebirge.....	74
Abb. 91 Spannweite von Hohlräumen mit Festen.....	75
Abb. 92 Spannweite von Hohlräumen ohne Festen.....	75
Abb. 93 Festenhöhe.....	75
Abb. 94 Höhe der Hohlräume ohne Festen.....	76
Abb. 95 Maximale und minimale Festenbreite.....	76
Abb. 96 Breiten/Höhenverhältnis von Festen.....	76
Abb. 97 Entfernung zwischen dem Eingangsbereich der Mine und dem Versatzbereich.....	78
Abb. 98 Tagebau von DMCO mit den Eingängen zu Site A und Site B.....	80
Abb. 99 a-c 3D-Darstellung des untertägigen Hohlraumes von DMCO (A) mit möglichen Erweiterungen (B) und dem Kontakt zum Schiefer (C). Die geologische und geotechnische Situation wurde in Surpac2000 modelliert.....	81
Abb. 100 Schematische 3D-Darstellung des untertägigen Versuchs-Abbaus im Steinbruch von CCLL (grüne Achse N).....	

.....	82
Abb. 101 Geologische Detailkarte des Steinbruches von DMCO. Zwei Störungen sind auskartiert, die den Tagebau in zwei Bereiche unterteilen.....	83
Abb. 102 Trennflächenanalyse im Bereich von CCLL mit zwei Trennflächenfamilien (Quelle CNR).	84
Abb. 103 Kritischer Winkel von Trennflächen in Marmorfesten.	84
Abb. 104 Durch Entspannung entstandene oberflächennahe Trennflächen im Zugangsbereich von DMCO.	85
Abb. 105 Trennflächenentstehung im Randbereich eines Steinbruches und die Auswirkungen auf einen untertägigen Hohlraum.....	86
Abb. 106 Formatieren eines Rohblockes untertage mit einem hydraulischen Bohrerhammer.	87
Abb. 107 Auswirkung von Störungssystemen und Verkarstung auf die Dimensionierung untertägiger Hohlräume.	88
Abb. 108 Abbaukammern mit verkarsteten Trennflächen und Karsthöhlen im untertägigen Abbau von CCLL.	88
Abb. 109 Grubenriss des Weißwasserbruches mit der experimentellen Abbaukammer (mod. Grubenriss von LASA Marmo S.p.A.).....	90
Abb. 110 Abbaukammern von CCLL. Die Höhendifferenz zwischen Sohle I und II (Δh) beträgt ca. 6 Meter.	90
Abb. 111 Der Winkel zwischen Bohrung und Trennflächen beeinflusst den RQD-Wert (PALMSTRÖM, 1995).	92
Abb. 112 Primärblockgröße ermittelt nach der SINGEWALD Methode.	93
Abb. 113 Beispiel einer für die Ermittlung der mittleren Primärblockgröße nach der SINGEWALD-Methode verwendeten Teilaufnahme der Firste in LASA.	93
Abb. 114 Oben: Trennflächen-Aufnahme im Aufschluss. Unten: In RESOBLOK erfasstes und dargestelltes Trennflächenmodell.	94
Abb. 115a und b RESOBLOK Modell DMCO Site A. Blockmodell nach Richtung 36° N gedreht.....	95
Abb. 116 Auf- und Seitenansicht eines modellierten Trennflächensystems und der daraus abgeleiteten Primär- und Rohblöcke $\leq 50\text{m}^3$	96
Abb. 117 Wie Abb. 116, aber mit Orientierungen des simulierten Hohlraumes und möglicher Rotation, um eine bessere Ausnutzung des Primärblockgefüges zu erhalten. Rechts (in rot) die Teufenlage des Hohlraumes und das zu erwartende Blockgefüge beim Auffahren liegender Bereiche des Grubengebäudes in der Seitenansicht.	96
Abb. 118 Richtungsrose in den RESOBLOK-Simulationen mit Himmelsrichtungen und Z- Achse (ground=g).	97
Abb. 119 Summenhäufigkeitsverteilung des Primärblockvolumen im Vergleich.	99
Abb. 120 Grubenriss der aufgefahrenen untertägigen Hohlräume DMCO Site A & B mit Festen und Kammern. Gelb sind die möglichen Erweiterungen der Hohlräume gekennzeichnet (Quelle DMCO).	100
Abb. 121 Blockmodell der Richtungen 306° (Ansicht von oben) und 36° (Ansicht von unten) N DMCO Site A.	101
Abb. 122 Blockmodell mit einer Orientierung des Hohlraumes in Richtung 36° N für DMCO Site A mit zusätzlichen Trennflächen durch die Auffahrung des simulierten Hohlraumes.	102
Abb. 123 Blockmodell mit einer Orientierung des Hohlraumes nach 306° N für DMCO Site A mit zusätzlichen Trennflächen durch die Auffahrung des simulierten Hohlraumes.	102
Abb. 124 Blockmodell mit Blöcken kleiner 50 m ³ für DMCO A (Richtung 36°). dargestellt in der realen Abbausituation Oben: Surpac2000 Darstellung des untertägigen Hohlraumes; Unten: 3D Modell derselben Situation als Seitenansicht in VRML.	103
Abb. 125 Blockmodell für DMCO Site A mit Orientierung des Modells nach 330° in Richtung des Störungssystems. ..	103
Abb. 126 Blockmodell mit der Orientierung 240° DMCO Site A ohne modellierten Hohlraum (oben) und mit modelliertem Hohlraum (unten).	104
Abb. 127 Blockmodell mit der Orientierung 180° DMCO Site A. Oben ohne, unten mit virtuellem Hohlraum.	104
Abb. 128 Blockmodell mit der Orientierung 36° DMCO Site B. Oben ohne, unten mit virtuellem Hohlraum.	105

Abb. 129 Blockmodell mit der Orientierung 212° für DMCO Site B. Oben ohne, unten mit virtuellem Hohlraum.	106
Abb. 130 Blockverteilung DMCO Site B. Richtung 212° stellt das weitständige Trennflächensystem mit den relativ wenigen geringvolumigen Rohblöcken dar (in Surpac2000).	107
Abb. 131 Grubenriss von LASA, Ausschnitt mit Testfeste und Abbaukammern mit den optionalen Abbaurichtungen (schraffiert).	107
Abb. 132 Blockmodell Richtung 105° für Lasa oben ohne, unten mit Schnittfolgen für den virtuellen Hohlraum.	108
Abb. 133 Blockmodell Richtung 62° für LASA, oben ohne, unten mit Schnittfolgen für den virtuellen Hohlraum.	108
Abb. 134 Blockmodell Lasa in der Seitenansicht. Der virtuelle Hohlraum ist in die reale Grubenkonstellation projiziert. Die aufgespannte Fläche ist die untere Ebene des Hohlraumes, von dem aus über die eingezeichnete Rampe die Abbaukammern erreicht werden (Surpac2000, Seitenansicht).	109
Abb. 135 Blockmodelle Lasa mit Blöcken kleiner als 50m ³ , oben Orientierung in Richtung 105°, unten Orientierung in Richtung 62°. Ebene des Hohlraumes, von dem aus über die eingezeichnete Rampe die Abbaukammern erreicht werden (Surpac2000, Seitenansicht).	109
Abb. 136 Grubenriss der Grube von CCLL mit Testfeste und Hohlräumen. Gelb die möglichen Erweiterungen.	110
Abb. 137 Blockmodell für CCLL Richtung 205° mit virtuellem Hohlraum.	110
Abb. 138 Blockmodell Richtung 40° für Levigliani. Das Modell ist in der Dimension der realen Abbaukammer angepasst.	111
Abb. 139 Blockmodell mit Blöcken kleiner als 50 m ³ im Modell Levigliani. Oben dargestellt die Aufsicht in Surpac2000 mit eingezeichneter Zone der Häufung von Blöcken kleiner als 50m ³ , unten das entsprechende 3D-Modell in VRML.	111
Abb. 140 Blockverteilung in Abhängigkeit von der Orientierung eines möglichen untertägigen bergmännischen Hohlraumes (* von 100%, ** Nach Schnitt des virtuellen Hohlraumes eines Abbaus).	112
Abb. 141 Hohlraum in einem homogenen Gesteinskörper (A) der von einer Störung durchzogen wird und die daraus entstehenden Deformationen an einer darin aufgefahrenen Feste (B) (PANDE et al. 1990).	116
Abb. 142 Einfluss der unterschiedlichen Raumlage von Trennflächen auf eine Feste (PANDE 1990).	116
Abb. 143 Bei unterschiedlicher Festengeometrie wird die durchschnittliche Festigkeit (Standfestigkeit (σ_p)) unterschiedlich berechnet (Hoek & Brown, 1980).	117
Abb. 144 In 3DEC modelliertes Trennflächenmodell eines untertägigen Hohlraumes basierend auf dem RESOBLOK-Modell zur Ermittlung instabiler Blöcke.	117
Abb. 145 Modellierter Abbaufortschritt in RESOBLOK-Modell (rechts). Ausgangspunkt der 3DEC Simulation mit Abbaufortschritt links (DMCO Site B, modelliert von POLITO 2002).	118
Abb. 146 Profildarstellung des Hohlraumes (Höhe 4,3 m, Breite 43 m) und von DMCO Site B mit instabilen Blöcken in der Firste. Mögliche Fallrichtungen der Blöcke sind mit einem Pfeil gekennzeichnet (modelliert von POLITO, 2002).	118
Abb. 147 Einfluss des durchschnittlichen Druckes auf die Festen (für eine Feste mit 13,5 m Seitenlänge); als Linien eingezeichnet jeweilige Überdeckung (Overburden) in m auf das Extraktions-Verhältnis (Extraction Ratio) e. Die Werte für die Festen des CAD-PUMA Projektes sind jeweils eingetragen.	119
Abb. 148 Hohlraumweite und Mächtigkeit des Deckgebirges in den Abbaukammern der beteiligten Industriepartner.	120
Abb. 149 3D-Modell des experimentellen Abbaus in Lasa, Kammer und Feste im Marmor mit mächtiger Überdeckung durch Schiefer (Festenbreite in Lasa 20x20m).	121
Abb. A1: Häufigkeitsverteilungen (Histogramme) der logarithmierten Primärblockgrößen [in m ³] mit dem RESOBLOK-Trennflächenmodell für die möglichen Orientierungen der untertägigen Hohlräume (siehe Kap. 7.1.2).	131

Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1: Naturstein und Naturstein-produkte in DIN EN Normen</i>	3
<i>Tabelle 2: Entwicklungen von Wissensbasierten Systemen und Expertensystemen für die Exploration und Gewinnung von Mineralischen Rohstoffen.</i>	12
<i>Tabelle 3: Dimensionierung der zu erreichenden Feste und Kammern.</i>	16
<i>Tabelle 4: Durchschnittliche Werte für Rohdichte, Wasseraufnahme und Kalziumkarbonat-Anteil (aus BÖRNER & HILL, 2002 und Cramer, 2004)</i>	20
<i>Tabelle 4: Lithostratigraphische Abfolge und aufgeschlossene Einheiten im Steinbruch von DMCO.</i>	28
<i>Tabelle 5: Verwendete Programme im WBS.</i>	50
<i>Tabelle 6 Anzahl der untersuchten Gesteinsproben aus den drei Steinbrüchen.</i>	51
<i>Tabelle 7: Auszug aus dem Quellcode der Regelbasis GEO für die Inferenzmaschine.</i>	53
<i>Tabelle 8: Geotechnische Eigenschaften (Mittelwerte) des Marmors aus den 3 untertägigen Betrieben (aus GERMANN et al. (2000); Daten von CNR):</i>	68
<i>Tabelle 9: Bewertung der Eingabe ins WBS anhand des Ratings und der ermittelten Werte (Auswahl) für die untertägigen Pilot-Abbaue</i>	79
<i>Tabelle 10: Beispiel einer Konfigurationsdatei für RESOBLOK</i>	95
<i>Tabelle 11: Orientierungen möglicher untertägiger Hohlräume in der Trennflächensimulation von RESOBLOK.</i>	97
<i>Tabelle 12: Tabellarische Aufstellung einer statistischen Auswertung der in RESOBLOK modellierten Blockverteilung.</i>	98
<i>Tabelle 13: Ermittelte Blockverteilung in Abhängigkeit von der Orientierung eines möglichen untertägigen bergmännischen Hohlraumes.</i>	113
<i>Tabelle 15: Übersicht ausgewählter Klassifizierungssysteme für geomechanische Eigenschaften von Hartgesteinen.</i>	115
<i>Tabelle 14: Festendimensionierung und Extraktionsverhältnis Ratio der Festen im Projekt CAD-PUMA.</i>	119
<i>Tabelle A1: Detailaufnahme eines Trennflächengefüges</i>	131
<i>Tabelle A2: Auszug aus dem Fragebogen für die erste Erhebung in der ersten Phase des CAD-PUMA Projektes. Die gesammelten Informationen aus den Interviews Vorort bei den Steinbruchbetreibern werden in tabellarischer Form festgehalten und bewertet.</i>	133
<i>Tabelle A3: Dateiauszug eines in RESOBLOK modellierten Trennflächenkörpers. Mit id sind die Blöcke indiziert. Die Position des gravimetrischen Schwerpunkt (x, y, und z) und ein Volumen in m³ sind beschreibende Merkmale des Blockes. „Free“ bezeichnet eine Variable, ob der Roh-oder Primärblock an den modellierten Hohlraum angrenzt (1) oder nicht (0).</i>	133

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Der Tagebau auf Natursteinvorkommen in der EU wird in den nächsten Jahren immer mehr durch striktere Umweltauflagen reglementiert werden. Staub- und Lärmvermeidung, sowie Landschaftsschutz fordern von den Betreibern besondere Maßnahmen. Umweltauflagen erschweren das Erschließen und die Gewinnung von Naturwerksteinen zunehmend. Die oberflächennah anstehenden Vorräte werden immer geringer.

Die Betreiber von Natursteingewinnungsanlagen suchen nach Möglichkeiten und Hilfen, die ihnen den ökonomischen Abbau trotz dieser ökologischen Auflagen ermöglichen. Der Abbau soll zukünftig die Umweltauflagen erfüllen, und dennoch möglichst optimale Qualität bei größter möglicher Menge unter den strengen Kriterien der maximal möglichen Sicherheit liefern.

Die Gewinnung des Naturwerksteins Marmor wurde schon vor vielen Jahren in einigen wenigen Steinbrüchen aufgrund der oben genannten Einschränkungen teilweise nach Untertage verlagert.

In der vorliegenden Arbeit wurden auf geowissenschaftlicher Grundlage Entscheidungshilfen für den Übergang vom Steinbruch zum Untertagebetrieb entwickelt. Die Erfassung der wesentlichen Lagerstätten- und Rohstoffeigenschaften für die Gewinnung im Steinbruch nicht zugänglichen Verbreitungsgebiete werden vorgestellt und diskutiert.

Die Ergebnisse von Untersuchungen in drei Marmorgewinnungsbetrieben in Italien (Lasa, Carrara/Versilia) und Griechenland (Penteli) werden dargestellt.

Als Rahmenprojekt diente für die vorliegende Dissertation das EU geförderte Projekt CAD-PUMA (siehe dazu Kap. 2.4).

1.2 Naturwerksteine (*Dimension Stones*) als Mineralische Rohstoffe

1.2.1 Nomenklaturen und Normen

Die DIN EN 12670 definiert Naturstein (Naturwerkstein) als ein natürlich vorkommendes Gestein, das im Bauwesen und für Denkmäler verwendet wird. Alle natürlichen Gesteine, die in Quaderform zum Zwecke der Weiterverarbeitung abgebaut werden, können als Naturwerkstein bezeichnet werden (NELLES, 1995, LORENZ & GWOSDZ, 2003).

Das Ausgangsprodukt und die Größe sind bei der Charakterisierung von Naturwerkstein zwei wesentliche Punkte. Man unterscheidet abhängig von der Einheitsgröße des Rohproduktes Großwerkstein-Einheiten und Kleinwerkstein-Einheiten.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit den Großwerkstein-Einheiten, die im Tagebau oder Tiefbau als Rohblöcke aus den Primärblöcken des Gebirges gewonnen werden. Von der Gewinnung und Verarbeitung zum Fertigerzeugnis sind auch die Zwischenprodukte als handelsübliche Waren sehr wichtig. Rohblöcke und Unmaßplatten werden zur Herstellung des Endprodukts in der zuliefer- und weiterverarbeitenden Industrie gehandelt. Die DIN EN 1467 definiert einen Rohblock aus Naturstein als unförmigen Rohblock, ohne regelmäßige Form und Größe und als zugerichteten Block, der annähernd der geometrischen Form eines Quaders entspricht (Abb. 1). Die Bruttomaße eines Blockes ergeben sich aus den Kantenlängen des kleinsten umschreibenden Quaders. Die Nettomaße ergeben sich aus dem rechtwinkligen eingeschriebenen Quader ohne vertiefende Flächen und Bohrlöcher.

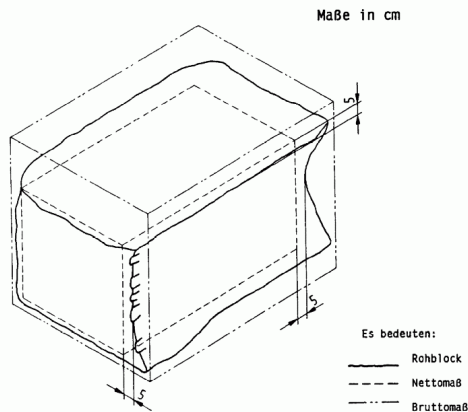


Abb. 1 Rohblock, Netto- und Bruttomaß, DIN EN 1467.

Nach DIN EN 1467 sind bei der Ermittlung des Nettoblockes die Seitenlängen um weitere 5 cm, d. h. um den so genannten „Bruchzoll“ zu reduzieren. Die Unmaßplatte, die auch als Rohplatte (DIN EN 1468) oder oft nur als Platte bezeichnet wird, entsteht aus parallelen Schnitten durch einen zugerichteten Rohblock. Beim Schneiden der Platten werden oft Gatter- und Seilsägen eingesetzt, durch die ebene Flächen und unbearbeitete Ränder entstehen. Diese Rohplatte ist bemessen aus den Bruttomassen der Kantenlängen des kleinsten umschriebenen Rechtecks. Die Nettomaße einer Rohplatte ergeben sich aus dem größten einbeschriebenen Rechteck.

Aus gewonnenen Großwerkstein-Einheiten werden in der Regel verkaufsfähige Rohblöcke zum Zwecke der Veredelung in Fassadenbauplatten, Natursteinfliesen, Dekorations- und Denkmalsteine hergestellt. Einheiten, die als Schieferplatten, Pflaster-, Bau- und Bordsteine auf den Markt kommen, sind aus den oben erwähnten Kleinwerkstein-Einheiten entstanden. Eine detaillierte Liste der Anforderung bezüglich der Eigenschaften und Dimensionierung von Natursteinprodukten im Allgemeinen geben LORENZ & GWOSDZ (2003 a).

Die Anforderungen, die an Natursteine häufig gestellt werden, sind hohe Dichte, Verschleißfestigkeit, Kantenfestigkeit, Wetterbe-

ständigkeit sowie eine hohe chemische Verwitterungsbeständigkeit.

Die verschiedenen geologischen Lagerstättentypen, die für die Natursteingewinnung relevant sein können, sind derzeit noch selten modellhaft klassifiziert oder detailliert beschrieben. Die bisherigen geowissenschaftlichen Untersuchungen erlauben unter Berücksichtigung der wissenschaftlichen Nomenklatur aber eine exakte Gesteinsbezeichnung, die häufig von der Handelsbezeichnung abweicht. Grundlegend sind hierbei mineralogische und petrologische Untersuchungen des Gesteins. Ein wichtiges Kriterium der Klassifizierung ist in der Praxis die Härte, die eine anwendungsorientierte Eigenschaft des Gesteins darstellt. Prinzipiell unterscheidet man Hart- und Weichgesteine. Zu den Hartgesteinen zählen sowohl magmatische Gesteine wie Granite und Basalte, als auch Metamorphite wie Migmatite und Orthogneise. Die hohe Härte zeichnet diese Gesteine in der Praxis durch eine höhere Widerstandsfähigkeit gegen Abrieb aus. Demgegenüber gibt es Weichgesteine, zu denen Tuffe und alle Sedimentgesteine, wie Kalksteine, Travertine und auch die Marmore gehören.

Der Handelsname der Natursteinprodukte leitet sich nicht nur vom Gesteinstyp ab. Viele der Handelsnamen wurden aus dem Sprachgebrauch der Steinbrucharbeiter oder von populärsprachlichen landesspezifischen Namen abgeleitet. Die DIN EN 12670 definiert für den europäischen deutschsprachigen Raum die Terminologie von Naturstein bezüglich geologischer und petrographischer aber auch populärer und kommerzieller Bezeichnung.

Es existiert eine Reihe von DIN EN Normen mit für den Naturwerkstein relevanten Inhalten (Tabelle 1).

Tabelle 1: Naturstein und Natursteinprodukte in DIN EN Normen

DIN EN	Produktnormen
776-1	Festlegung für Mauersteine – Natursteine (E)
1341	Platten aus Naturstein für Außenbereiche - Anforderungen und Prüfverfahren
1342	Pflastersteine aus Naturstein für Außenbereiche - Anforderungen und Prüfverfahren
1343	Bordsteine aus Naturstein für Außenbereiche - Anforderungen und Prüfverfahren
1467	Rohblöcke (E)
1468	Halbfertigerzeugnisse (Rohplatten) (E)
1469	Fertigerzeugnisse, Bekleidungsplatten (E)
12057	Fertigerzeugnisse, Fliesen (E)
12058	Fertigerzeugnisse, Bodenplatten und Stufenbeläge (E)
12059	Fertigerzeugnisse, Steine für Massivarbeiten (E)
12440	Naturstein - Kriterien für die Bezeichnung
12670	Terminologie von Naturstein
DIN EN	Prüfnormen
1925	Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten infolge Kapillarwirkung
1926	Bestimmung der Druckfestigkeit
1936	Bestimmung der Reindichte, der Rohdichte, der offenen Porosität und der Gesamtporosität
12370	Bestimmung des Widerstandes gegen Kristallisation von Salzen
12371	Bestimmung des Frostwiderstandes
12372	Bestimmung der Biegefestigkeit (Mittellinienlast)
12407	Petrographische Prüfung
13161	Bestimmung der Biegefestigkeit (konst. Moment)
13364	Bestimmung der Ausbruchlast am Ankerdornloch
13373	Bestimmung der Maße und anderer geometrischer Merkmale
13755	Bestimmung der Wasseraufnahme bei atmosphärischem Druck
13919	Bestimmung der Beständigkeit gegen Alterung durch SO ₂ - und Feuchteeinwirkung
14066	Bestimmung des Widerstandes gegen Alterung durch Wärmeschock
14146	Bestimmung des dynamischen Elastizitätsmoduls (E)
14147	Bestimmung der Beständigkeit gegen Alterung durch Salzsprühnebel (E)
14157	Bestimmung des Widerstandes gegen Verschleiss (E)
14158	Bestimmung der Bruchenergie (E)
14231	Bestimmung des Gleitwiderstandes mit Hilfe des Pendelprüfgerätes
14579	Bestimmung der Geschwindigkeit der Schallausbreitung(E)
14580	Bestimmung des statischen Elastizitätsmoduls (E)
14581	Bestimmung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten (E)

(E) = Entwurf

1.2.2 Wirtschaftliche Bedeutung

In Deutschland hat die Marmorwerkstein-Gewinnung aktuell keine Bedeutung mehr. Der einzige namhafte deutsche Marmor als

Naturwerkstein wurde bis 1950 in Auerbach bei Bensheim an der Bergstrasse gewonnen (BÖRNER & HILL, 2002). Marmor (Dolomitmarmor in Lengefeld, Kalzitmarmor in Hermsdorf) wird derzeit in Deutschland in bedeutendem Maße als Füllstoff, selten als Rohblock nur bei den Erzgebirgischen Kalkwerken GmbH¹ gewonnen.

Aktuelle Wirtschaftsdaten zu Naturwerksteinen in europäischen, teilweise auch im internationalen Raum liefert die Website www.stonereport.de. Das Jahr 2003 war für die Natursteinindustrie eines der schlechtesten der vergangenen Jahre. Irakkrieg und Euroentwicklung lassen europaweit die Märkte stagnieren. Die letzten umfassenden Zahlen liegen aus dem Jahr 2001 vor. Danach betrug die gesamte Weltproduktion von Naturstein 2001 fast 69 Mio. Tonnen an Rohmaterial. Davon werden in Europa 22 Millionen Tonnen und in Asien 27 Mio. Tonnen gewonnen. Nach einer Schätzung des Deutschen Natursteinverbandes werden in Deutschland ca. 23 Millionen m²/a Naturstein verbraucht². Stellt man die statistischen Daten für Importe und Exporte von Roh- und Fertigwaren für Europa einschließlich der osteuropäischen Länder denen von Asien gegenüber, so ist festzustellen, dass Europa im Bereich Marmor und Kalkstein rund 1,4 Millionen Tonnen importierte, gleichzeitig aber fast 3,6 Millionen Tonnen exportierte. Asien importierte 1,7 Millionen Tonnen und exportierte 460 000 Tonnen. Europa liegt somit beim weltweiten Export von Weichgesteinen mit über 3 Millionen Tonnen deutlich vor Asien.

Beim Granit in roher und bearbeiteter Form zeigt die Statistik der Im- und Exporte ein anderes Bild: Europa importierte 7 Millionen Tonnen und exportierte knapp 4 Millionen Tonnen, Asien importierte knapp 6 Millionen Tonnen und exportierte über 6 Millionen Tonnen. Europa liegt somit bei Hartgesteinen

¹ (<http://www.geomin.de>)

² (<http://www.stonereport.com>)

im Bereich Import um 1,1 Millionen Tonnen im Überschuss, beim Export führt Asien mit 2,6 Millionen Tonnen.

Die Naturstein-Industrie verzeichnete jährliche Wachstumsraten von bis zu 10 Prozent. Man rechnet in Expertenkreisen mit durchschnittlichen Steigerungsraten von bis zu 8,3 Prozent bis ins Jahr 2025. In der Europäischen Union leben heute sechs Prozent der Weltbevölkerung, die 40 Prozent des weltweiten Natursteinbedarfs produzieren. Jährlich exportiert die EU mehr als 9,5 Millionen Tonnen Halbfertig- und Fertigprodukte aus Naturstein – das sind über 41 Prozent des Weltbedarfs. Dazu importiert die EU jährlich über neun Millionen Tonnen, das entspricht fast 40 Prozent der Weltproduktion. Im Durchschnitt konnten die Länder der Europäischen Union in den vergangenen Jahren beim Export ein Wachstum von fast fünf Prozent, beim Import von über sieben Prozent verzeichnen. Letzterer Wert entspricht dabei der weltweiten Tendenz, während das Wachstum beim Export langsamer war, vor allem aufgrund des sehr geringen Wachstums der italienischen Exporte. Exportschlager der EU sind zur Zeit Rohblöcke aus Kalksteinen (incl. Marmoren), hier hat sich in den vergangenen Jahren der Export mehr als verdoppelt. Importiert werden vor allem normierte Halbfertig- und Fertigprodukte, Unmaßplatten und Fliesen. Trotz des Wachstums der Natursteinmärkte im Fernen Osten konnte Europa seine führende Rolle am Weltmarkt der Natursteine damit bestätigen. Die wichtigsten Naturstein-Verbraucherländer der EU sind Deutschland, Frankreich und die Niederlande. Insgesamt verzeichnet der europäische Natursteinsektor ein weitaus größeres Wachstum als andere Märkte in der EU. Europa bleibt so die Konjunkturlokomotive der weltweit agierenden Natursteinbranche ³

³ (www.stonereport.de).

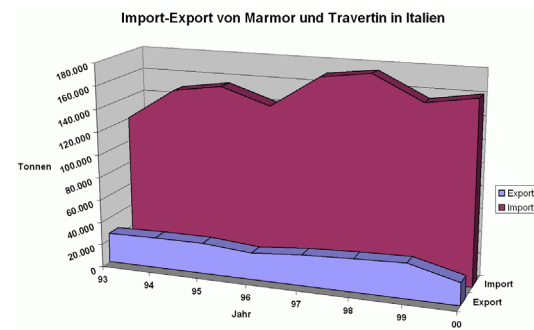


Abb. 2 Import-Export von Marmor und Travertin Italiens. (LABORAZIONE DA ICE SU FONTE ISTAT., 2002).

Aber auch in den USA ist Naturstein ein Wachstumsmarkt. Der Verbrauch an Naturstein hat sich seit 1997 bis 2002 mehr als verdoppelt (LOESBY, 2003)

Der tatsächliche lokale Verbrauch lässt sich aber nicht immer eindeutig an den Import-Export Daten von Rohblöcken ablesen.

In Italien hat sich eine bedeutende weiterverarbeitende Industrie entwickelt, die Marmorprodukte in alle Welt exportiert (Abb. 2). Die eigenen Reserven Italiens reichen dabei nicht, um die heimische weiterverarbeitende Industrie zu versorgen, und so wird Rohmaterial zusätzlich importiert, um es weiterverarbeitet dann wieder zu exportieren.

1.3 Methoden der Gewinnung von Naturwerksteinen

Die Gewinnung von Naturstein ist in erster Linie abhängig von dem Lagerstätten- und dem verwitterungsbedingten Aufschlusstyp. Die Natursteinlagerstätten können somit in

- lose Boulderformationen,
- semi-feste Formationen
- und feste Formationen

unterteilt werden (NELLES, 1995). Eine besondere Stellung bei der Gewinnung nehmen die Boulder-Lagerstätten ein. Es sind Hartgesteine, in der Regel Granite, die zu großen kugeligen Aggregaten verwittert, in einer Matrix aus Verwitterungsresten, Sanden und tonigen Komponenten eingebettet sind und mit Hilfe von Löffelbaggern geborgen werden. Problematisch ist bei Boulder-Lagerstätten die Qualität des gewonnenen Materials. Die Verwitterung kann am Ausgangsgestein unterschiedlich tiefgründig einwirken. Die Qualität des Natursteins ist deshalb oft nicht kontinuierlich. Aus diesem Grunde werden Boulder-Lagerstätten meist von Kleinstbetrieben abgebaut, die mit einfachen Mitteln ausgestattet sind und geringe Mengen mit schwankenden Qualitäten gewinnen.

Es überwiegen jedoch die semi-festen und festen Formationen in der Gewinnung.

Magmatische, sedimentäre und metamorphe Natursteinvorkommen können nach ihrer Lagerungsform unterschieden werden. Während die magmatischen, vulkanischen Gesteine teilweise relativ unregelmäßige und stark wechselnde Lagerungsformen aufzeigen, sind die sedimentären und metamorphen Gesteine oft stratiform und über weite Strecken ausgedehnt konstant in ihren Lagerungsverhältnissen entwickelt.

Die Lagerstättentypen der semi-festen und festen Formation werden mit Gewinnungstechniken gewonnen, bei denen mit Schneiden, Bohren, Sprengen oder Flammen, die zu gewinnenden Blöcke aus dem Gesteinsverband gelöst werden. Bei diesen Gewin-

nungsmethoden steht im Vordergrund, das begleitende Gestein nicht zu zerstören. Sind keine natürlichen Trennflächen vorhanden, müssen künstliche geschaffen werden, um auf schonende Weise die Primärblöcke aus dem Gesteinsverband zu lösen. Die Abbauverfahren im Festgestein sind vielfältig. Die folgenden Lösetechniken werden eingesetzt:

- Reihen- und Schlitzbohrverfahren
- Federkeilverfahren
- Seilsägeverfahren
- Schrägverfahren
- Sprengen
- Flammenschneidverfahren
- Wasserschneidverfahren

Einige Verfahren schließen sich abhängig von der Mineralzusammensetzung der Natursteine bei der Gewinnung von vornherein aus. So basiert das Flammenschneidverfahren z. B. auf dem thermischen Verhalten des Minerals Quarz, das sich unter hohen Temperaturen ausdehnt und damit aus dem Gesteinsverband herausbricht. Der Quarzstaub wird dann herausgeblasen. Der Naturstein Marmor enthält jedoch so wenig Quarzanteile, dass dieses Verfahren für den Abbau nicht angewendet werden kann. Im Übrigen würde es bei den eingesetzten Temperaturen zur Dissoziation des Kalziumkarbonats kommen. Auch Wasserschneidverfahren werden derzeit aus Kostengründen noch nicht in der Gewinnung von Marmor eingesetzt. In der Marmorgewinnung werden hauptsächlich Seilsäge- und Schrägverfahren verwendet.

1.4 Optimierung der Gewinnung von Naturwerksteinen

Die Natursteingewinnung geht in der Regel von an der Oberfläche aufgeschlossenen Vorkommen dieser Ressourcen aus. Qualität und Vorkommen dieser Ressourcen sind in erster Linie durch geologische Parameter wie Lithologie, Lagerungsverhältnisse und Mächtigkeiten bestimmt. Durch den Gewinnungsprozess werden die Gesamtressourcen des Vorkommens bis hin zur Menge des Produktes reduziert (Abb. 3).

Elementare Produktionsfaktoren bei der Gewinnung von Mineralischen Rohstoffen sind Arbeit (Arbeitskräfte), Betriebsmittel (Kapital) und die Lagerstätte.

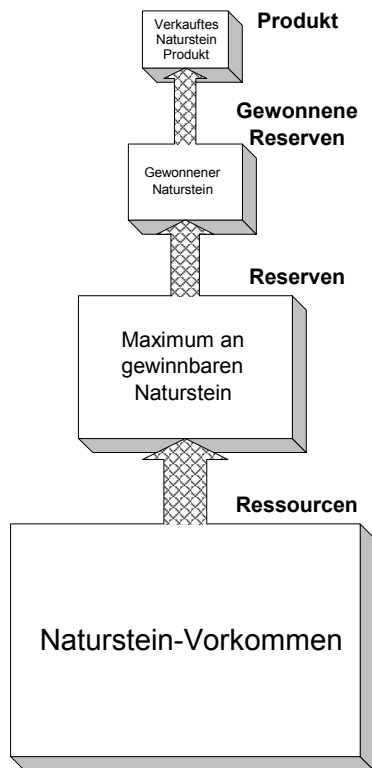


Abb. 3 Reduzierung der Ressourcen eines Natursteinvorkommens bis hin zum Produkt.

Ein Natursteinvorkommen wird durch die möglichen Gewinnungsstrategien auf die Menge reduziert, die ein Maximum des gewinnbaren Gesteins, die Reserven, umschreibt. Eine Änderung der Gewinnungsstrategie von der Gewinnung im Tagebau hin zur untertägigen Gewinnung ist ein maßgeblicher Faktor für die Erhöhung der Reserven. Die Faktoren, die die Reduzierung der Ressourcen auf die Reserve bedingen, sind aber vor-

wiegend nicht veränderbare, naturgegebene Parameter, z. B. die vorgefundenen geologischen Lagerungsverhältnisse und/oder hydrogeologische Einflussgrößen, die eine Erschließung verhindern oder die Dimensionierung von Hohlräumen im Festgestein bei der untertägigen Gewinnung von Naturstein beeinflussen. Die Reserve eines Natursteinvorkommens ist Ausgangspunkt aller wirtschaftlichen Betrachtungen, die über Natursteinvorkommen angestellt werden (siehe auch z. B. NEU, 2003).

1.4.1 Rohstoffwirtschaftliche, abbautechnische und ökologische Kriterien

Die Beurteilung von Ressourcen und Reserven hat zentrale Bedeutung bei der Bewertung der Wirtschaftlichkeit einer Lagerstätte. Ein rohstoffwirtschaftlicher Klassifizierungsschlüssel für die Beurteilung von Lagerstätten ist in jüngerer Zeit auf verschiedenen administrativen Ebenen an unterschiedlichen Lagerstättentypen diskutiert worden. In der Regel beziehen sich die Beurteilungsschlüssel jedoch auf Lagerstätten Mineralischer Rohstoffe und Energierohstoffe (UNITED NATIONS, ECONOMIC AND SOCIAL COUNCIL, 1997).

Klassifizierungsschemata, die auch auf Lagerstätten der Natursteine angewendet werden können, wurden von LORENZ et al. (2000) erstellt. Sie basieren auf dem oben zitierten Schlüssel der UN und weisen leichte Modifikationen auf.

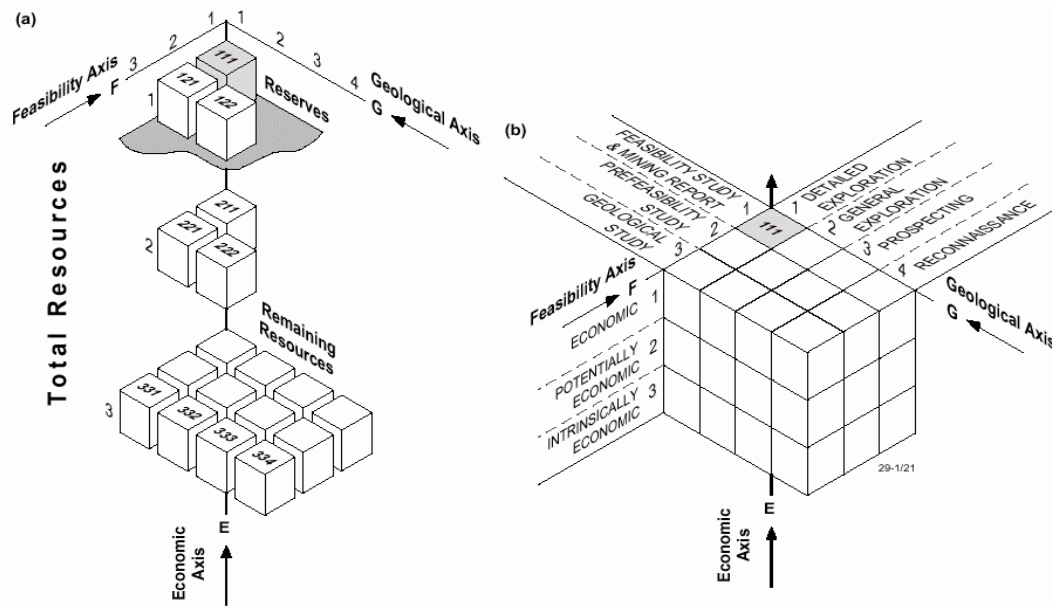


Abb. 4 United Nations Framework Classification (UNFC) — Solid Fuels and Mineral Commodities; (a) UNFC's E (Economic), F (Feasibility) and G (Geological) axes (b) Codified EFG classes (36 in total) potentially applicable using the UNFC (MCKAY et al., 2001).

Die Klassifikation in Abbildung 4 (MCKAY et al., 2001), kann in drei Achsen beschrieben werden. Der geologische Erkundungsgrad einer Lagerstätte reicht von der einfachen Aufsuchung (Reconnaissance) über die Prospektion, die generelle Exploration bis hin zur detaillierten Exploration. Die Feasibility-Achse beschreibt den Untersuchungsgrad der Lagerstätte in den Abstufungen einfache „geologische Studie“, „Prefeasibility-Studie“ und „Feasibility-Studie“. LORENZ et al. (2000) schlagen vor, die geologische Untersuchung um die Kategorie bauwürdig und potenziell bauwürdig zu erweitern.

Die dritte Achse beschreibt die ökonomischen Faktoren, die mit der Klassifikationsstufe latent bauwürdig beginnen und über potenziell bauwürdig bis hin zur Bauwürdigkeit reichen.

KELTER et al. (1999) haben diesen UN Rahmen-Vorratsklassifikationsschlüssel auf Lagerstätten der Steine-Erden-Industrie übertragen und um genehmigungspflichtige Aspekte hinsichtlich der Raumplanung erweitert. Dem entsprechend schlagen sie die Einteilung der Vorräte in drei Gruppen vor:

R1: Genehmigte Vorräte

R2: Genehmigungsfähige Vorräte (noch nicht genehmigt, aber z. B. raumplanerisch für Rohstoffgewinnung ausgewiesen)

R3: Derzeit nicht genehmigungsfähige Vorräte.

Eine zusammenfassende Beurteilung der in der vorliegenden Arbeit bearbeiteten Marmorlagerstätten wird im Kapitel 3.5.1 vorgestellt.

Mit wirtschaftlichen Aspekten und der nachhaltigen Nutzung von Lagerstätten mit Verkarstungserscheinungen – Marmorlagerstätten gehören dieser Gruppe an – hat sich ein Workshop der NATO Advanced Research Workshop befasst (SHIELDS & ŠOLAR, 2000). Er schlägt vor, dass Maßnahmen wie die Entwicklung von Computer-Programmen (Expertensystemen) zu Beurteilung von Karsterscheinungen vorangetrieben werden sollten. Ein Informationsaustausch soll helfen, die wirtschaftlichen, geologischen und kulturellen Einflüsse auf die Gewinnung von Mineralischen Rohstoffen aus Karst zu diskutieren.

1.4.2 Einsatz von Entscheidungshilfen bei Planung und Optimierung der Naturwerkstein-Gewinnung von Marmor

Entscheidungshilfen bei der Planung und Optimierung von Gewinnungsprozessen des Naturwerksteins Marmor sind derzeit nur begrenzt verfügbar. Qualitäten verschiedener Marmorvarietäten werden von den Steinbruchbetreibern kaum kartiert, sodass eine schnelle räumliche Übersicht über die Qualitätsverteilung Außenstehenden nicht möglich ist. Eine Detailkartierung über Trennflächen liegt in den seltensten Fällen vor. Meist werden Daten über Kluftsysteme nur dann erhoben, wenn mit Hilfe von statischen Methoden die Stabilität von einzelnen Festen nachgewiesen werden muss. Der Abbaufortschritt wird in der Regel dokumentiert, selten jedoch mit weiteren Informationen, wie dem tatsächlichen Ausbringen oder Abbauverlusten protokolliert.

Wissensbasierte Systeme werden zur abbaubegleitenden Beratung bisher nicht herangezogen. Die Entscheidung über den Abbauverlauf und den Abbaufortschritt wird in der Regel von einem erfahrenen Bergingenieur getroffen.

Bei der Weiterverarbeitung des Rohblocks wird derzeit ebenfalls kein rechnergestütztes System verwendet, um die hierbei ablaufenden Prozesse zu optimieren. Eine optische Beurteilung von Marmorfertigprodukten, die eine Klassifikation des Produktes in verschiedene Qualitäts- bzw. Preisklassen vornimmt, wird selten bis gar nicht durchgeführt. Bei den Industriepartnern des Projektes kam kein rechnergestütztes System in der Weiterverarbeitung der Rohblöcke zum Einsatz. Auch wenn die Rohblöcke wie im Falle einiger Betreiber selbst weiterverarbeitet wurden, kam es zur aktuellen Beurteilung von Qualitäten ausschließlich auf der Basis von Erfahrung einzelner Mitarbeiter.

2 Computergestützte, wissensbasierte Systeme in der Bergbauplanung

Das Forschungsprojekt, in dessen Rahmen die vorliegende Dissertation angefertigt wurde, hatte als Teilziel die Entwicklung eines Wissensbasierten Systems als Entscheidungshilfe zur Optimierung der untertägigen Marmorgewinnung definiert. Computergestützte wissensbasierte Systeme und Expertensysteme werden in zunehmenden Maße auch für Aufgaben in der Bergbauplanung eingesetzt. Die Abgrenzung der Begriffe „Wissensbasiertes System“ (WBS) und „Expertensystem“ (XPS) wird in der Literatur nicht immer eindeutig vollzogen. Beide Systeme sind Computerprogramme, die auf detailliertes Wissen eines fachspezifischen Experten aufbauen. Ein Expertensystem könnte als ein problemspezifisiertes „Wissensbasiertes System“ bezeichnet werden. In einem „Wissensbasierten System“ wird das fachspezifische Wissen explizit und unabhängig vom allgemeinen Problemlösungswissen über ein Problem- und Anwendungsgebiet dargestellt. Ein Expertensystem dagegen ist ein Programmsystem, das seine Verwendung darin findet, das Problemlösungsverhalten eines Experten zu simulieren. Die beiden Ausdrücke „Expertensystem“ und „Wissensbasiertes System“ werden jedoch häufig auch synonym verwendet (BIETHAHN & HOPPE 1991, CURTH, 1991). Expertensysteme und „Wissensbasierte Systeme“ sind Untermengen der „Künstlichen Intelligenz“ (KI) („Artificial Intelligence“ (AI), vgl. Abb. 5).

Der Begriff „Expertensystem“ hat in der Vergangenheit zu übertriebenen Erwartungen geführt. Potenzielle Anwender dieser Technologie lehnten sie ab oder verhielten sich abwartend ihr gegenüber. Expertensysteme sind mittlerweile jedoch allgegenwärtig und bei der Lösung von differenzierten Problemen ein vielversprechender Ansatz.

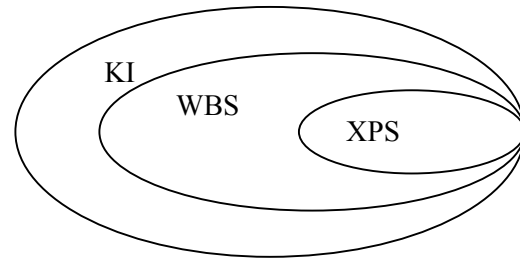


Abb. 5 Abgrenzung KI-Systeme, Wissensbasierte Systeme und Expertensysteme.

2.1 Der Einsatz von WBS und XPS

Expertensysteme eignen sich besonders zur Lösung komplexer Fragestellungen.

Konkret werden sie bei der Wiedererkennung von Mustern eingesetzt. Dazu zählen die Planung von Abläufen, die von einem Ausgangspunkt zu einem Zielpunkt führen, oder bei der eine Simulation von Zuständen unter konkreten Bedingungen stattfindet.

In der vorliegenden Arbeit kam eine kommerzielle Expertensystemshell (*Elements Environment*) der Firma HNC Software⁴ (ehem. Neurondata) zum Einsatz. In diese Shell ist das Regelwerk, das den untertägigen Abbau von Marmor beschreibt, übernommen worden.

2.2 Grundsätzlicher Aufbau und Leistungsfähigkeit von Expertensystemen

Ein XPS bzw. WBS ist aus einer Reihe funktionaler Komponenten aufgebaut (GABRIEL, 1992; SCHILCHER, 1991) (Abb. 6). Die Kernkomponenten sind die Wissensbasis, die Datenbasis und die Inference Engine (Inferenzmaschine). Diese Komponenten sind mit Hilfe von Systemschnittstellen verbunden. Es gibt eine Erklärungskomponente oder auch Dialogkomponente, die als Schnittstelle dem Benutzer die Kommunikation mit dem Datenverarbeitungssystem (DV System) ermöglicht.

⁴ <http://www.blazesoft.com>

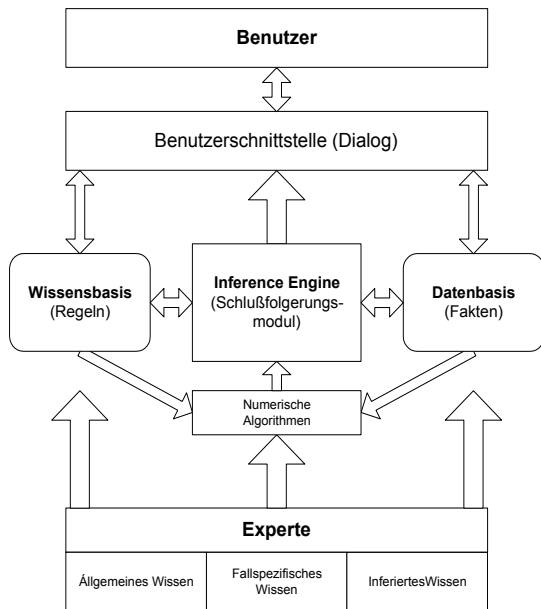


Abb. 6 Aufbau eines Expertensystems.

Der Experte entwickelt mit seinem speziellen Wissen die Wissensbasis sowie die Datenbasis und verknüpft diese mithilfe numerischer Algorithmen in der Inferenzmaschine. Das Wissen des Experten resultiert aus dem allgemeinen Wissen über die Problematik, dem fallspezifischen Wissen, und dem daraus abgeleiteten inferierten Wissen. In der Datenbasis sind Fakten über das Problem abgebildet, die als Objekte dargestellt werden. Um die Wissensbasis zu beschreiben, verwendet der Experte Lernprozesse, aus denen er seine Regeln in der Wissensbasis ableitet.

Aus Beobachtungen lernt der Experte die Problematik kennen und stellt eine Hypothese auf, die gegenüber früherem Wissen verifiziert wird. Daraus kann eine Vorhersage abgeleitet werden, die sich in einer Regel manifestiert. Dieser Prozess wird von RUSSEL und NORVIG (1995) als kumulatives Lernen bezeichnet.

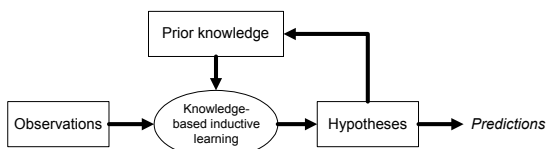


Abb. 7 Kumulativer Lernprozess (NORVIG, 1995).

Grundsätzlich muss zur Lösung eines Problems in einem „Wissensbasierten System“ Expertenwissen in Form von Heuristiken und Erfahrungswissen vorhanden sein.

Innerhalb der Datenbasis werden die Daten als Objekte repräsentiert. Das Wissen und daraus abgeleiteten Fakten werden als Regeln abgebildet. Die Fakten der Datenbasis werden strukturiert in dem XPS als die Variable „Objekt“ angelegt. Eigenschaften von Objekten der Datenbasis können an andere Objekte vererbt werden.

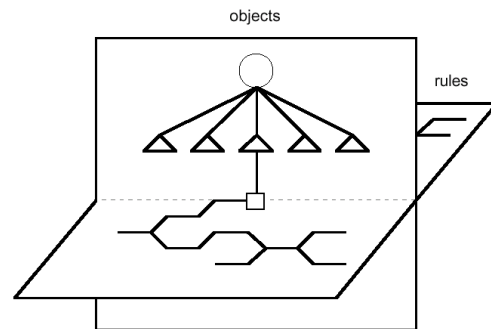


Abb. 8 Beziehung Objekte und Regeln.

Die Vernetzung der Objekte durch Regeln innerhalb der Wissensbasis kann man in verschiedenen Ebenen darstellen (Abb. 8).

Regeln haben z.B. die folgende Form:

wenn Bedingung erfüllt,
dann Konklusion.

Ein Beispiel aus dem Expertensystem PROSPECTOR (DUDA et al., 1980, aus RICH und KNIGHT, 1991) lautet:

If: magnetite or pyrite in disseminated or veinlet form is present
Then: (2, -4) there is favourable mineralization and texture for the propylitic stage.

PROSPECTOR, das in der Sprache Prolog entwickelt wurde, beurteilt eine Regel mit Schätzwerten. Die Vertrauenswürdigkeit einer Regel ist mit 2 bewertet, wenn sie realisiert wird; trifft sie nicht zu, wird sie mit -4 bewertet. Somit kann eine Abstufung in der Beurteilung der Regel vorgenommen werden. Die Verarbeitung der Regeln findet in der „Inferenz Engine“ statt. Die Inferenzma-

schine ist der Teil des Systems, der die eigentliche Bearbeitung der Wissensbasis leistet. Grundsätzlich können zwei Bearbeitungsrichtungen unterschieden werden. Die Rückwärtsverkettung (Backward-Chaining) wird benutzt, um zu überprüfen, ob eine Aussage aus der Wissensbasis ableitbar ist. Ist die Aussage in der Wissensbasis wahr, wird sie bestätigt. Ansonsten wird nach Regeln gesucht, deren Folgerungsteile diese Aussage enthalten, und es wird versucht, die Gültigkeit der Bedingungen dieser Regeln aus der Wissensbasis herzuleiten.

Bei der Vorwärtsverkettung (Forward-Chaining) werden ausgehend von einer Menge von Aussagen auf der Basis der in der Wissensbasis enthaltenen Regeln weitere Aussagen hergeleitet, das heißt alle Konsequenzen, die sich aus einer Ausgangssituation ergeben, ermittelt.

Beide Inferenzmechanismen können auch kombiniert werden, indem eine Situation vorgegeben und eine Hypothese zur Überprüfung benannt wird (MANCHE et al., 1990).

Die hier verwendete Expertensystemshell *Elements Environment* bietet zudem noch die Charakterisierung von Objekten (*Objects*). So können die Objekte in Klassen zusammengefasst werden (alle Objekte [z. B. Anzahl Sedimentkörner pro Volumeneinheit, Kornform, Korngröße, Porenraum, Schichtmächtigkeit], die eine Sedimentschicht beschreiben, können in der Klasse Sediment zusammengefasst werden.). Objekte können so genannte *Slots* haben, die Eigenschaften von Objekten beschreiben [z. B. die mineralischen Komponenten eines Korns wie Quarz]. *Meta-Slots* beschreiben das Verhalten dieser Slots. In einem Slot kann zum Beispiel ein Wert abgelegt werden, der sich nicht aus einer Regel entwickelt, sondern vorgegeben ist (Default Values). *Properties* eines *Objects* werden durch die Inferenz abgeleitet. Alle diese Eigenschaften von Objekten können während der Laufzeit des Programms erzeugt und verändert werden. Die Objekte wurden im vor-

leigenden Fall mit sinngebenden Variablen bezeichnet, um eine Übersichtlichkeit zu gewährleisten. Objekte mit dem Kürzel „Geo“ vorangestellt beschreiben zum Beispiel geologische Objekte der Wissensbasis.

2.3 Expertensysteme für Exploration und Gewinnung von Mineralischen Rohstoffen

Die ersten Computerprogramme im Bereich des Bergbaus wurden 1965 von LERCH und GROSSMANN entwickelt. Es waren einfache numerische Modelle, die im Tagebau Einsatz fanden. Erfahrungen mit Expertensystemen und „Wissensbasierten Systemen“ wurden auch an der TU Berlin in den Geowissenschaften und dem Bergbau schon vor Jahren gesammelt. Die Einsatzbereiche sind der Tabelle 2 zu entnehmen.

Die aus dem Bereich des Bergbaus zitierten Arbeiten (CHEIMANOFF & SCHLEIFER, 1990, BASU & LINEBERRY, 1992, CAMM & SMITH, 1992, MUTAGWABA & TEREZOPOULOS, 1994, MARTENS et al., 1997, FABIAN, 1998,

VOGT, 1999) sind zumeist speziell für qualitätsorientierte Produktionsplanungen entwickelt worden. Die beiden Systeme von FABIAN (1998) und VOGT (1999) verwenden Lineares Programmieren (LP), das immer dann eingesetzt werden kann, wenn das Planungsproblem mithilfe linearer Gleichungen und Ungleichungen formuliert werden soll. Das für den Bereich der Geothermie entwickelte System GEMS von HARADA et al. (1992) dient zur Beurteilung Geothermischer Systeme, basierend auf Bohrlochdaten. Bohrlochdaten werden auch in einem System von SHI et al. (1999) beurteilt, welches ein „Wissensbasiertes System“ darstellt und die Beurteilung des Monitoring kontrolliert.

Tabelle 2: Entwicklungen von Wissensbasierten Systemen und Expertensystemen für die Exploration und Gewinnung von Mineralischen Rohstoffen.

Jahr	Autor/-en	Einsatzbereich	Zweig
1990	CHEIMANOFF & SCHLEIFER	Kurzfristige Abbauplanung	Tiefbau, Erzbergbau
1991	BREUNIG et al.	Abbauplanung	Tagebau
1992	BASU & LINEBERRY	Abbauplanung, Bewetterung, Gebirgsmechanik	Tiefbau, Steinkohle
1992	CAMM & SMITH	Wahl des Abbauverfahrens, Projektbewertung	Tiefbau, Erz
1992	HARADA et al.	Geothermie	Beurteilung geothermischer Systeme
1994	MCCAMMON	Exploration	Mineralische Rohstoffe
1994	MUTAGWABA & TEREZOPOULOS	Auswahl von Abbauverfahren	Tiefbau, Erz,
1995	WITTIG	Zuschnittplanung	Tiefbau, Kohle
1996	WAGNER et al.*	Exploration	Bauxit
1997	MARTENS et al.	Abbauplanung Gebirgsmechanik	Tiefbau, Steinkohle
1998	CAI et al.	Gebirgsmechanik	Tunnelbau
1998	FABIAN*	Mittelfristige Abbauplanung	Tiefbau, Erz
1999	VOGT*	Kurzfristige Abbauplanung	Festgesteinstagebau, Erz
1999	SHI et al.	Bohrtechnik	Monitoring
2000	BALCH et al.	Exploration	Erdöl
2000	AL HOMOU & TAHTAMONI	Hangstabilitäten	Straßenbau
2002	WITTKOPF	Interpretation krustaler Strukturen	Geologische Grundlagenforschung

* An der TU Berlin entwickelte Systeme.

Das von MCCAMMON (1994) weiter entwickelte PROSPECTOR II ist zur Aufsuchung Mineralischer Rohstoffe verwendet worden und war bei der Erschließung einer Molybdänlagerstätte hilfreich. GEO-EXPLORER, ein Expertensystem für das Aufsuchen von Bauxitlagerstätten, wurde 1996 von WAGNER et al. entwickelt. Im Straßenbau (AL HOMOU & TAHTAMONI, 2000) kommen WBS zur Beurteilung von Hangstabilitäten zum Einsatz. Auch in der Erdölindustrie (BALCH et al., 2000) finden WBS Verwendung. Aktuell werden in der freien Wirtschaft mit „Rule Engines“ Abläufe von Geschäftsprozessen abgebildet und gepflegt. Sie können in andere EDV-Systeme mit Hilfe von Schnittstellen eingebunden werden (LAURES, 2002).

2.4 Das CAD-PUMA Projekt

2.4.1 Aufgabenstellung und Projektpartner

Die Europäische Union hat mit dem Forschungsprojekt CAD-PUMA die Weiterentwicklung und Optimierung der Methoden zur untertägigen Marmorgewinnung gefördert. In diesem Forschungsprojekt mit Partnern aus Italien, Griechenland, Frankreich und Deutschland wurde versucht, mit verschiedenen computergestützten Methoden vorhandene Abbautechniken zu verbessern. Ziel dabei ist es, unter den gegebenen Umständen vor Ort die Qualität und die zu gewinnende Menge an Marmor unter den Gesichtspunkten der maximalen Sicherheit zu optimieren. Die Projektpartner kamen einerseits aus der Natursteinindustrie:

- Lasa Marmo SpA (im folgenden LASA) Italien

- Cooperativa Condomi Lavoratori dei Beni Sociali di Levigliani s.c.r.l. (CCLL oder LEVI), Italien

- Dionyssomarle Co. (DMCO), Griechenland.

Diese Steinbruchbetreiber stellten Ihre untertägigen Betriebe zur Verfügung, und erweiterten den untertägigen Hohlraum ihrer Abbaue nach den Anforderungen der Projektvorgaben. Während der Arbeiten wurden Daten über die Auffahrung an die wissenschaftlichen Projektpartner weitergegeben. Auf der wissenschaftlichen Seite arbeiteten in CAD-PUMA folgende Partner zusammen:

- CNR-Centro Studi per la Fisica delle Rocce e le Geotecnologie (CNR, Turin/Italien) ermittelte die gesteinsphysikalischen Parameter der Marmore und war beratend bei der Installation und dem Betrieb von übertägigen und untertägigen Messgeräten in den Steinbrüchen involviert,

- Politecnico di Torino, Dipartimento di Georisore e Territorio (Polito, Turin/Italien), verwendete 3DEC, ein auf finite Elemente basierendes Programm, das geomechanische Hohlräume bezüglich des Spannungsfeldes und der Kluftdaten modellieren kann,

- Institute National de l'Environnement Industriel et des Risques (INERIS, Frankreich) modellierte mithilfe einer unter Linux entwickelten Trennflächen-Blockmodellierungs-Software namens *RESOBLOK* (vgl. Kap. 4.4.2.1) die Primär- und Rohblockgrößen.

- Eine Arbeitsgruppe der Technischen Universität Berlin entwickelte ein Wissensbasiertes System als Entscheidungshilfe zur Optimierung der untertägigen Marmorgewinnung unter geowissenschaftlichen Gesichtspunkten.

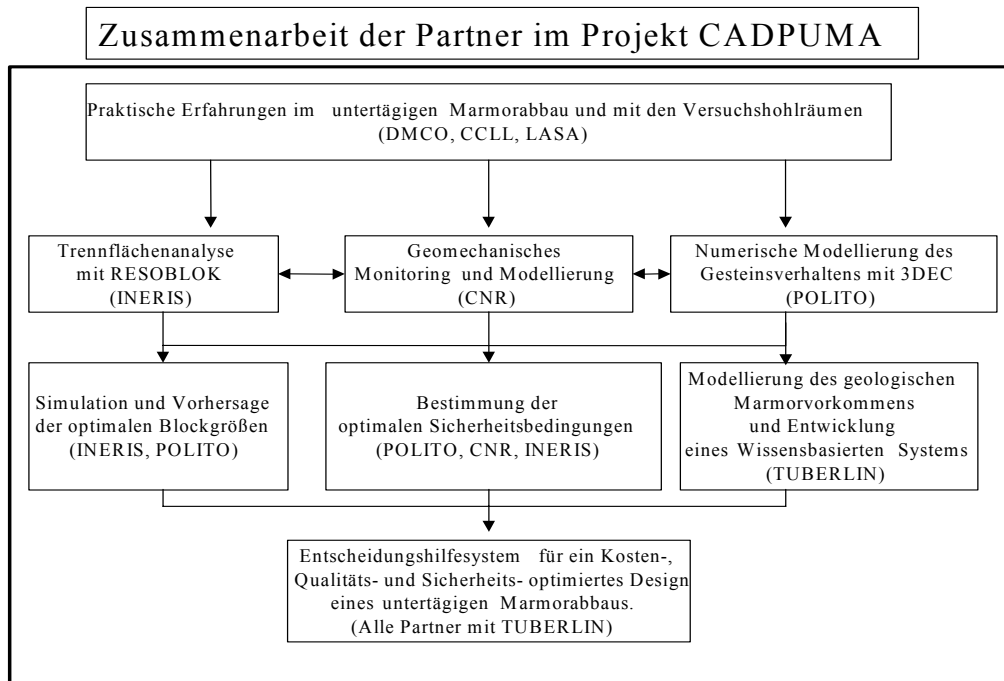


Abb. 9 Zusammenarbeit der Partner im Projekt CAD-PUMA. Entwicklung eines Entscheidungshilfesystems mit computergestützten Methoden.

2.4.2 Aufgabenverteilung

In der Abbildung 9 werden die Zusammenarbeit und die Verteilung der Aufgaben innerhalb des Projektes dargestellt.

Bei der Durchführung des Projektes hatten die wissenschaftlichen Partner die Aufgabe, den Abbau zu beurteilen, zu bewerten und Verbesserungen vorzuschlagen. Die entwickelten Werkzeuge (Computer-Programme) sollten kalibriert und den Anforderungen angepasst werden.

Eine detaillierte Trennflächenanalyse ist von INERIS durchgeführt worden. Die dabei gewonnenen Ergebnisse initiierten die Entwicklung von *EE2Surpac* (vgl. Kap 4.4.2.2), einer Schnittstelle von *RESOBLOK* zu *Supac2000* (vgl. Kap. 4.4.1.6), um so weitere Beurteilungsmöglichkeiten über konkrete Trennflächenkonstellationen zu bieten.

Die geomechanischen Untersuchungen in den Steinbrüchen und die mit Hilfe von 3DEC

(Trennflächenanalyse mithilfe von Finite-Elemente-Methoden, www.itascacg.com) abgeleiteten Ergebnisse der POLITO Gruppe, flossen ebenfalls als Kriterium in das Entscheidungshilfesystem ein. Eine detaillierte geomechanische Charakterisierung des Marmors von CNR bildet die Grundlage zur Beurteilung von vergleichbaren Daten, die über Marmore als Referenzdaten in das System integriert wurden.

Schließlich waren die Erfahrungen der Steinbruchbetreiber im Projekt Basis für die Beurteilung der Abbaustrategien.

2.4.3 Auffahrung untertägiger Marmorabbau

Die konkrete Aufgabe der in Projekt beteiligten Steinbruchbetreiber bestand darin, in einem vorher definierten Bereich der jeweiligen Marmorlagerstätte einen untertägigen Abbau aufzufahren, der vorgegeben Ansprüchen hinsichtlich der Stabilitätsbedingungen genügen mußte. Es wurde nicht nur ein maximal möglicher Hohlraum aufgefahren, sondern eine Kammer um eine Feste errichtet. Beim Festenbau wird das anstehende Wertgestein, hier der zu gewinnende Marmor, nur zum Teil gewonnen. Teile bleiben als Festen (Pfeiler) zurück und sichern die Stabilität des Gebirges.

Im verwendeten Kammer-Festen-Bau Verfahren wurden die Weiten der zu erreichenden Festen und Kammern vor der Auffahrung festgelegt (z.B. Abb. 10 für DMCO, Site A / Tab. 3)

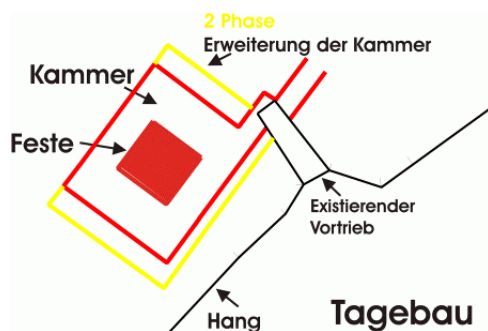


Abb. 10 Abbauplan der untertägigen Hohlräume von DMCO (Site A). Die Feste wird durch einen Hohlraum umfahren und eine Kammer entsteht. Der Vortrieb erfolgt aus dem Tagebau in den Abbau. Angaben zur Dimensionierung sind in Tabelle 3 zu finden.

Die Festen hatten dabei den gegebenen Bedingungen entsprechende Dimensionen zu erreichen. Während des Auffahrens des Hohlraums wurden gleichzeitig Spannungsmesser installiert, die kontinuierlich die Spannungsverteilung im bereits erschlossenen Hohlraum und in der Feste messen sollten.

Tabelle 3 gibt eine Übersicht über die ursprünglich vorgesehenen Dimensionen von Festen und Kammern. Die Kammern sollten symmetrisch die Feste umschließen.

Die Dimensionierung der Hohlräume und der Festen musste im Verlauf des Projektes den lokalen Gegebenheiten angepasst werden. Die ursprünglich vorgegebenen 15 Meter Seitenlänge für die Festen konnten nicht immer erreicht werden. Die Erweiterung der Hohlräume sollte um die Festen herum in zwei Phasen stufenweise ablaufen. Eine erste Erweiterung von 9 Metern sollte in einem zweiten Umfahren mit einer Breite von 6 Meter den Hohlraum auf insgesamt 15 Meter erweitern.

Die vorgefundenen Bedingungen ließen diese zweite Erweiterung mit den Erfahrungen der Bergwerksbetreiber nicht immer zu. So war in einigen Fällen die Dichte der Trennflächen so hoch, dass eine Erweiterung zu Instabilitäten geführt hätte.

Während der Gewinnung sollten die Steinbruchbetreiber über Quantität und Qualität des untertägig gewonnenen Marmors berichten. Die unterschiedlichen Weiterverarbeitungsmöglichkeiten der Betriebe und die damit ungleichen Einschätzungen der Nutzbarkeit des gewonnenen Materials machten einen eindeutigen Vergleich jedoch nicht möglich. So sind nur die Schätzwerte der Steinbruchbetreiber über Menge und Qualität des gewonnenen Marmors verfügbar.

Diese bei diesem Vorgehen gesammelten Informationen im Projekt sind in das Wissensbasierte System eingeflossen, und es ist der Versuch gemacht worden, alle für die untertägige Marmorgewinnung relevanten Einflussgrößen abzuleiten und zu beschreiben. Der zeitlich vorgegebene Projektrahmen und der Umfang des Regelwerkes beschränkten die Entwicklung des WBS jedoch auf das Stadium eines lauffähigen Forschungsprototyps.

Tabelle 3: Dimensionierung der zu erreichenden Feste und Kammern.

	<i>Feste [m]</i>	<i>Kammer [m]</i>
<i>DMCO Site A</i>	15 x 15	26 x 26
<i>Site B</i>	15 x 11	37 x 36,5
<i>CCLL</i>	12 x 11,5	33 x 29
<i>LASA</i>	20 x 20	44 x 40

3 Der Naturwerkstein Marmor und seine Lagerstätten

3.1 Generelle Charakterisierung

Marmor lässt sich aus dem griechischen Wort *mármaros* ableiten und bedeutet Felsblock, gebrochener Stein (MACKENSEN, 1985).

Der DIN EN 12670 über die Naturstein-Terminologie sind zwei Marmor-Definitionen zu entnehmen. (I) *Wissenschaftlich*: „Marmor ist ein metamorphes Gestein mit einem Karbonatgehalt (Kalzit oder Dolomit) von mehr als 50%, das durch metamorphe Rekristallisation aus Karbonatgestein gebildet wird. (II) *Kommerziell*: Marmor ist ein Naturstein, der kompakt und polierbar für dekorative Zwecke und zum Bauen verwendet wird. Im Entscheidungshilfesystem ist die wissenschaftliche Beschreibung von besonderer Relevanz, um damit die Anforderungen an das Produkt Marmor und dessen wirtschaftliche Eignung zu beurteilen.

Marmore bestehen überwiegend aus Mineralphasen, die eine geringe Härte zwischen 3 und 4 auf der Mohs'schen Härteskala (wie Kalzit, Dolomit) aufweisen und sind deshalb mit geringem Aufwand zu schneiden, zu schleifen und zu polieren.

Aus der geologischen Evolution eines Marmorvorkommens lassen sich Regeln ableiten, die zur Beurteilung von Menge und Qualität der abbaubaren Marmore dienen können. Ausgangsgestein für Marmore sind marine Flachwasserkarbonatsedimente, die unterschiedliche Mengen auch klastischen Detritus terrestrischer Herkunft enthalten können. Nach ihrer diagenetischen Lithifizierung wurden diese Sedimente in tiefere Krustenbereiche versenkt und dort unter erhöhten Druck- und Temperaturbedingungen in Marmor umgewandelt. Die lithofazielle Entwicklung, die laterale Verbreitung und die Mächtigkeit eines Marmorvorkommens sind also durch die Ablagerungsbedingungen der Karbonatsedimente vorgegeben.

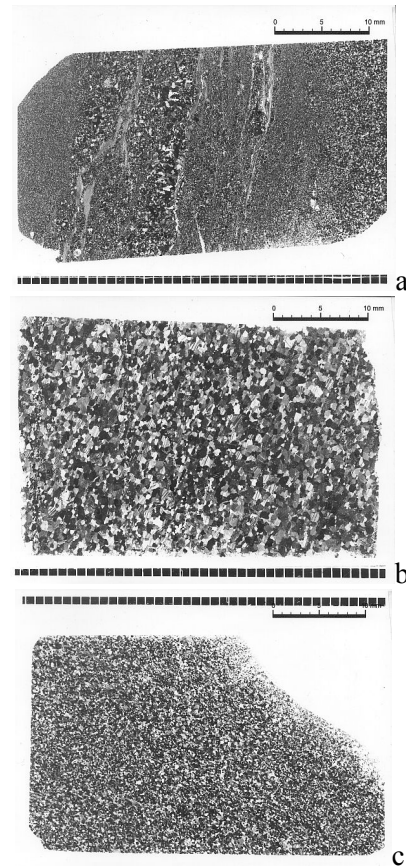


Abb. 11 a-c: Korngrößen in Marmoren der drei untersuchten Lagerstätten. Die Abbildungen zeigen Dünnschliffe im polarisierten Durchlicht. A: Levigliani (CCLL); schlierige Textur mit Wechsel von feinen und groben Körnungen. B: LASA; homogene grobkörnige Kalzitkristalle. C: Penteli (DMCO); homogen, sehr feinkörnige Kalzitkristalle (Maßstab: oben rechts im Bild 1 cm; Darstellungstechnik nach CRAMER, 2004).

Der Anteil an akzessorischen Mineralen wie Glimmer, Quarz und Graphit steht ebenfalls in engem Zusammenhang mit der Entwicklungsgeschichte des Marmors. Andere petrographische Eigenschaften wie Kornform und Korngröße sind Ergebnis von Metamorphose und tektonischer Beanspruchung. Marmor ist weiß oder durch Metalloxyde (braun, gelb, rötlich), Graphit (grau, schwarz) oder Chlorit (grünlich) gefärbt. Inhomogene Farb- und Mineralverteilungen, unter anderem bedingt durch tektonische Brekzierung,

erzeugt charakteristische Muster, die qualitätsbestimmend sein können.

In den Regionen Carrara, Massa und Levigliani/Versilia, die in Kap. 3.2 noch detaillierter beschrieben werden, werden nach Farbe und Muster sieben Marmorhaupttypen unterschieden: Arabescato, Bardiglio, Bianco, Calacata crema, Statuario venato, Venato, und der Cipollino Zebrino (nicht abgebildet).



Abb. 12 Verschiedene Marmorvarietäten der Region Carrara (aus BRADLEY, 1997).

3.1.1 Eigenschaften und Qualitätsmerkmale

Folgende Eigenschaften und Qualitätsmerkmale zeichnen Marmor besonders aus und sind für den Verwendungszweck entscheidend.

- Der ästhetische Eindruck, also das häufig sehr helle, teilweise rein weiße Erscheinungsbild ist sicherlich einer der Hauptgründe, warum sich Marmor so sehr als Naturwerkstein etabliert hat.

- Marmor lässt sich aufgrund seiner relativen geringen Härte im Verhältnis zu anderen Natursteinen gut verarbeiten.
- Die gute Polierfähigkeit des Marmors bietet eine ästhetisch ansprechende optische Veredelung der Oberfläche.
- Marmor tritt häufig in großen Blockgrößen auf und lässt sich somit auch für große Bauwerkskomponenten einsetzen.
- Die Verfügbarkeit von zahlreichen Marmorlagerstätten ist sicherlich einer der wichtigsten Gründe für die weitverbreitete Verwendung.

Des Weiteren sind die Eigenschaften Druck- und Biegefestigkeit, die Abnutzung und der Elastizitätsmodul von Marmor für dessen Verwendung wichtig.

Bei der Druckfestigkeit von Gesteinen spielen Porositäten und Verteilung des Porenraumes, Mikrorisse und auch die Orientierung der mineralischen Komponenten sowie der Anteil an harten Mineralkomponenten eine Rolle. Hohe Druckfestigkeit ist eine bevorzugte Eigenschaft von Naturwerkstein. Bezüglich seiner Druckfestigkeit liegt der Naturwerkstein Marmor im Vergleich mit anderen Naturwerksteinen im Durchschnitt im unteren Drittel (Abb. 13). Gleich nach diagenetisch wenig verfestigten Kalksteinen und Sandsteinen treten die ersten Marmore bei 40 MPa im Druckfestigkeits-Vergleichsdiagramm auf. Granit hat im Mittel einen deutlich höheren Wert der Druckfestigkeit. Basalte, mit den höchsten Druckfestigkeiten als Naturwerkstein sind selten als Großwerkstein in Verwendung, sondern werden meist als Splitt oder Pflasterstein verwendet. Die untersuchten Marmore liegen im Mittelfeld der Spannbreite an möglichen Druckfestigkeiten für Marmore, bei ca. 110 bis 130 MPa.

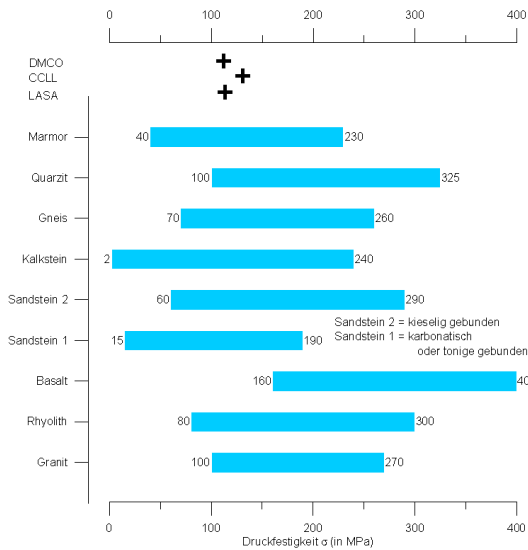


Abb. 13 Druckfestigkeit von Naturwerksteinen (nach PESCHEL, 1977).

Die Biegefestigkeit (DIN EN 12 372) gibt Aufschluss über das Verformungsverhalten bei sehr vielen Natursteinanwendungen (Abb. 14). Inhomogenitäten im Material spielen hier eine größerer Rolle als bei der Druckfestigkeit von Natursteinen.

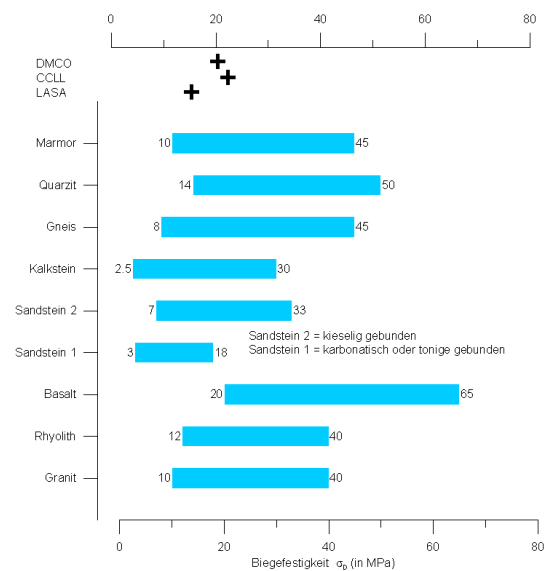


Abb. 14 Biegefestigkeit von Naturwerksteinen (nach PESCHEL, 1977).

Besonders in der Verwendung von Fassadenplatten spielt die Biegefestigkeit eine Rolle. Eine hohe Biegefestigkeit ist hier wünschenswert. Marmore und Granite verhalten

sich unter Betrachtung ihrer Biegefestigkeitseigenschaften ähnlich. Tonige Sandsteine haben eine niedrige Biegefestigkeit, was sich in bestimmten Verwendungsbereichen als ungünstig erweist. Die Biegefestigkeit der Marmore aus den untersuchten Steinbrüchen liegt im unteren Drittel der Bandbreite.

Die Abnutzbarkeit eines Naturwerksteins steht im direkten Zusammenhang mit seinen Festigkeiten und seinen Anteilen an harten Mineralen. Für die Verwendung als Fliese oder Bodenplatte ist eine geringe Abnutzbarkeit erforderlich.

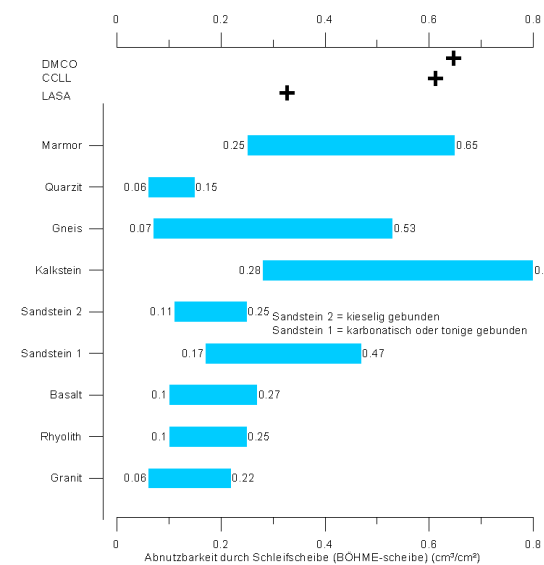


Abb. 15 Abnutzbarkeit von Naturwerksteinen (nach PESCHEL, 1977).

Die Abnutzbarkeit von Marmoren ist im Vergleich zu anderen Natursteinen relativ hoch (Abb. 15). Die Marmore aus Lasa zeigen im Abnutzbarkeits-Diagramm, mit Daten basierend auf dem Testverfahren mit der Böhme-Scheibe, das beste Abnutzbarkeitsverhalten und sind von den hier untersuchten Marmoren am widerstandsfähigsten bezüglich ihres Abriebsverhaltens. Nach der DIN EN 14157 wird die Abnutzbarkeit, bzw. der Abriebswiderstand nach der „Capon Methode“ gemessen. Der Abriebswiderstand wird mit Hilfe von Schleifscheiben ermittelt (zum Beispiel BÖHME Scheibe). Dabei wird ein Prüfkörper mit einer definierten Fläche an der Scheibe

vorbeigeführt. Die nach einer definierten Zeit abgetragene Menge an Material wird in cm^3/cm^2 angegeben.

Der werkstoffspezifische Elastizitätsmodul E ist ein Materialkennwert, der das Verhältnis der Spannung ($d\sigma$) zu einer zugehörigen elastischen Verformung ($d\varepsilon$) eines Materials angibt.

$$E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}$$

Ein niedrigeres Elastizitätsmodul bedeutet eine höhere Dehnbarkeit. Marmore zeigen im Vergleich mit anderen Natursteinen einen relativ hohen Elastizitätsmodul (Abb. 16), verhalten sich also relativ spröde.

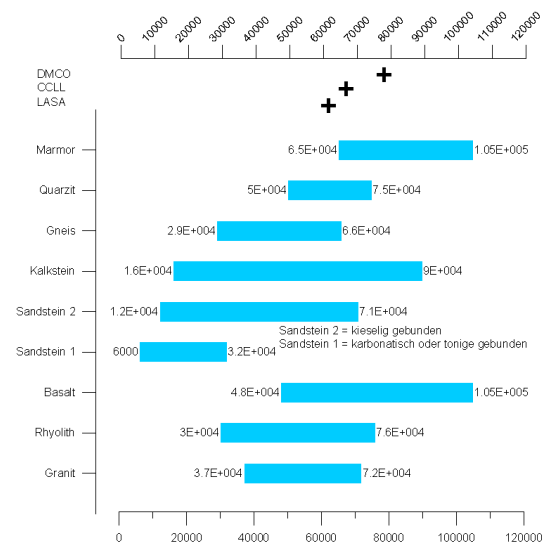


Abb. 16 Elastizitätsmodul von Naturwerksteinen (in Pascal nach PESCHEL, 1977).

Weitere technische Eigenschaften des Marmors, wie die durchschnittliche Rohdichte und die Wasseraufnahme sowie der Kalziumkarbonatgehalt, sind in Tabelle 4 aufgeführt. Die Wasseraufnahmefähigkeit ist ein wichtiger Richtwert für die Frostbeständigkeit. Für die Weiterverarbeitung von Marmor zu verschiedenen Produkten ist eine anisotrope Eigenschaft des Marmors zu erwähnen. Bei kristallinen Karbonatgesteinen ist die Ausdehnung bei Temperaturveränderung je nach Lage der Kalzitkristalle unterschiedlich. Parallel zu c-Achse dehnt sich ein Kalzitkristall

um $25,6 \mu\text{m}/\text{m}$ pro $^{\circ}\text{C}$ Temperaturerhöhung aus, schrumpft aber senkrecht zur c-Achse um $5,7 \mu\text{m}/\text{m}$ pro $^{\circ}\text{C}$ (WEBER & HILL, 1989 in LORENZ & GWOSDZ, 2003 b).

Alle hier angegebenen Werte sind jeweils Richtwerte. Abhängig von der Lokation in der Lagerstätte, der die Marmore entnommen werden, können die Werte sehr variieren.

Tabelle 4: Durchschnittliche Werte für Rohdichte, Wasseraufnahme und Kalziumkarbonat-Anteil (aus BÖRNER & HILL, 2002 und Cramer, 2004)

	Wasser- aufnahme M.-%	Rohdichte kg/dm ³	CaCO ₃ M. %
DMCO	0,11	2,717	98,0
CCLL	0,12- 0,15	2,71- 2,74	99,5
LASA	0,17- 0,22	2,69 - 2,71	96,4- 98,6

Weiterführende Informationen zur Charakterisierung und Verwendung von Normen bei der Bewertung von Natursteinen sind bei BRUNO et al. (2004) zu finden.

3.1.2 Marmortexturen, Lithologie und Gefüge

Marmorlagerstätten sind aufgrund ihrer Entstehung und ihrer grundlegenden Struktur den schichtigen Sedimentlagerstätten sehr ähnlich. Durch Metamorphose, bzw. die Temperatur- und Druckerhöhung während der Versenkung, kommt es zur Umwandlung des karbonatischen Ausgangsgesteins in Marmor. Charakteristisch für viele Marmorlagerstätten ist der Wechsel von hellen und dunkleren Bereichen. Dieses Muster ist auch für das Produkt Marmor vielfach typisch und bei einigen Sorten auch besonders entwickelt.

Die komplexen Faltenbilder (vgl. Abb. 19), die manche Marmortypen und -Lagerstätten in allen Skalenbereichen charakterisieren, sind durch den erheblichen Kompetenzkontrast zwischen den karbonatischen und nicht karbonatischen Bereichen im Ausgangssedi-

ment verursacht. Schichten/Lagen mit erhöhten Gehalten an silikatischen Detritus, organischen Substanzen oder auch Dolomit sind in vielen Marmorlagerstätten in unterschiedlichen Mächtigkeiten entwickelt. Dementsprechend ist die kompetenz-induzierte Faltung vom Handstück – über den Block bis hin zur Lagerstättendimension anzutreffen.

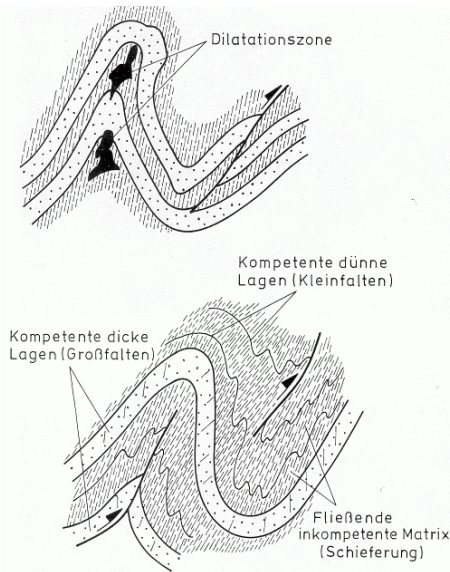


Abb. 17 Schematisches Profil von Biegescherfalten in Lagen unterschiedlicher Mächtigkeiten bzw. Kompetenz; deutliche Asymmetrie in den Kleinfalten. Lokale Dilatationszonen überlagern sich gegenseitig bei zunehmender Einengung bzw. regionaler Metamorphose (EISBACHER, 1996).

Die kompetenten und inkompetenten Schichten/Lagen reagieren während einer Deformationsphase mit Faltung auf den Druck. Dabei verfallen sich inkompetente Schichten schneller als kompetente Schichten. Die inkompetenten Schichten bilden Faltenstrukturen, die zwischen den kompetenteren Schichten eine fließende inkompetentere Matrix entstehen lassen (Abb. 17). In hoch verdichteten Bereichen kommt es zur Bildung von Dilatationszonen. Die kleineren Falten in der kompetenten Schicht können eine Asymmetrie entwickeln. Es können Überschiebungsflächen entstehen, welche die Symmetrie durchbrechen. Die so gebildete Struktur erzeugt die

spätere Textur, das Muster des Gesteins im Anschnitt.

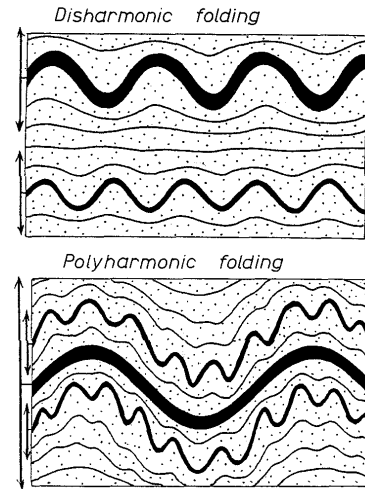


Abb. 18 Faltungstypen, die im Marmor häufig auftreten (nach RAMSAY & HUBER, 1987).

Abbildung 18 zeigt vereinfacht zwei Falten-typen, die im Marmor häufig auftreten. Die Vielfältigkeit der Faltungen hängt von der Anordnung der Schichten, dem Mächtigkeits- und dem Kompetenzkontrast ab. Die lagenweise Einschaltung von kompetenten Schichten ist in Marmor nicht selten. Disharmonische und polyharmonische Faltungen sind häufig im Marmor zu beobachten.

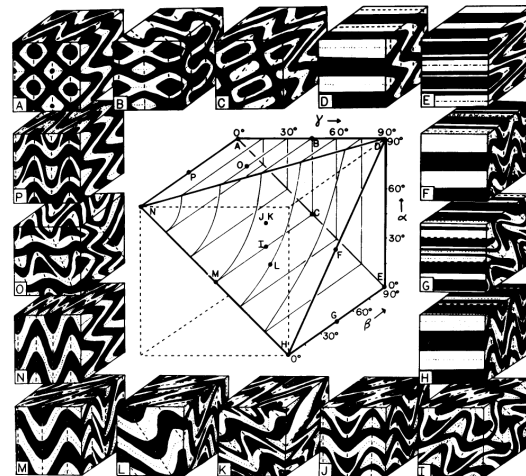


Abb. 19 Anschnitte eines Quaders mit unterschiedlichen Faltensystemen und den daraus abzuleitenden Texturen (RAMSAY & HUBER, 1987).

In der Abbildung 19 sind einige grundlegende Faltungstypen und durch unterschiedlichen Anschnitt entstehende Muster dargestellt. Um ein mögliches und gewünschtes Muster in den zu gewinnenden Rohblöcken zu erhalten, muss in Hinblick auf die Faltungen im Marmor und die durch den Anschnitt entstehenden Muster die Schnittführung entsprechend angesetzt werden.

Die Verteilung von Mustern insbesondere durch Faltungen, gegeben durch Inhaltsstoffe (z. B. Quarzanteil, organische Bestandteile) und den daraus resultierenden Texturen, sind von großer Bedeutung und sollten eine regelmäßige Verteilung in der Lagerstätte aufzeigen. Stark verfaltete Marmorvorkommen sind in ihren Lagerungsverhältnissen schwieriger zu beurteilen als solche, die wenig oder gar nicht verfault wurden. Die Verteilung dieser Merkmale hängt dabei maßgeblich von dem Naturwerkstein-Lagerstättentypen ab (vgl Kap. 6.1).

3.1.3 Trennflächen im Naturwerkstein Marmor

Natürliche Trennflächen sind ein maßgeblicher Faktor bei der Gewinnung von Naturwerksteinen, denn sie bestimmen die Primärblockgröße.

Die Größe der Primärblöcke und der daraus durch künstlich geschnittene Trennflächen zu gewinnenden Rohblöcke ist für die Gewinn-

nung und die Weiterverarbeitung von entscheidender Bedeutung. Die Primärblockgröße ist bedeutend für die Beurteilung der Qualität und Quantität in einem Vorkommen. Trennflächen haben bei der Gewinnung von Naturwerksteinen, nicht nur hinsichtlich des Festigkeitsverhaltens, einen sehr hohen Stellenwert.

Die Entstehung von Trennflächen im Marmor kann grob in folgende Bereiche unterteilt werden (nach PALMSTRÖM, 2000).

1. *Trennflächen tektonischen Ursprungs* entstehen im Marmor durch tektonische Druck- und Zugbeanspruchung auf das Gestein. Abhängig von der Intensität, den thermischen Bedingungen, der Teufenlage und den gesteinsmechanischen Eigenschaften, entstehen bei Erreichen des elastischen Limits im Gestein Trennflächen. Schieferungsflächen sind Trennflächen, die durch Mineraleinregelung infolge gerichteter tektonischer Spannung entstehen.
2. *Schichtflächen* sind Trennflächen an der Grenze zweier verschiedener Gesteinschichten oder Materialien.
3. *Entspannungs- und Entlastungsklüfte* entwickeln sich parallel zur Oberfläche.
4. *Trennflächen können durch mechanische Beanspruchung* während des Abbauprozesses durch Entlastung entstehen.

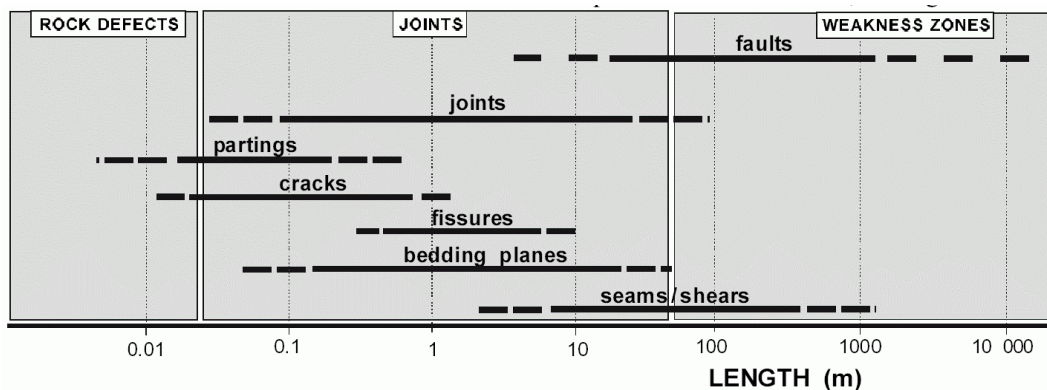


Abb. 20 Haupttypen von Trennflächen in Abhängigkeit von ihrer räumlichen Ausdehnung (PALMSTRÖM, 1995).

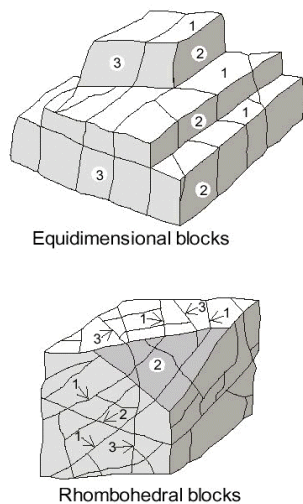


Abb. 21 Trennflächen und die daraus gebildeten, im Marmor häufigen Primärblockformen (PALMSTRÖM, 2000).

Trennflächen (fractures) können in Abhängigkeit von ihrer räumlichen Ausdehnung und Genese wie folgt klassifiziert werden: Störungen (faults), Klüfte (joints), Risse (partings), Brüche (cracks), Haarrisse (fissures), Schichtflächen (bedding planes) oder Scherflächen (shears) (Abb. 20). Aus der räumlichen Anordnung von Trennflächen kann man Blockform und -orientierung, nicht aber die Blockgrößen ableiten. In Marmoren sind vor allem unregelmäßige vieleckige, equidimensionale und rhomboedrische Blöcke zu finden (Abb. 21). Dies hängt vom karbonatischen Ausgangsgestein bzw. dessen Schichtung, dem Grad der Metamorphose und der tektonischen Beanspruchung ab. Das Deformationsverhalten des Marmors und der begleitenden Sedimente führen zu unterschiedlichen Trennflächen im Gesteinskörper und bilden so die Primärblockformen.

Um die Primärblockgröße eines Naturwerksteines in einem Vorkommen bestimmen zu können, wird zusätzlich die Trennflächenweite oder Trennflächendichte, also die Weiständigkeit der Trennflächen benötigt. Mehr zur Bestimmung der Primärblockgröße wird in Kapitel 7.1 ausgeführt.

Vorraussetzung für die Bestimmung der Trennflächendichte ist das Erkennen der Trennflächen. Im Marmor bedarf es einiger Erfahrung, die auftretenden Trennflächen im frischen Anschnitt zu erkennen.

Auch Experten haben beim Beurteilen von Trennflächen manchmal Schwierigkeiten. EWAN et al. (1983 in PALMSTRÖM, 1995) haben in einem Test die Trennflächen in einem Aufschluss über eine Länge von 10 Metern von sechs Experten aufnehmen lassen, und sie erhielten 6 verschiedene Ergebnisse. Dies macht deutlich, wie schwierig eine genaue Beschreibung und Erfassung von Trennflächen sein kann.

Verschiedene Methoden zur Aufnahme von Trennflächen sind möglich.

1. Beobachtung und Aufnahme aus übertägigen und/oder untertägigen Aufschlüssen.
2. Beobachtung und Aufnahme aus Bohrkernen
3. Geophysikalische Messmethoden (Georadar).

Die weiteren Eigenschaften von Trennflächen wie Öffnungsweite, Rauigkeit der Innenoberfläche oder Verfüllung können ebenfalls zur Klassifizierung herangezogen werden und sind für die Qualität der Endprodukte und für die Beurteilung der Standfestigkeiten beim über- und untertägigen Abbau von Bedeutung.

Die Aufnahme von Trennflächen und ihrer Raumlage erfolgt konventionell mit einem Kompass (Gefügekompas), oder auch mittels neuerer elektronischer Aufnahmetechnik, zum Beispiel mit Bohrlochradar (MOTOYUKI & MORIYASU, 2000) oder Radar [Non-Preflector Methode] (FENG et al., 2001).

Die Raumlage wird mit dem Streichen der Trennfläche abweichend von Nord (N) und dem Einfallwinkel der Trennfläche beschrieben.

Im Rahmen des Projektes stehen bezüglich der Beurteilung der Primärblockmodelle im

Marmor Klüfte und Störungen im Vordergrund. Sie sind die maßgeblichen Einflussfaktoren auf die Primärblockgrößen. Der Primärblock wäre für die Gewinnungstechnik der maximal gewinnbare Rohblock, wenn er nicht durch seine Dimensionen die Möglichkeiten des HerauslöSENS aus dem Gesteinsverband limitieren würde. Er ist begrenzt durch Trennflächen im geologischen Verband und muss in der Regel durch künstliche Trennflächen, mehrere Schnitte, aus dem Gesteinsverband mit technischen Hilfsmitteln gewinnbar gemacht werden. Gelöst wird also entweder der gesamte Primärblock (öfter bei der Gewinnung Übertage im Tagebau) oder in der nächsten Gewinnungsstufe der kleinere Rohblock, also der bereits formatierte Gesteinsblock, der den Anforderungen zum Abtransport und zur Weiterverarbeitung genügt.

Ein wichtiges Qualitätsmerkmal von Naturwerksteinvorkommen ist die gleichmäßige Verteilung von Primärblockgrößen.

3.1.4 Gewinnungs- und Verarbeitungstechnik

Im Folgenden werden die in der Gewinnung von Marmor relevanten Gewinnungsverfahren näher erläutert.

Zum Lösen der Blöcke im Marmortagebau werden Bohrungen und Seilsägen verwendet. Für großflächige Schnitte finden häufig Seilsägen Verwendung. Die Seile sind mit Industrie-Diamanten besetzten Manschetten versehen. Das Endlosseil wird über ein Treibrad angetrieben und unter Spannung am Naturstein entlang geführt. Als Spülung wird Wasser verwendet. Diamantseilsägen können fast überall eingesetzt werden. Dort, wo die Spannung im Gesteinsverband ungünstig ist und das Seil einklemmen kann, muss allerdings auf andere Techniken ausgewichen werden.

Um einen Rohblock aus dem Gesteinsverband zu lösen, wird mit Hilfe von Bohrungen das Seil hinter den Block geführt (Abb. 22

[A]). Das Verfahren der Seilsäge setzt Führungsbohrungen voraus, durch die das Seil vor dem Vorgang des Schneidens gezogen werden muss. Dazu muss ein freier Zugang zu den sich kreuzenden Flächen gegeben sein. Die Bohrungen werden so angesetzt, dass sie sich treffen. Dieser gesamte Vorgang wird durch speziell konstruierte Bohranlagen bewerkstelligt, die mit hoher Präzision arbeiten. Eine weitere Möglichkeit zum Formatieren und Lösen bietet die Perforationsbohrung als Reihenbohrung oder Schlitzbohrung. Dabei werden Bohrlöcher in Reihe in das Gestein gesetzt (Reihenbohrung) und die teilweisen Aussparungen zwischen den Bohrungen überbohrt (Schlitzbohrung). Anschließend wird mit einem Keil in den Bohrlöchern der Primärblock gespalten.

In der untertägigen Gewinnung von Marmor ist die Seilsäge wegen der ersten anzusetzenen Führungsbohrung, an der das Seil durchgezogen wird, nicht immer geeignet. Hier sind die Schrämmaschinen (Kettensägen) mittlerweile weit verbreitet. Sie gibt es in Ausführungen mit Widia®- oder Diamantbesetzten Sägezähnen. Abhängig von der Härte des Marmors kommen beide Typen zum Einsatz.

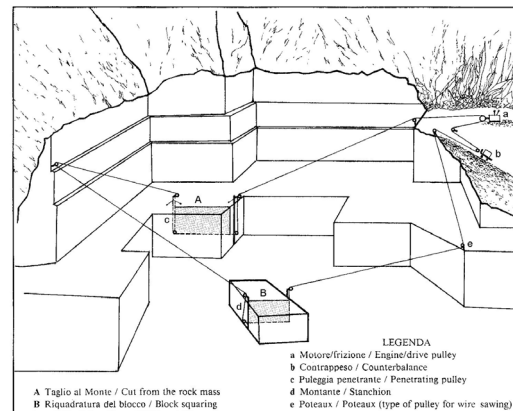


Abb. 22 Schematische Darstellung der Verwendung einer Seilsäge. Das Seil ist durch den gesamten Tagebau verspannt. Eine kurze Seilführung verringert den Verschleiß (BRADLEY, 1997).

Neuere Schrämmaschinen mit Diamantbesatz sind auch ohne Wasser zu betreiben und be-

nötigen nur Schmierfette auf den Lagern. Sie sind umweltverträglicher, weil der Eintrag von Ölen und Fetten (z.B. aus der Hydraulik oder den Getrieben) in das Grundwasser verringert wird. Diese Maschinen sind derzeit Stand der Technik in der Naturwerksteingewinnung und insbesondere der Marmorgewinnung. Der Gewinnungsprozess Untertage in einem Marmorvorkommen folgt einem festen Ablauf der Schnittrihenfolge. Es kommen hierbei zuerst Schrämmaschinen zum Einsatz. Die Basis des zu gewinnenden Rohblockes wird einmal unterschritten. Danach folgen die Schnitte rechts und links an den Flanken des Blockes. Dabei wird an der Ortsbrust seitlich ein Schram angelegt, welcher mit Hilfe von Sprengmitteln frei geschossen wird (Abb. 23), um den Block an dieser Stelle zu hinterschneiden.

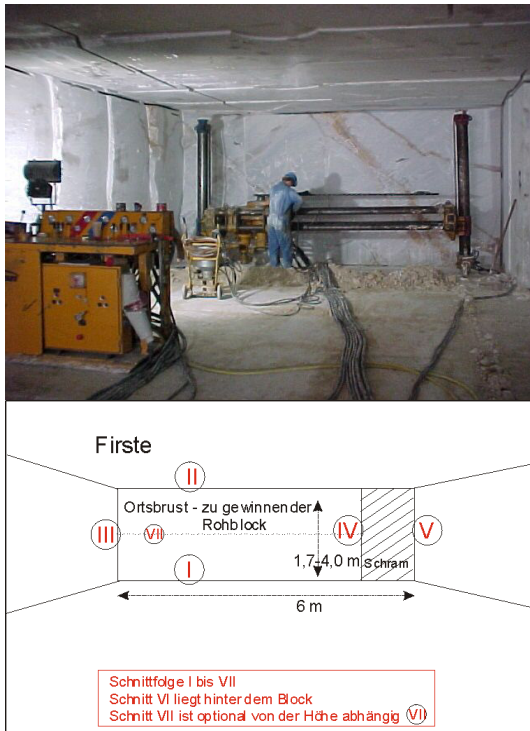


Abb. 23 Oben: Schrämmaschine (Kettensäge) im Einsatz bei DMCÖ. Unten: Abbauschnittfolge bei der untertägigen Gewinnung von Marmor.

Geschossen wird mit drückenden und nicht zerstörenden Sprengmitteln. Oft wird auch mit hydraulischen Kissen oder Baggern der

zu gewinnende Rohblock herausgebrochen. In Abhängigkeit von der anstehenden Qualität im Primärblock wird der Schram rechts oder links des zu gewinnenden Rohblockes angelegt. Der letzte Schnitt, der den Block hinterschneidet, wird üblicherweise mit einer kleinen Seilsäge durchgeführt. Die Schnitttiefe der in allen drei Steinbrüchen eingesetzten Kettensägen oder auch Schrämmaschinen liegt bei ca. 1,7 m. Variabel sind die Abbauhöhen, 1,7 bis 4 m sind hier möglich. Die Höhe hängt vom aufgeschlossenen Marmor oder aber von den verwendbaren maximalen Blockgrößen ab. Bei größeren Schnitthöhen von über 3 m wird ein weiterer waagerechter Schnitt in der Mitte des Blockes gesetzt. Die Schnittgeschwindigkeiten der eingesetzten Sägen sind sehr unterschiedlich. Eine diamantbesetzte Schrämmaschine kann 2 m² in bis zu 5 Stunden schneiden, vorausgesetzt der Marmor ist homogen ohne Trennflächen und quarzarm. Bei Seilsägen sind die Schnittgeschwindigkeiten auch von diesen Einflussgrößen abhängig. Hinzu kommt noch die Leistung der Antriebsaggregate und die Verspannung der Seile, die als Einflussgrößen für die Schnittgeschwindigkeit entscheidend sind.

Nachdem der Rohblock gelöst ist, wird er in den meisten Fällen direkt im Steinbruch, bzw. auch im untertägigen Betrieb weiter mit Seilsägen, Bohrhämmern und Spaltzylindern formatiert, damit nur Material, das der gewünschten Qualität entspricht, gefördert wird. Im letzten Schritt der Gewinnung an der Ortsbrust wird der Rohblock mit einem Radlader oder Bagger geborgen.

Im Tagebau besteht die Möglichkeit, den Schnittverlauf und die Anordnung der Flächen bezogen auf die Textur des anstehenden Marmors relativ frei zu wählen. Hierbei sind prinzipiell drei verschiedene Schnittlagen üblich (BRADLEY, 1999). Ein Schnitt parallel der ehemaligen Schichtflächen (jetzt im Marmor als Wechsel von hellen und dunklen Zonen) wird als *verso* (in Richtung bezeich-

net (Abb. 24). Ein Schnitt senkrecht auf die sichtbare Wechsellagerung wird als *secondo* (der aus der Schichtung abgeleitete, der folgende Schnitt) und ein Schnitt auf die Stirnfläche der ausstreichenden Schichtmerkmale als *contro* (gegen die Schichtung) bezeichnet.

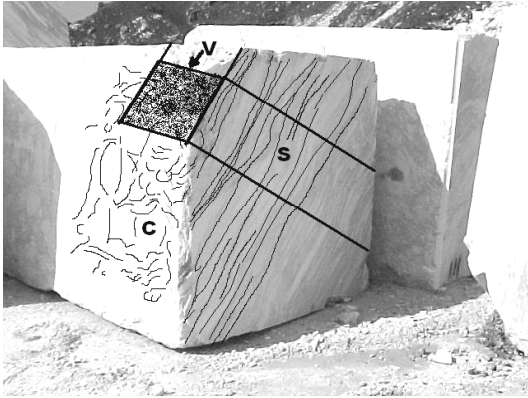


Abb. 24 Mögliche Schnitte bezogen auf die Textur des Marmors. V = verso, C = contro, S = secondo.

Die Schnittfolge der Rohblöcke lässt sich untertage nicht so frei gestalten, wie im Tagebau. Untertage ist aus technischen Gründen oft nicht möglich, die gewünschte Schnittfolgen durchzuführen. Die Primärblöcke sind untertage nicht von zwei Seiten zu erreichen. Erst wird in der Abbaureihenfolge ein Stollen aufgefahren und eine Feste, die das Grubendach trägt, wird umfahren. Primärblöcke sind anschließend in der Abbaureihenfolge in tieferliegenden Bereichen leichter zu gewinnen. Es ist im Tiefbau notwendig, Bereiche schlechterer Qualität zu durchhören, um bessere Qualität zu erschließen. Auch im Tagebau sind oft Bereiche schlechter Qualität abzubauen, um bessere Qualitäten darunter zu gewinnen. Um eine optimale Qualität des Wertgesteins Marmor zu erreichen, ist es daher notwendig, möglichst viel Informationen über die Qualitätsverteilung des Marmors vor dessen Erschließung zu erhalten. Der Abtransport der Rohblöcke hängt von der Erreichbarkeit des Grubeneinganges mit schwerem Gerät ab. Sind die Zufahrtsstraßen

stabil und breit genug, können Skw oder Lkw eingesetzt werden.

In Hochlagen mit engen unzugänglichen Bereichen kommen auch Seilbahnen und Kräne zum Einsatz, um den Rohblock abzutransportieren.

Weitere Informationen sowohl zur untertägigen als auch übertägigen Gewinnungsprozessen von Natursteinen sind bei DIEB & PASPALIARIS (2003) zu finden.

3.1.5 Fallbeispiele von Marmorlagerstätten bzw. –Steinbrüchen

Um das Expertensystem zu entwickeln, wurden die nötigen Informationen über die Gewinnung von Marmor untertage auch von den drei erwähnten Steinbrüchen gesammelt.

In den folgenden Kapiteln erfolgt eine Vorstellung der geografischen Lage und des geologischen Umfeldes der drei bearbeiteten Steinbrüche. Damit soll ein Einblick in die Problemstellung und auch in die Besonderheiten der untertägigen Marmorgewinnung gegeben werden.

Eine Vorstellung der verwendeten Abbautechnik in den drei Brüchen soll Einblicke in die individuelle Arbeitsweise der untertägigen Gewinnung und der Weiterverarbeitung geben. Die unterschiedlichen Transporttechniken des gewonnenen Marmors und die jeweilige Weiterverarbeitung werden vorgestellt.

Einige Zahlen über die betriebswirtschaftlichen Größen werden zum Abschluss genannt. Dabei war es schwierig, die Größenordnungen der drei Betriebe miteinander sinnvoll in Beziehung zu setzen. Die Ausgangsbedingungen sind sehr unterschiedlich und daher nicht immer vergleichbar.

3.2 Steinbruch Penteli / Griechenland (DMCO)

DMCO (Dionyssomarle Cooperation, www.dionyssomarle.gr) ist derzeit der zweitgrößte Marmorproduzent in Griechenland. Der Tagebau ist seit 1940 in Betrieb.

3.2.1 Geografische Lage

Der Steinbruch der Firma DMCO liegt in Griechenland ca. 10 km nordöstlich vom Stadtrand Athens entfernt in einer Höhe von ca. 300 über NN (Abb 25), nördlich des Berges Pentelikon (1106 m ü. NN).

3.2.2 Geologische Situation

Der festländische südliche Teil Griechenlands (Attika) wird dominiert von Schiefern, Phylliten, Marmoren und Tonsteinen.

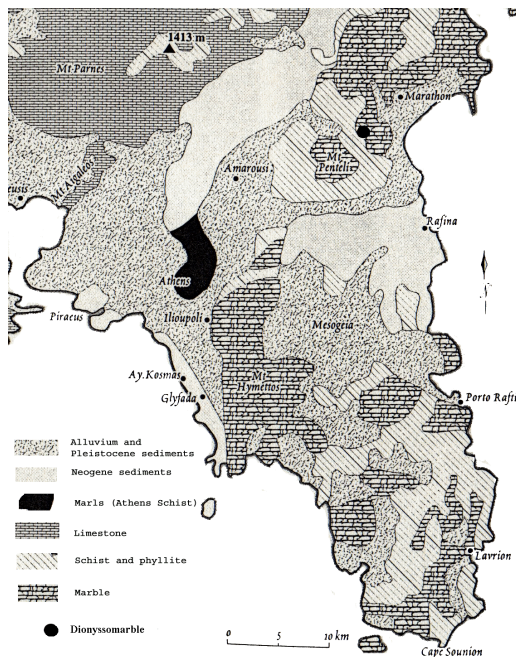


Abb. 25 Geologische Übersichtskarte von Attika mit Lage des Steinbruches von DMCO (überarbeitet nach HIGGINS & HIGGINS, 1996).

Der Penteli gehört zu einem Bereich von metamorphen Gesteinen, die NE von Athen bis nach Marathon reichen. Der Berg Hymettos (1037 m ü. NN) ist Teil eines zweiten Bereiches, der SE von Athen liegt (Abb. 25).

Diese beiden Bereiche gehören zu dem Attisch-Kykladischen Komplex. Hauptsächlich Marmor und Schiefer treten hier auf, die der Grünschieferfazies zugeordnet werden und vermutlich triassischen Alters sind (DÜRR in JACOB SHAGEN, 1986). Der Marmor ist gegen Erosion resistenter als der Schiefer, deshalb tritt er hier in einem Bergmassiv hervor (HIGGINS & HIGGINS, 1996).

3.2.3 Regionalgeologische Position

Schon LEPSIUS (1890, 1893) hat den Pentelischen Marmor ausführlich beschrieben. Der Untere Marmor bildet nach Lepsius den Grundkern des Gebirges. Der liegende Marmor ist hauptsächlich grau. Darüber liegt der Kaesariani-Glimmerschiefer. In diesen Glimmerschiefer ist der hangende weiße Marmor in dünnen Bänken eingeschaltet. Am Penteli ist der Untere Marmor aufgeschlossen.

Ursprünglich wurde der reine weiße Marmor an den südlichen Hängen des Penteli gewonnen. Am Hymettos wurde hauptsächlich ein grauer Marmor abgebaut.

3.2.4 Lithostratigraphische Situation, Mächtigkeit, Strukturgeologie

Im Steinbruch von DMCO wird der Untere Marmor gewonnen. Eine lithostratigraphische Übersicht gibt die Tabelle 4 wieder.

Unter dem überdeckenden Schiefer stehen im Steinbruch Wechsellagerungen aus hellen und dunklen Marmorvarietäten an.

Die Lagerungsverhältnisse sind durch eine nach Norden abtauchende Sattelstruktur gekennzeichnet. Der überdeckende Schiefer zeigt in den Randbereichen der Lagerstätte ein umlaufendes Streichen. Die Sattelachse taucht mit ca. 10° nach NNW ein.

Tektonisch liegt das Marmorvorkommen in einem Bereich, der von Falteninterferenzen gekennzeichnet ist. Ein Störungssystem unterteilt den derzeitigen Tagebau in zwei Bereiche. Die Störung verläuft nahezu NS durch

das Vorkommen. Die rezenten Spannungsverhältnisse in der Region verlaufen NNW-SSE. Dabei sind heute konvergente Bewegungen in der Region zu beobachten (TEMİZ et al., 1997). Erdbeben treten in der Region häufiger auf. Der Marmor ist schwach geschiefert. Die Schieferungsrichtung variiert im Steinbruch leicht, fällt jedoch meist nach NNW mit bis zu 10 Grad Differenz zur Schichtung des Schiefers ein.

Tabelle 4: Lithostratigraphische Abfolge und aufgeschlossene Einheiten im Steinbruch von DMCO.

Regionalgeologische Einteilung	Im Steinbruch aufgeschlossene lithologische Abfolge
Quartär	Überdeckender Schiefer (bis 60 m)
Tertiär	
Oberer Phyllit-Schiefer	
Oberer Marmor	
Kaesariani-Glimmerschiefer	
Unterer Marmor	Weißer Marmor (25 m)
	Grauer Marmor (10-15 m)
	Weißer Marmor – ? (Mind. 250 m*)
Metamorph überprägte Granite.	Nicht aufgeschlossen

*Der untere Kontakt zum Granit wurde bei einer Bohrung auf Grundwasser in 250 m Tiefe nicht erreicht.

Auf den Klüften und in den Gängen des anstehenden Marmors sind Kalzitkristallrasen und/oder tonige Füllungen zu beobachten. Die Tone zeigen sich insbesondere an Klüften, die durch Oberflächenkontakt und durch eine ausreichende Öffnungsweite das Eindringen von Oberflächenmaterial erlauben. Besonders im oberen Bereich des Marmorvorkommens, direkt unter dem Schiefer, sind diese Bedingungen gegeben. Die Kalzitkristallrasen-Neubildungen zeigen sich häufig auf Klüften ohne Oberflächenkontakt, aber mit

Kluftöffnungsweiten, die eine Wasserführung erlauben.

Problematisch stellen sich einerseits immer Klüfte dar, die haarrissartig den Marmor durchziehen, da sie vor der Gewinnung nicht gut zu erkennen sind. Andererseits existieren offene Klüfte, von denen aus Kluftwässer den angrenzenden Marmor farblich verändern, bzw. verfärben. Diese störenden Bereiche müssen herausgeschnitten werden, und man kann deshalb bei der Gewinnung dann nicht der natürlich vorgegebenen Struktur aus mit darauf angepasster Schnittführung folgen.

Die Übergangszone oder Kontaktzone (Transitionzone) zwischen dem Schiefer und dem Marmorlager ist bis zu 15m mächtig und nicht bauwürdig. Unter dem Kontakt des Schiefers zum Marmorlager ist ein Übergangsbereich aus Folgen von Schiefer einschaltungen in die Marmorlagen zu beobachten. Der Kontakt zwischen dem Schiefer, den eingeschalteten Schieferlinsen und dem Marmor ist durch Trennflächen gekennzeichnet. Die Grenzflächen der unterschiedlichen Gesteine sind potenzielle Schwächezonen beim Abbau. Direkt unter der Kontaktzone steht bauwürdiger Marmor an, eine gute Qualität, d. h. ein sehr weißer Marmor mit einer nur schwachen aber regelmäßigen gerichteten Textur. Der bauwürdige Marmor hat hier in der ersten Zone unter dem Schiefer eine Mächtigkeit von 20 bis 25 m. Darunter folgt eine Lage minderer Qualität mit einem grauen Marmor, der eine wenig homogene Textur aufzeigt. Diese Lage, mit Mächtigkeiten bis zu 15 m, im Kontakt zum oberen Marmor ist durch eine sich optisch hervorhebende Schicht grünlichen, silikatreichen Marmors gekennzeichnet, der den Steinbruchbetreibern als Markerhorizont dient. Unter dieser grünlichen Marmorlage folgt wieder ein bauwürdiger Marmor guter Qualität mit hellem weißem Material und einem relativ guten, das heißt durchhaltend einheitlichem Muster.

3.2.5 Abbau, Transport, Gewinnungsprodukte, Verarbeitungsprodukte

Marmor wurde an der südlichen Seite des Penteli seit ca. 570 v. Chr. gewonnen. Dieses alte Steinbruchrevier ist aber heute geschlossen. Vom Zentrum Athens aus kann man die Brüche an den Hängen des Penteli noch heute erkennen. Der Grund der Schließung lag in der Umweltbeeinflussung, der Staub-, Lärm- und Sichtbelästigung durch die Aktivitäten in den Steinbrüchen. Die Konzessionen wurden von der öffentlichen Hand nicht verlängert.

Auf der nördlichen Seite des Penteli, von Athen aus nicht sichtbar, liegt der Steinbruch von DMCO. Er teilt sich in zwei Bereiche. Ein westlicher Teil ist der ältere Marmorbruch und wurde mit zwei Konzessionen erworben. Östlich davon schließt sich im direkten Kontakt ein neuerer Tagebau an, der mit zwei weiteren Konzessionen erworben worden ist. Der derzeitige Tagebaubetrieb hat eine Fläche von ca. 250.000 m². Aktiver Abbau wird auf ca. 100.000 m² betrieben. Mehr darf gemäß der Konzessionen derzeit auch nicht erschlossen werden. Wird der Tagebau erweitert, müssen an anderer Stelle Rekultivierungsmaßnahmen durchgeführt werden, um die Flächennutzung bei dieser Größe zu halten. Für die untertägigen Abbaubereiche müssen gesondert Konzessionen beantragt werden.

Die Strategie bei der Gewinnung bzw. das Layout der Abbauplanung des Marmors orientiert sich derzeit nur an den Oberflächenaufschlüssen des Marmors, bzw. an der Morphologie des Abbaubereiches. Es existiert keine detaillierte Karte der regionalgeologischen Situation. Schieferung und Schichtung im Schiefer oder Marmor wurden seitens DMCO nicht aufgenommen und werden bei der Planung nicht berücksichtigt. Es existiert keine geostatistische Trennflächenanalyse des Marmors oder des Schiefers. Da keine detaillierte geologische Kartierung verfügbar ist, fehlt eine wesentliche Unterlage für die weitere Planung. Annahmen über den weiteren Ver-

lauf der geologischen Situation im tieferen Unterrund werden aus Erfahrungswerten abgeleitet.



Abb. 26 Tagebau von DMCO mit Blick auf die Zugänge zur untertägigen Gewinnung.

Es werden teilweise Kernbohrungen durchgeführt, die Aufschluss auf die anstehende Marmorqualität in den nächsten 10er Metern erlauben. Die Bohrkerns werden nur nach Farbe und Textur/Muster beurteilt, eine Charakterisierung von Trennflächen etwa mit Hilfe von RQD (Rock Quality Designation Index, vgl. Kap. 4.4.2) erfolgt nicht.

Die untertägigen Hohlräume wurden von Strossen des Tagebaus in Bereichen mächtiger Glimmerschiefer-Überlagerungen über den produktiven Marmorhorizont erschlossen (Abb. 26). Im westlichen Bereich des Tagebaus liegen auch ältere untertägige Aufschlüsse. Im östlichen Teil befinden sich die in dem Projekt aufgefahrene Testhohlräume. Die ersten Schnitte in den Marmor liegen im

Tagebau ca. 15 bis 20 Meter vertikal unter dem Schieferkontakt.

Bei der untertägigen Gewinnung in den neu aufgefahrenen östlichen Bereichen liegt die Menge an verwertbaren Rohblöcken bei nur 5 % (sonst in den alten westlichen untertägigen Gewinnungsbereichen bei bis zu 10%). Das sind nur unwesentlich mehr verwertbare Rohblöcke als im Tagebau (4 bis 5 %).

DMCO hat auf dem Betriebsgelände weiterverarbeitende Anlagen eingerichtet. Ein Sägewerk mit Kreissägen und Gattersägen zerschneidet die Rohblöcke in Unmaßplatten. Kleinere Kreissägen und Poliermaschinen werden für die Herstellung von Fliesen und Unmaßplatten genutzt. Besonders quarzreiche Blöcke, wie sie im Kontaktbereich zum Schiefer auftreten können, werden besonders verarbeitet, da die hierfür notwendigen Diamant-besetzten Kreissägen nicht verfügbar sind. Diese quarzreichen Blöcke werden im Steinbruch schon so formatiert, dass auch die vorhandenen großen Gattersägen die Rohblöcke in Unmaßplatten zerschneiden können. Die Formatierung erfolgt im Steinbruch mit Bohrhämmern und Spaltzylindern.

Rohblöcke, die wegen geringer Größe, ungeeigneter Textur oder einem zu hohen Quarzgehalt nicht in die DMCO eigene Unmaßplatten- oder Fliesenproduktion gehen, werden aussortiert. Ein großer Teil dieser Rohblöcke (ca. 60%) wird gebrochen und anschließend in Mühlen gemahlen, um zu Marmorstaub (Marble Dust) verarbeitet zu werden. Aus ihm wird z.B. Zement hergestellt, oder er wird als Füllstoff bei der Papierherstellung genutzt.

Auf diese Weise bleiben bei DMCO nur 35% des abgebauten Marmors ungenutzt und fallen als Abfall an, der im Tagebau abgekippt wird. Dies ist eine sehr intensive Nutzung des Marmors und in dieser Form bei keinem anderen Partner im Projekt CAD-PUMA zu finden.

Für einen durchschnittlichen Block von ca. 4 m Breite 1,7 m Tiefe und 2 m Höhe ergeben

sich durchschnittlich ca. 270 € Gewinnungskosten in der untertägigen Gewinnung. Die Kosten sind jedoch starken Schwankungen unterworfen, wenn z. B. Bereiche durchörtert werden müssen, die eine schlechte Qualität aufweisen. Durch diese unvorhersehbaren Gegebenheiten ist eine detaillierte Kalkulation der Gewinnungskosten für den Steinbruchbetreiber sehr erschwert.

DMCO arbeitet im Tagebaubetrieb mit Subkontraktoren, die dort den Abbau durchführen. Derzeit wird nur die untertägige Gewinnung von eigenen Mitarbeitern bestritten.

Im Steinbruch kann nur bei Temperaturen über Null Grad gearbeitet werden, da die Gewinnung auf Wasser angewiesen ist, das Seilsägen und Schrämmaschinen als Spülung benötigen. Im Sommer entstehen nicht unerhebliche Nebenkosten durch Bewässerung der Fahrwege, um die Staubentwicklung gering zu halten.

3.3 Weißwasserbruch bei Laas / Italien (LASA)

LASA MARMO SpA ist in Südtirol im Vinschgau ansässig und ist nördlichster Marmorproduzent Italiens. Der Steinbruch wird von der Firma Lechner AG bewirtschaftet (lechnermarmor.portalarm.it/index_de.asp).

3.3.1 Geografische Lage

Die Marmorlagerstätte Weißwasserbruch liegt an der Jennwand (2962 m ü. NN) in 1600 m über NN in einem Seitental des Etschtals, dem Laaser Tal (Abb. 27). Der tiefste Punkt des Laastals liegt auf 870 m Höhe über NN, es sind mindestens 700 Höhenmeter zum Hauptfirmengelände der LASA MARMO SpA in Laas zu überwinden. In zwei Bereichen wird hier Marmor gewonnen. Im Göflaner Steinbruch (2100 m ü. NN) wird im Tagebau, im Weißwasserbruch untertägig gewonnen.

3.3.2 Geologische Situation

Die Lagerstätte liegt zwischen Glimmerschiefern und Gneisen, die Hauptbestandteil der Ötztaldecke sind und sich vom Vinschgau bis zum Inn erstrecken.

Das südliche Vinschgau ist von einer ostwestlich streichenden bunten Serie aus Marmoren, Glimmerschiefern und Amphiboliten geprägt. Auf der dem Laaser Steinbruch gegenüberliegenden Seite des Etschtals liegt die Überschiebung der Schlinig-Linie.

3.3.3 Regionalgeologische Position

Das weitläufige Gebiet um den Laaser Marmor ist durch Ampibolite, Orthogneise, Augengneise, Flasergneise und Glimmerschiefer und Paragneise geprägt (Abb. 27). Südlich schließen sich Granite und Pegmatite an. Das Marmorlager des Weißwasserbruches und des Göflaner Tagebaus sind in Glimmerschiefern eingeschaltet. Es erstreckt sich vom Laas Tal bis zum Pilma Bachtal und etwas darüber hinaus. Das Alter dieser Marmore wird mit Devon angegeben (Baumgarten et al., 2000). Die Marmorlager sind etwas über 100 m mächtig.

3.3.4 Lithostratigraphische Situation, Mächtigkeit, Strukturgeologie

Der Kernbereich der weißen bankigen Marmore wird durchsetzt von Graphitschlieren und Glimmerschieferlagen. Im Kontaktbereich zu den Schiefern im Hangenden und Liegenden nimmt der Quarzgehalt zu, und es kommt hier vermehrt zu Wechsellagerungen mit diesem Nebengesteinen. Weil ein erhöhter Quarzgehalt die Marmorqualität herabsetzt, konzentriert sich der Abbau auf zwei 10 Meter mächtige Lager im unteren Bereich der Jennwand.

Das Gebiet ist tektonisch stark beansprucht. Dies zeigt sich in einer Vielzahl von kleineren, nicht immer durch die aufgeschlossenen untertägigen Grubenbaue durchhaltenden Trennflächen. Die Trennflächendichte ist hoch und homogen verteilt und so ist die Primärblockgröße vergleichsweise klein.

Die Trennflächen zeigen auf ihrer Oberfläche wenig sekundäre Kristallisation von Kalzit. Eine meist rötliche Verfärbungen des Marmors im Kontakt mit den Trennflächen ist häufiger und in einigen eingrenzbaaren Zonen zu beobachten.

3.3.5 Abbau, Transport, Gewinnungsprodukte, Verarbeitungsprodukte

Zu Beginn der Gewinnung der Laaser Marmorlagerstätte im 17. Jahrhundert wurde der Marmor übertägig im Göflaner Bruch durch Schrämen abgebaut. Dazu wurde der zu gewinnende Rohblock mit Einschnitten umfahren und dann herausgebrochen.

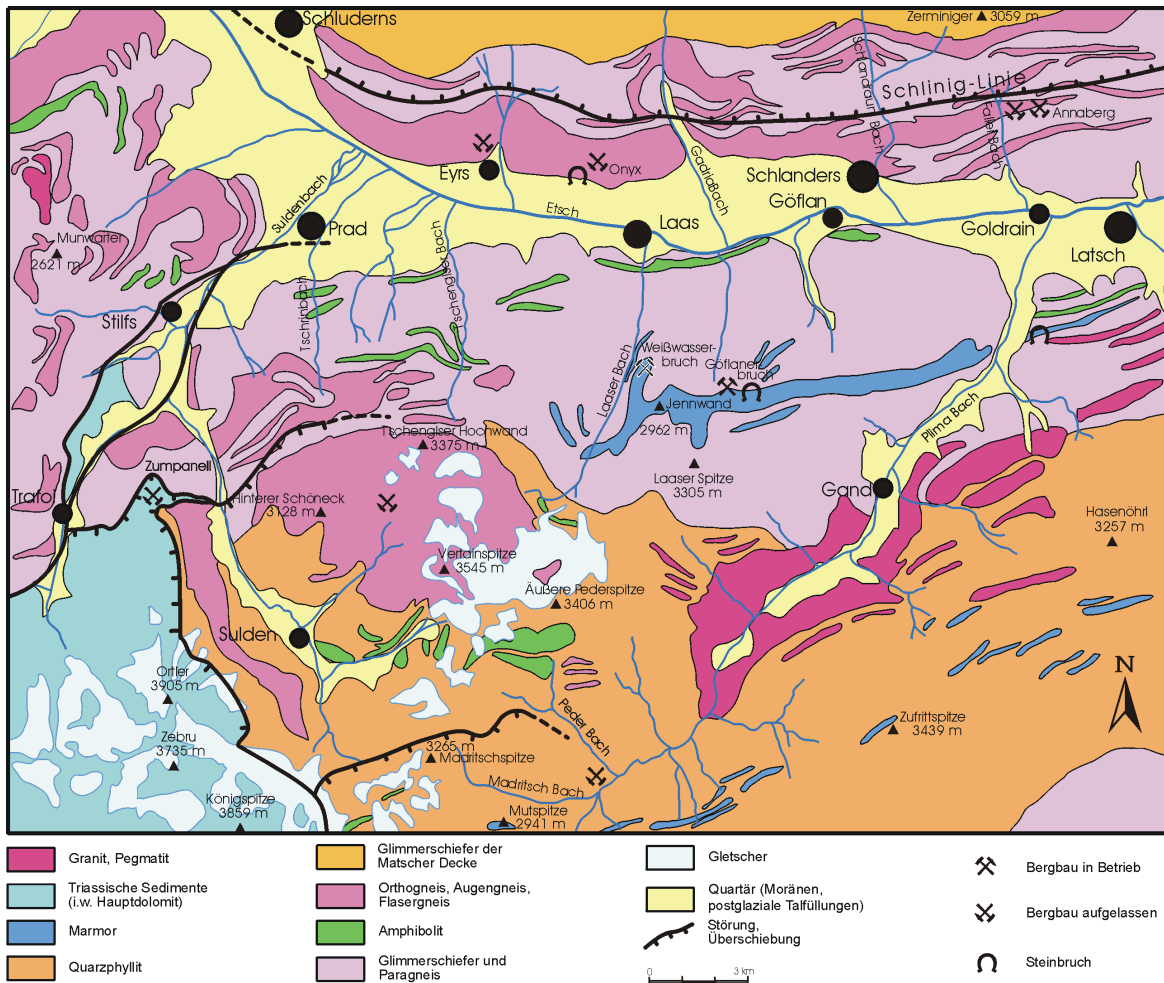


Abb. 27 Geologische Übersichtskarte des Vinschgaus (Baumgarten et al., 1998).

Der oberflächennahe, leicht erreichbare Marmor in der Marmorlagerstätte Weißwasserbruch wurde bis 1896 in Steinbrüchen gewonnen. Es war dann aber nötig, die Gewinnung nach Untertage zu verlegen. Die anfänglich verwendete Gewinnungstechnik brachte aber Schwierigkeiten mit sich. Der erste aufgefahrene Stollen war rund 15 x 20 m im Querschnitt und führte ca. 50 m tief in den Berg hinein (Abb. 28) Abgebaut wurde mithilfe der Schwarzpulversprengtechnik. Das Schwarzpulver wurde mithilfe von Bohrungen in den Marmor gebracht und hatte eine „drückende“ Wirkung. Die Mischung ist dabei jedoch entscheidend. Beim Schießen (Sprengen) kam es häufig vor, dass die Marmorblöcke so genannte „Preller“ erhielten.

Dabei wurde der Marmor durch die Explosion deformiert und im Innern bildeten sich schalenförmige Deformationsspuren, entlang derer es später zum Abplatzen des Materials kam. Oft wurden die Preller erst bei der Weiterverarbeitung im Tal erkannt (freundl. mündl. Mitteil. Berg-Ing. Fahrenspiel 2002). Weil der Transport zu Tal im Steinbruch von Lasa sehr aufwendig ist, wurde nach dem Bohren und Sprengen der gelöste Rohblock oft absichtlich umgestürzt, damit nicht sichtbare Trennflächen, entstanden durch den Abbau oder vorher schon angelegt, ihn durch die Beanspruchung beim Aufschlag zerlegten. Dadurch wollte man den aufwendigen Transport mangelhafter Blöcke zu Tal vermeiden.

Es wird auch von Bereichen im Marmor berichtet, die zu Beginn der Gewinnung keine Trennflächen aufzeigten. Während des Abbaus und oder erst nach der Gewinnung der Rohblöcke kam es häufiger vor, dass die direkt vor Ort zerplatzten und so die Arbeiter gefährdeten. Diese neu entstandenen Trennflächen sind auf die abbaubedingte Druckentlastung des Gebirges zurückzuführen.



Abb. 28 Mundloch des Stollens vom Weißwasserbruch.

Der Rohblock dehnt sich also ohne Umgebungsdruck des Gebirges aus. Bergingenieur Fahrenspiel meint „eine Gewinnung benötigte deshalb ein natürliches Trennflächensystem, damit die im Marmor herrschende Spannung abgebaut werden kann. Bereiche ohne Trennflächensysteme sind aus bergmännischer Sicht deshalb Gefahrenbereiche.“

Nach der Gewinnung mit Sprengtechniken wurde das „Drilling“ und „Blocking“ entwickelt. Der Rohblock wurde durch eng aneinander gereichte kleinkalibrige Bohrungen in einer Reihe umbohrt und anschließend mit

Keilen gelöst. Die Anwendung dieser Bohrtechnik hatte jedoch erhebliche Anforderung an die Energieversorgung vor Ort gestellt. So mussten im Steinbruch mit Hilfe von Stromaggregaten große Mengen elektrischer Energie erzeugt werden.

Gegenwärtig werden in Lasa mit Diamant besetzten Schrämmaschinen und Seilsägen (Seilschrämmaschinen) Rohblöcke gewonnen.

Der logistische Aufwand, die Rohblöcke in das 700 m tiefer gelegene Werksgelände mit Lager und den daran angeschlossenen Aufbereitungsbetrieb zu transportieren, wird mit Kränen und Seilwinden bewerkstelligt. Eine Seilbahn mit einer maximalen Tragfähigkeit von 12 Tonnen limitiert die gewinnbaren Rohblöcke in ihren Dimensionen. Sie überwindet ein Tal des Laaser Baches mit einer Breite von ca. 380 m zum gegenüber am Hang liegenden Schrägaufzug.

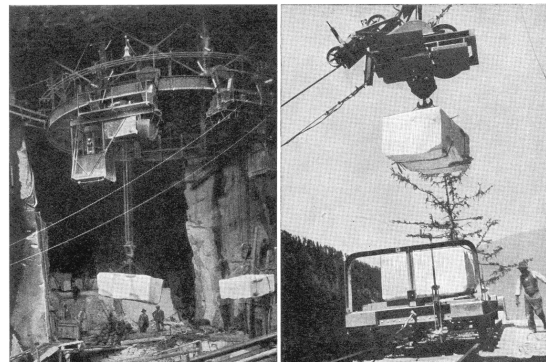


Abb. 29 Seilbahn um 1936 im Lasa Weißwasserbruch (Foto aus SEIP, 1936).

Eine am Hang angelegte Gleisanlage befördert ein Bremsgestell, auf dem der Rohblock platziert wird, mit Seilwinden zu Tal. Dort angekommen wird er wieder von der betriebseigenen Eisenbahn auf das Firmengelände gebracht.

Dieselbe Wegstrecke wie die untertägig gewonnenen, legen auch die Rohblöcke aus dem nahe gelegenen Göflaner Tagebau zurück. Sie werden nur im oberen Teilstück mit Lkws aus dem Tagebau zur Seilbahnstation gefahren.



Abb. 30 Eingangsbereiches des Weißwasserbruches. Oben durch Bohrungen, unten durch Sprengungen hinterlassene alte Abbauspuren.

Lasa Marmor besitzt eine eigene Weiterverarbeitungsanlage im Tal. Kreissägen, Gattersägen und eine Poliererei arbeiten hier die Rohblöcke auf. Ein großer Lagerplatz mit einer Vielzahl von Rohblöcken verschiedener Größen und Qualitäten liegt in unmittelbarer Nähe der Arbeitshallen. Es werden Unmaßplatten und Fliesen produziert. Individuell auf die Qualität der Rohblöcke bezogen, wird die Weiterverarbeitung durchgeführt. Die Blöcke werden meist parallel zu Homogenbereichen im Gestein, dem Wechsel von hellen und dunklen Zonen im Material folgend, geschnitten und zu Platten verarbeitet. Je größer die Platten, desto höher der zu erzielende Preis.

Vor ca. 80 Jahren lag das Ausbringen an verwertbaren Blöcken in Lasa bei ca. 1,5 % (frdl. mdl. Mitt. des Steinbruchbetreibers 2002). Heute können etwas mehr als 30 Prozent des gewonnenen Materials weiterverarbeitet werden. Der nicht verwendete Bruch des gewon-

nen Materials wird in alte Grubenbereiche als Versatzgut verbracht.

Einschaltungen von Schiefern in den Marmor werden in Lasa nicht unbedingt als mindern-des Qualitätsmerkmal gewertet. Die Kunden akzeptieren aus ästhetischen Gründen diese Vielfältigkeit im Muster durchaus, wenn dadurch die gesteinsphysikalischen Eigenschaften nicht gemindert werden, bzw. in dem Bereich, in dem das Material verbaut wird, solche Anforderungen nicht gestellt werden. Der Marmor von Lasa hat einen durchschnittlich höheren Anteil an Quarz als andere Marmore (ca. 1,5 M. %) , dadurch erhöhen sich die Gewinnungs- und Verarbeitungskosten für den Betreiber. Diamantbesetzte Sägen sind beim Abbau unbedingt erforderlich. Der hohe Quarzgehalt des Lasa Marmors hat zur Folge, dass das Produkt strapazierfähiger als andere Marmore ist und deshalb vielseitiger eingesetzt werden kann.

Im Steinbruch sind 12 Bergleute beschäftigt. Im Winter wird der aktive Abbau aus dem Göflaner Bruch völlig in den Weißwasserbruch zurück gezogen, so sind alle Bergleute ganzjährig beschäftigt. In der Weiterverarbeitung, der Sägerei und Poliererei, sind ca. 35 Beschäftigte angestellt.

An die Gemeinde muss eine von der Jahreszeit abhängige Pacht entrichtet werden. Die Pacht ist an die Menge der gewonnenen Rohblöcke gebunden. Im Sommer muss mehr für einen Rohblock gezahlt werden als im Winter. In früheren Zeiten sind einige Betreiber an der hohen Pacht gescheitert. 1998 wurden im Weißwasserbruch ca. 1270 m³ an Rohblöcken gewonnen. Im Göflaner Bruch waren es ca. 935 m³.

3.4 Steinbrüche am Monte Corchia / Italien (CCLL)

Cooperativa Condomini Lavoratori dei Beni Sociali di Levigliani s.c.r.l. (<http://www.levigliani.it/Condomini.htm>) ist ein Marmorproduzent aus Levigliani, bei Stazzema, Region Massa in der Nähe von La Spezia. Das Revier von Levigliani liegt südlich des klassischen Carrara-Reviers und der Versilia.

3.4.1 Geografische Lage

Die Steinbrüche von CCLL liegen südlich von Carrara im Massa Massiv (Abb. 31 & 32), das Teil der Alpi Apuane in der Toskana Italiens ist. Sie liegen in der Nähe des Ortes Levigliani an der Südseite des Monte Corchia oberhalb 1500 m über NN. Die gewonnen Rohblöcke müssen von dort zur Küste hin transportiert werden.



Abb. 31 Geografische Lage des Steinbruchs von CCLL⁵ in der Versilia.

3.4.2 Geologische Situation

Die nördlichen Apenninen sind ein Falten- und Störungskomplex, der aus der Kollision zwischen Korsika, Sardinien und der Adriatischen Platte vom Oberen Oligozän bis zum Miozän entstand.

3.4.3 Regionalgeologische Position

Die Basis der Apenninen ist auf ozeanischer Kruste aufgebaut, einmal durch die Liguri-

schen Einheiten und zum anderen der epikontinentalen Ablagerungen der Toskanischen Einheit. Die Toskanische Abfolge kann in zwei tektonische Untereinheiten differenziert werden: die untere, die Alpi Apuane, als metamorpher Komplex der Massa Einheit besteht aus paläozoischen bis oligozänen Metasedimenten. Die oberen Einheiten, die Toskanische Einheit bzw. Decke, besteht aus von der Oberen Trias bis zum Miozän gebildeten, sehr niedriggradig metamorphen Sedimentgesteinen (MONTOMOLI et al., 2001).

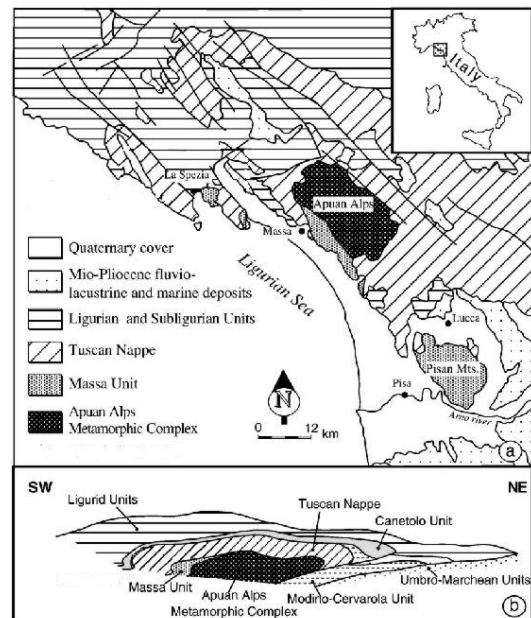


Abb. 32 Geologische Karte der nördlichen Apenninen mit einem Profil durch den Kern der Alpi Apuane (MONTOMOLI, 2001).

Der Marmor von Carrara stellt eine lithologische Einheit der Alpi Apuane dar. Es wird angenommen, dass drei Deformationsphasen während des Tertiärs unter Grünschieferbedingungen diesen prägten (PIERI et al., 2001). Es wird immer noch diskutiert, in welchen Merkmalen diese einzelnen Phasen in den Marmoren überliefert sind (MOLLI et al., 2000).

⁵ Quelle: www.versilia.org (7/2002)

3.4.4 Lithostratigraphische Situation, Mächtigkeit, Strukturgeologie

Der in den Steinbrüchen von CCLL abgebaute Marmor ist überwiegend vom Typ „Arabescato“ (siehe Kap. 3.1. Abb. 12). Es ist ein mit einem schlierigem Muster, gekennzeichnet durch viele Kleinfaltungen aus eingeschalteten dunkleren, graphitreichen Bereichen versehener Kalkmarmor. Die Lagerungs- und Mächtigkeitsverhältnisse in den verschiedenen Steinbrüchen von CCLL sind vielfältig. Zumeist sind in den aufgeschlossenen Lagerstätten von CCLL mehrere hundert Meter mächtige, sehr quarzarme Marmorlager mit einem vorrangig steilen Einfallen anzutreffen. In zwei von den insgesamt vier Steinbrüchen von CCLL, ist Schiefer aufgeschlossen, der in beiden Fällen im Hangenden des Marmorlagers aufliegt. In den Bereichen, wo eine untertägige Gewinnung stattfindet, wird dieser Schiefer aber nicht erreicht.

Das Gebiet der Lagerstätten von CCLL zeichnet sich durch einen intensiven Faltenbau aus; Störungssysteme konnten im Steinbruch nicht festgestellt werden. Die Lagerstätte, in der die untertägigen Testkammern errichtet wurden, ist durch eine im Vergleich zu den anderen im Projekt beteiligten Lagerstätten sehr geringe Trennflächendichte gekennzeichnet. Die Trennflächenabstände sind weit aber durchhaltend. In einigen Bereichen sind trennflächenkontrollierte Karst-Hohlformen mit Dimensionen von einem Dezimeter bis mehrere Metern entwickelt, die bei der Abbauplanung besonders berücksichtigt werden müssen.

3.4.5 Abbau, Transport, Gewinnungsprodukte, Verarbeitungsprodukte

Der Monte Altissimo mit den Cervoiole-Brüchen, aus denen Michelangelo seinen Marmor bezog, gehört noch heute, zusammen mit dem Monte Corchia, zu den wichtigsten Marmorbergen der Versilia (Abb. 31).

Informationen über die erste Gewinnung von Marmor in dieser Region gehen auf das erste Jahrhundert v. Chr. zurück, als das römische Reich für lange Zeit die Kontrolle über das Gebiet erlangte (BRADLEY, 1997). Schon zu dieser Zeit musste der Abbau dort fast im industriellen Maßstab abgelaufen sein, wenn man die Anzahl an Wohnhäusern und öffentlichen Gebäuden mit Marmor dieser Zeit in Rom berücksichtigt. Die frühe Abbautechnik beschränkte sich auf das Schrämen. Dabei wurde mit Schlägel und Eisen mit der Hand ein begehrter Gang um den zu gewinnenden Rohblock gehauen. Bei dieser Technik der Rohblockgewinnung arbeitete man bevorzugt entlang natürlicher Trennflächen, um den Aufwand für künstliche Trennflächen möglichst gering zu halten. Im 18. Jahrhundert wurde das Schwarzpulver als Sprengstoff im Marmorabbau eingesetzt. Sein Einsatz brachte jedoch zwei Nachteile mit sich. Zum einen wurden durch das Sprengen unförmige Blöcke aus dem Gesteinsverband gelöst, die nachträglich zugerichtet werden mussten. Zum anderen stieg die Menge an nicht verwendbaren Marmor enorm an. Dieser „Abfall“ wurde dann die Hänge heruntergestürzt. Mitunter wurden Jahre später aus diesen Marmorhalden dann doch noch verwertbare Blöcke gewonnen.

Erst 1898 wurde auf einer Internationalen Ausstellung in Paris eine Methode vorgestellt, die sich innerhalb weniger Jahre in allen Steinbrüchen von Carrara verbreiten sollte. Das System beruhte auf einem 5 mm dicken, aus drei dünnen Stahlseilen zu einer Spirale gedrehtem Endlosseil. Ein elektrischer Motor trieb das Seil an, so dass es über Umlenkrollen in jedem Teil des Steinbruches als Schneidwerkzeug verfügbar war. Bei dem Schneiden mit dieser Seilsäge oder Seilschrämmaschine kommt nur ein kleiner Teil des Seiles in Kontakt mit dem Gestein. An diesen Stellen wurden Schleifmittel wie Quarzsand aufgegeben, um die Reibung zu

erhöhen. Der Quarzsand wurde aus nahegelegenen Sandgruben geliefert.

In der gesamten Region Carrara, Massa und Versilia sind insgesamt 190 Steinbrüche aufgeschlossen. In ca. 100 aktiven Steinbrüchen wird gegenwärtig noch die Gewinnung von Marmor betrieben. Seit 1996 ist die Zahl der Beschäftigten in der Natursteinbranche im toskanischen Bezirk Apuana-Versilia um über 15 Prozent zurückgegangen. Aber noch immer finden hier über 6600 Menschen in mehr als in 1000 Natursteinunternehmen eine Beschäftigung. Als wesentliche Faktoren für die stagnierende Entwicklung in dieser Region sehen Fachleute das Erstarken anderer italienischer Natursteinregionen: Veneto im Norden, neuerdings aber auch Neapel und Campania im Süden (www.stonereport.com 2002).

Die gewonnenen Rohblöcke sind bei CCLL größer als bei den anderen Industriepartnern, da die anstehenden Primärblöcke aufgrund des weitständigen Trennflächengefüges größer sind. Als Maximum für die Rohblöcke hat man sich in der Region Carrara auf das Format mit den Kantenlängen 6 x 1,7 x 3,4 m (BTH) geeinigt. Somit sind auch die maximal ausgebrachten Rohblockgrößen von CCLL in der untertägigen Gewinnung von dieser Größe.

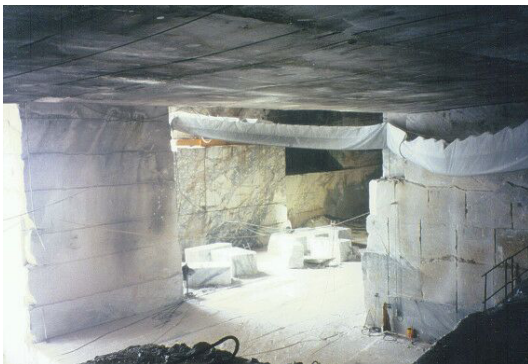


Abb. 33 Die untertägige Gewinnung bei CCLL.

Bei der untertägigen Gewinnung in dem Untersuchungsbergwerk folgt man zwei Schichtflächen, die einen Marmor sehr guter Qualität im Hangenden und Liegenden einschließen.

Diese Zone ist ca. 30 Meter mächtig. Nicht immer kann der Abbau dieser Zone folgen. So mussten an einigen Stellen Festen genau in den besten Lagerstättenbereichen stehen bleiben, damit dem angesetzten Grubengebäude die nötige Stabilität erhalten bleibt.

Es wird in größeren zeitlichen Abständen eine Aufnahme der Trennflächen und der anstehenden Marmorqualitäten durchgeführt, um die weitere Abbaureihenfolge zu planen. In einigen Fällen wurde auch die Lithostratigraphie detailliert aufgenommen. Die Schichtbänderung der Marmore ist in einigen Bereichen gut zu erkennen. Diese Bereiche mit paralleler Bänderung liefern hier jedoch eine Marmorqualität, die keinen Abnehmer findet. Dieses Material ist bei CCLL deshalb Abfall. Die wirtschaftlich interessanten, bauwürdigen Lagen sind bei CCLL von zerfließender, schlieriger, durch Kleinfalten geprägte Struktur.

Aufgrund der geringen Trennflächendichte sind die Stabilitäten in den Festen sehr hoch. Dadurch können große Hohlraumhöhen erreicht werden. Im vorhandenen untertägigen Abbau des Testbergwerkes liegt die Höhe zur Firste zur Zeit bei ca. 25 Metern.

Ursprünglich sollte die Lagerstätte, in der die untertägige Testfeste umfahren worden ist, im Tagebau abgebaut werden. Umweltauflagen verhinderten dies jedoch. So hat man sich hier zur untertägigen Gewinnung entschlossen.

CCLL besitzt keine eigenen weiterverarbeitenden Anlagen. Die Rohblöcke werden zu meist Zwischenhändlern und der weiterverarbeitenden Industrie angeboten. Sind besonders gute Rohblöcke vorhanden, werden direkt im Steinbruch Auktionen abgehalten. Die dort gestellten Anforderungen an einen Rohblock besonderer Qualität sind daher sehr hoch.

Die Firma CCLL existiert seit 1957; es sind zurzeit 35 Mitarbeiter beschäftigt. CCLL hat ihren Firmensitz in Stazzema.

Die vorhandenen vier Steinbrüche von CCLL werden als Kooperative gemeinsam verwaltet. Maschinen und Personal werden geteilt und regelmäßig den Erfordernissen entsprechend getauscht. Betriebswirtschaftliche Vergleichsdaten sind daher sehr schwer auf einen Steinbruch bezogen zu erheben. Im Winter sind die Steinbrüche aufgrund der Witterungsbedingungen nicht zu erreichen, bzw. das notwendige Wasser zum Schneiden der Rohblöcke ist gefroren. So kommt die Produktion von Oktober bis März zum Erliegen. All diese Umstände sind für eine Beurteilung der Wirtschaftlichkeit nicht förderlich.

3.5 Zusammenfassende Beurteilung der bearbeiteten Lagerstätten

3.5.1 Klassifizierung der bearbeiteten Lagerstätten nach ihrer Bauwürdigkeit

Die in der vorliegenden Arbeit untersuchten Lagerstätten können nach dem UN Klassifizierungsschlüssel Schlüssel (vgl. Kap. 1.4.1, Abb. 4) wie folgt auf ihre Bauwürdigkeit klassifiziert werden.

LASA: Existierende profitable Gewinnung. Code 1. Feasibility Studie wurde erstellt. Code 1. Die geologische Beurteilung ist sehr detailliert und beurteilt die Reserven als bauwürdig. Code 1. Der ermittelte Code: *111*.

DMCO: Existierende profitable Gewinnung. Code 1. Eine Feasibility Studie wurde erstellt. Code 1. Die geologische Beurteilung basiert auf der generellen Exploration. Code 2. Der ermittelte Code: *112*.

CCLL: Existierende profitable Gewinnung. Code 1. Eine Feasibility Studie wurde erstellt. Code 1. Die geologische Exploration basiert auf der generellen Exploration. Der ermittelte Code: *112*.

Der ermittelte Code ist in allen Fällen der am Projekt CAD-PUMA beteiligten Steinbruchbetreiber gut bis sehr gut.

Problematisch bei der Beurteilung der Pro-

zesse bezüglich der untertägigen Gewinnung von Marmor ist im Falle von DMCO und CCLL jedoch die Tagebauaktivität der Unternehmen. Die untertägige Gewinnung kann von den Produktionsprozessen nicht einfach losgelöst beurteilt werden. Ressourcen der Unternehmen aus dem Tagebau werden auch in der untertägigen Gewinnung eingesetzt. Nur im Falle von Lasa ist eine rein untertägige Gewinnung mit eigenständigen Ressourcen für den Marmorabbau vorhanden und einschätzbar bezüglich ihrer wirtschaftlichen Faktoren. Die vorliegenden rohstoffwirtschaftlichen Informationen sind deshalb nicht uneingeschränkt vergleichbar und ohne weiteres einfach zu bewerten.

Sehr schwer abzuschätzen sind trotz der Bemühungen um einheitliches EU-Recht die entstehenden Nutzungskonflikte des Natursteinvorkommens mit Trinkwasserschutzgebieten und Naturschutzgebieten. Einer Abwägung der konkurrierenden Landschaftsfunktionen muss die Bewertung der Landschaftspotenziale vorangehen (ENGELHARD & WYCSIK, 2001, SCHILKA, 2003).

3.5.2 Generelles beschreibendes Modell für Marmorlagerstätten.

Basierend auf den Beobachtungen in den beschriebenen Marmorlagerstätten, lassen sich folgende Anforderungen für die Planung untertägiger Gewinnung von Marmor zusammenfassen.

- Der Lagerstättenumfang und die –form sollte sich durch eine laterale Ausdehnung von mehr als 100.000 m² und eine Mächtigkeit des Marmorlagers von mehr als 50 m auszeichnen. Die Lagerstätten sollten in einer Höhe < 1000 m über NN liegen. Der abbauwürdige Marmor-Horizont sollte mindestens 20 m mächtig sein, da Übergänge zu den hangenden bzw. liegenden siliziklastischen Metasedimenten in den Übergangszonen eine typische Schwächezo-

ne darstellen. Eine weite horizontale Erstreckung der Lagerstätte ist für die Gewinnungstechnik von Vorteil. Begleitgesteine wie Quarzphyllite, Glimmerschiefer und Paragneise treten in den Übergangsbereichen in Wechsellagerung mit dem Marmor auf. Scharfe Kontakte zwischen Begleitgestein und Marmor verringern die Stabilität eines möglichen Hohlraumes im Marmor. Wechsellagerungen, die sich weit in das bauwürdige Marmorlager erstrecken, sind qualitätsmindernd.

- Die Mineralogie eines bauwürdigen Kalzitmarmors ist gekennzeichnet durch einen hohen CaCO_3 Gehalt von mindestens 96 M. % und einen niedrigen SiO_2 -Gehalt kleiner 2 M. %. Sonstige Akzessorien wie Dolomit sollten mit weniger als 1 M. % vertreten sein.
- Die Kalzitkristalle sollten für eine Verwendung in Massenprodukten eine fein- bis mittelkörnige Größe aufweisen und eine homogene Verteilung zeigen.
- Von besonderer hoher Qualität sind reinweiße Marmore. Muster im Marmor durch Wechsellagerungen von silikatischen und graphitischen Bestandteilen erzeugt, sollten homogen entwickelt sein. Die Verteilung der Muster sollte sich homogen über die gesamte Marmorlagerstätte erstrecken.
- Die durchschnittliche Trennflächenabstandsweite sollte größer 1,5 m sein und ist bei den untersuchten Marmorlagerstätten nicht größer als 5,5 m.
- Die beobachteten Primärblockgrößen liegen zwischen 2 und 80 m³. Die daraus gewonnenen Rohblöcke sind 1,8 bis 17 m³ groß. Ein Rohblock sollte die typischen Maße (BTH) von 5 x 1,7 x 2 m aufzeigen.
- Die Verkarstung ist ein besonderes Merkmal der Marmorlagerstätten. Die Aufweitung der Trennflächen durch Auflösung des Marmors und die mögliche anschließende tonige Verfüllung dieser Klüfte verringert die Stabilität eines bergmännischen Hohlraumes im verkarsteten Marmor. Die Ver-

färbung des im Kontakt zu den offenen Trennflächen stehenden Marmors durch Oxidation von Eisen ergibt eine typische rotbraune Färbung, die extrem qualitätsmindernd ist.

- Durch die untertägige Gewinnung ist der Lärm-, Staub- und Sichtschutz für die Umwelt weitestgehend gewährleistet. Die untersuchten untertägigen Gewinnungsstätten sind jedoch immer aktiven, oder stillgelegten Tagebaubetrieben benachbart, für die diese Bedingungen nicht immer gegeben sind.
- Eine ausreichende Wasserversorgung muss gewährleistet sein, und der Grundwasserschutz muss sichergestellt sein.
- Die Jahresproduktion der Marmorwerksteingewinnung sollte mindestens 1800 m³ an verkaufsfähigen Rohblöcken betragen.

4 Anforderungen an ein WBS für die untertägige Gewinnung von Marmor

Zur Systementwicklung eines WBS ist eine phasenorientierte Vorgehensweise (BIETHAHN & HOPPE, 1991; CURTH et al., 1991) sinnvoll (Abb. 34). Die Phasen beschreiben die einzelnen Planungsschritte, die bei der Entwicklung berücksichtigt werden müssen.

4.1 Grundsätzliche Vorgehensweisen bei der Entwicklung von Wissensbasierten Systemen - Entwicklungsphasen

In der ersten Phase muss das Problem identifiziert werden, die Systementwickler müssen sich mit dem Problem vertraut machen (Abb. 34). Unter Umständen sind sie nicht Experten in dem Bereich, für den das System entwickelt werden soll. Intensive Literaturstudien, direkte Beobachtungen vorort über die Problematik sind notwendig. In dieser Phase werden auch die Anforderungen an ein WBS definiert.

In der zweiten Phase ist die Konzeptualisierung des zu entwickelten Systems notwendig: das in der ersten Phase erworbene Wissen wird in Konzepten repräsentiert. Sowohl das erworbene Wissen der ersten Phase, als auch die Konzeptualisierung müssen ständig reformuliert werden. Informationen, die während der ersten beiden Phasen akquiriert werden, ändern das Basiswissen und somit die Anforderungen und die Konzepte.

Erst in der dritten Phase kommt es zur Strukturierung des Wissens. Mithilfe von Formalismen sollen die Zusammenhänge dargestellt werden. Aus den Formalismen entwickelte Strukturen werden in der nächsten Phase in Form von Regeln abgebildet.

Die letzte Phase stellt das Testen der Regeln dar. Die Überprüfung der Plausibilität kann

oft zur neuen Formalisierung der Strukturen führen. Daraus leiten sich Verfeinerungen ab, die eine Neuformulierung der Regeln nach sich ziehen. Am Ende des Phasenkonzeptes steht ein Prototyp, der nach WATERMAN (1986) verschiedene Entwicklungsstufen haben kann. Der Demonstrationsprototyp mit 50 bis 100 Regeln gibt einen kleinen Ausschnitt des Problems wieder und zeigt die Machbarkeit eines WBS auf. Der Forschungstyp beschreibt das Fachgebiet weitestgehend mit 200 bis 500 Regeln. Der Feldprototyp mit 500 bis 1000 Regeln ist im praktischen Einsatz ausgiebig getestet.

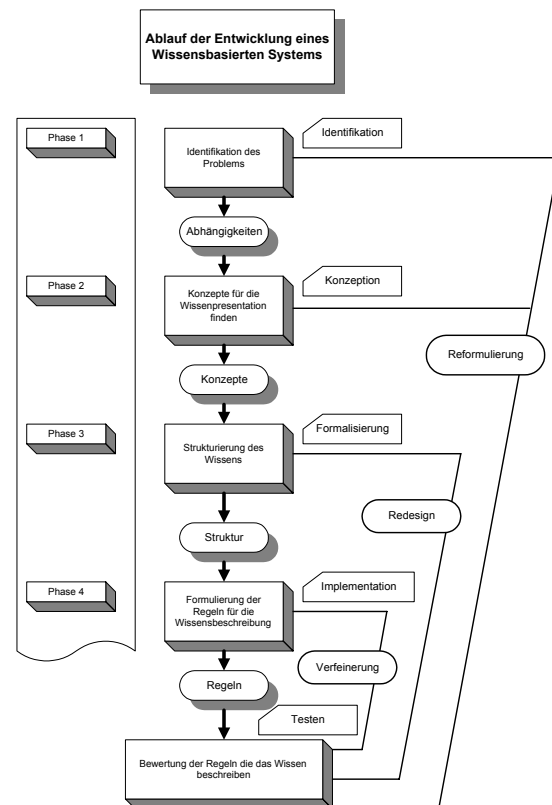


Abb. 34 Stufen des Prototypings eines WBS (nach CURTH et al., 1991).

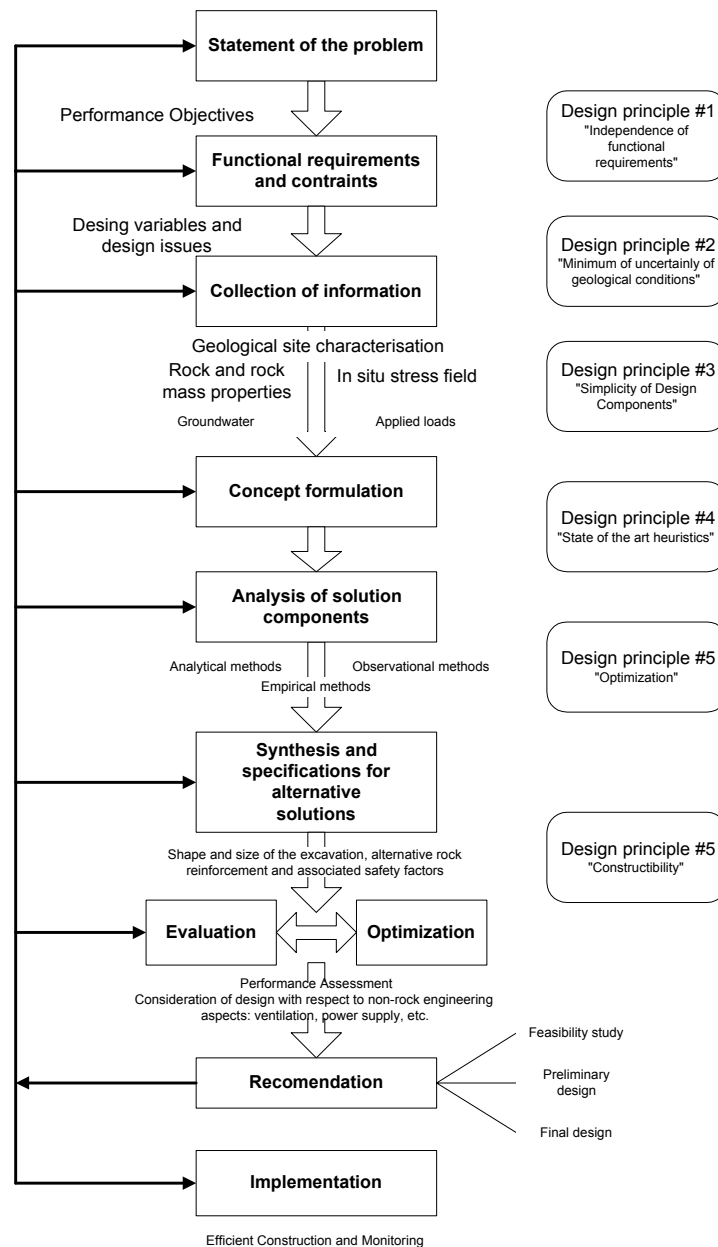


Abb. 35 Vorgeschlagene Entwicklungsmethodik für felsmechanische Systeme, inklusive Entwicklungsprinzipien (BIENIAWSKI, 1992).

Das hier entwickelte System kann als Forschungsprototyp klassifiziert werden. Dies gilt sowohl hinsichtlich der Zahl der Regeln als auch der thematischen Abgrenzung des Fachgebietes „untertägige Gewinnung von Marmor“. Die Planungsmethoden eines Entscheidungshilfesystems in der Felsmechanik

beschreibt BIENIAWSKI (1992). Er geht von aufbauenden Regeln aus, die in den einzelnen Schritten zu einem Ergebnis führen, welche am Ende der Regelkette die Konstruktion eines untertägigen Hohlraumes zulässt. Für das hier entwickelte Wissensbasierte System wurde das Modell BIENIAWSKI (1992) als

Grundlage übernommen (Abb. 35). Jedoch sind anders als bei dem von BIENIAWSKI (1992) entwickeltem System bei dem vorliegenden System für die untertägige Gewinnung von Marmor nicht nur felsmechanische, sondern vor allem zahlreiche relevante geologische und auch abbautechnische Parameter zu berücksichtigen.

4.2 Entwicklungsphasen des WBS „Untertägige Marmorgewinnung“

Zu Beginn der Entwicklung des WBS „Untertägige Gewinnung von Marmor“ wurde als erster Schritt eine umfangreiche Literaturrecherche durchgeführt. Eine Bestandsaufnahme zeigte recht schnell, dass wenig Literatur explizit über die untertägige Gewinnung von Marmor existiert. Regelwerke sind gar nicht verfügbar. Einzelne vereinfachte Regeln für die Gewinnung von Naturwerkstein im Tagebau oder Untertage können z. B. aus dem Hard Rock Miner's Handbook adaptiert werden (DE LA VERGNE, 2003). Um die Problematik in der ersten Stufe evaluieren zu können, war es notwendig, sich vor Ort bei den Marmor produzierenden Betrieben einen Überblick zu verschaffen. In dieser ersten Phase wurden die einzelnen Steinbrüche besucht. Mit den dortigen Experten wurden Interviews geführt, die das Wissen erweiterten und die Problematik beleuchteten. Beobachtungen vor Ort erweiterten das Wissen. Die inhaltlichen Eckdaten für die Entwicklung des Systems waren innerhalb eines halben Jahres erarbeitet. Die Anforderungen an das System konnten definiert werden.

Im nächsten Schritt der Entwicklung wurden die Ergebnisse der Wissenschaftlichen Part-

ner und der beteiligten Marmorproduzenten in das System integriert. Die Informationen, die in das WBS flossen, resultieren aus den geologischen Beobachtungen, der detaillierten Trennflächenaufnahme, der geomechanischen Beurteilung, der Rohblockaufnahme und der wirtschaftlichen Beurteilung der Gewinnung (Abb. 36).

Die geologischen Informationen wurden in einer Datenbank (*Microsoft Access*) zusammengestellt.

Die Ergebnisse der Trennflächenanalyse mit Hilfe eines Trennflächen-Blockgenerators (*RESOBLOK*, siehe Kap. 4.3) wurden in das WBS integriert. Es wurden im System Schnittstellen entwickelt, die einen Informationsaustausch zwischen den Komponenten ermöglichen (*EE2Surpac*, siehe Kap. 4.3). Die Informationen der Partner aus anderen Trennflächen-Blockgeneratoren (3DEC) wurde in das WBS aufgenommen.

Die zur Beurteilung einer existierenden Lagerstätte notwendigen Informationen werden in einer Abfrage gesammelt und in das Entscheidungshilfesystem, ein regelbasiertes System (Decision Support System – *Elements Environment* siehe Kap. 4.3) übergeben und ausgewertet.

Der gesamte Datenfluss und der Anteil der von der TU Berlin und hier in dieser Arbeit vorgelegten entwickelten Teile, werden in der zusammenfassend Abbildung 36 dargestellt.

Im folgenden Kapitel folgt eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Komponenten des WBS.

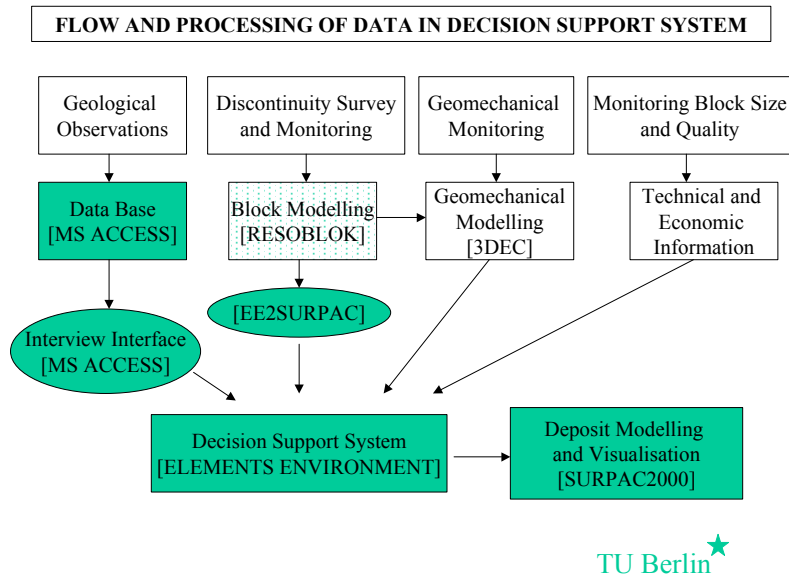


Abb. 36 Datenfluss und Verarbeitung im Projekt CAD-PUMA. Unterlegt sind die Anteile der TU Berlin, d. h. die in dieser Arbeit entwickelten Teile.

4.3 Komponenten des WBS

Das WBS besteht aus mehreren Einzelkomponenten, die keine abgeschlossene Einheit im Sinne eines einzigen Programms bilden. Verschiedene Programme kommen nacheinander zum Einsatz, um zu einem Ergebnis zu gelangen.

Bei der durchgeführten geowissenschaftlichen und geotechnischen System- und Problemanalyse der untertägigen Gewinnung von Marmor wurden vielfältige Faktoren und deren Abhängigkeiten festgestellt. Die geowissenschaftlichen und geotechnischen Daten wurden mithilfe eines Mindmapping Tools (siehe Kap. 4.4.1.1 und 5.1) erfasst. Diese gewonnenen Informationen wurden strukturiert und in einer geowissenschaftlichen Datenbank zusammengefasst angelegt (Abb. 37). Alle in der geowissenschaftlichen Datenbank zusammengetragenen Informationen werden in dem regelbasierten Entscheidungshilfesystem bewertet. Das Ergebnis der Analyse wird in Textform ausgegeben. Die geowissenschaftliche Datenbank zur untertägigen Gewinnung von Marmor und das regelbasierte Entscheidungshilfesystem sind über die

Informationen zur Bewertung der untertägigen Gewinnung von Marmor miteinander verbunden. Die Funktionen des regelbasierten Entscheidungshilfesystems beziehen sich direkt auf die aus der geowissenschaftlichen Datenbank exportierten Informationen. Im regelbasierten Entscheidungshilfesystem ist die Auswertung der Informationen erst durch die gewonnenen und in Regeln umgesetzten Abhängigkeiten und die daraus abzuleitenden Empfehlungen für eine Optimierung der untertägigen Gewinnung von Marmor gegeben. Die Entwicklung des WBS setzte voraus, dass diese beiden Komponenten, Informationen der geowissenschaftlichen Datenbank und die Regeln im Entscheidungshilfesystem, ständig abgeglichen wurden. Hierfür war die Entwicklung einer einfachen Schnittstelle zwischen der geowissenschaftlichen Datenbank und dem regelbasierten Entscheidungshilfesystem notwendig. Die entwickelte Schnittstelle bereitet die Daten der geowissenschaftlichen Datenbank soweit auf, dass die Informationen in dem regelbasierten Entscheidungshilfesystem eingelesen und weiterverarbeitet werden können.

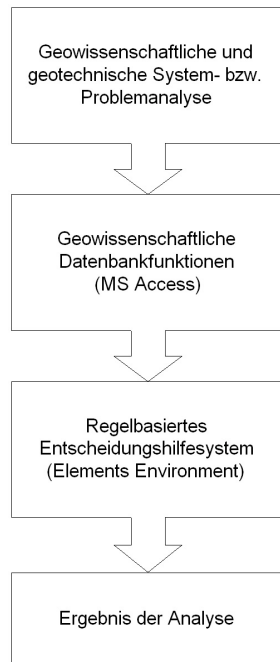


Abb. 37 Komponenten des WBS.

Bei der Entwicklung des WBS stellte sich heraus, dass der Beurteilung der Verteilung von Trennflächen eine besondere Stellung zukommt. Eine detaillierte Trennflächenanalyse ist daher notwendig (Abb. 38). Die zur Trennflächen-, Primär- und Rohblockanalyse verwendete Software *RESOBLOK* wurde daher um eine Schnittstelle erweitert, die es erlaubt, eine regelbasierte Primär- und Rohblockanalyse durchzuführen. Die Ergebnisse können durch eine entwickelte Software-schnittstelle in *Surpac2000* dargestellt werden.

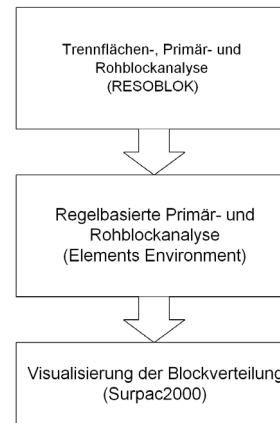


Abb. 38 Regelbasierte Trennflächen-, Primärblock- und Rohblockanalyse.

Ein HTML-Dokument, das über die *Microsoft Access* Applikation der geowissenschaftlichen Datenbank erreichbar ist und in einem HTML-Browser aufgerufen werden kann, erläutert relevante Begriffe (in englischer Sprache), die in der untertägigen Gewinnung Verwendung finden.

4.4 Aufbau und Funktion des Systems

Das System wurde auf einem Intel-kompatiblen Rechner entwickelt. Empfohlen wird die parallele Installation zweier Betriebssysteme (Windows/Linux, vgl. auch Tab. 5).

4.4.1 Programme

Windows NT/2000 ist Voraussetzung für die eingesetzte Software *Elements Environment* (EE) und *Surpac2000*. Andere Plattformen sind laut Hersteller aber möglich. *RESOBLOK* unter Linux ist als Quellcode verfügbar und konnte den verwendeten Distributionen angepasst werden. Sowohl die empfohlene RedHat Distribution, als auch SUSE Linux wurden verwendet.

Für die volle Funktionstüchtigkeit der Access Datenbank ist die Installation des Microsoft Internet Explorers 4.0 oder größer wegen einiger ActiveX Erweiterungen notwendig.

4.4.1.1 Decision Explorer

Decision Explorer ist eine Mind Mapping/Cognitive Mapping Software, mit deren Hilfe Zusammenhänge und Abhängigkeiten von Prozessen abgebildet und analysiert werden können. Sie bietet die Möglichkeiten, die gesammelten Informationen aus der ersten Phase der Entwicklung des WBS abzubilden und die Zusammenhänge zu visualisieren. Als Werkzeug zur Erfassung und Visualisierung komplexer Sachverhalte ist es gerade in Arbeitsgruppen ein nützliches Werkzeug zur gemeinsamen Beschreibung und Abstimmung von Wissen. Das Verständnis für Einflussfaktoren und ihre Einwirkungen auf Prozesse kann auf einfache Art und Weise in den Arbeitsgruppen abgestimmt werden. Planungskonzepte können so strukturiert erarbeitet und aufgebaut werden. Die Faktoren der untertägigen Gewinnung von Marmor wurden in verschiedenen Modellen erarbeitet (siehe Kap. 5.1).

4.4.1.2 Microsoft Access

Der Aufbau der Wissens- und Datenbank, in der die Informationen über die zu bewertenden Marmorvorkommen gespeichert werden, ist mit der entsprechenden Datenbanksoftware relativ einfach zu bewerkstelligen. Das Management von geologischen Datenbanken ist in den letzten Jahren wesentlich weiterentwickelt worden, von rein Text-basierenden Datenbanken (FRIZADO, 1992) zu multimedialen Datenbanken, die, mit Programmiersprachen ausgestattet, umfangreiche und detaillierte Datenaufbereitung ermöglichen. Für die geowissenschaftliche und geotechnische Datenbank wurde *Microsoft (MS) Access* verwendet. *MS Access* bietet die Möglichkeit, sowohl Datenbanken zu verwalten als auch Benutzer- und Softwareschnittstellen zu entwickeln (Abb. 39).

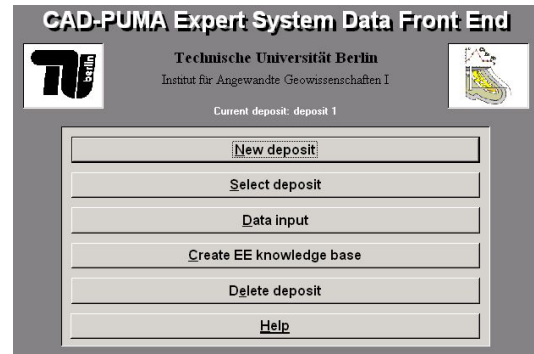


Abb. 39 CAD-PUMA Expertensystem Data Front End auf der Basis von MS Access.

Die Datenbank aus der ersten Entwicklungsphase bildete dabei die Basis des in *MS Access* entwickelten Systems. Basierend auf diesen Daten wurde eine Benutzerschnittstelle entwickelt, die es ermöglicht, interaktiv Informationen über das zu untersuchende Marmorvorkommen einzugeben und zu speichern. Die verwendete Expertensystem-Shell *Elements Environment* (Kap. 4.4.1.3) selbst bietet keine ausreichende Möglichkeit, mit einfachem programmiertechnischem Aufwand Datenbank-basierte Informationsverwaltung zu realisieren. In *MS Access* wurde deshalb eine Schnittstelle zu *Elements Environment* entwickelt, die es erlaubt, die Informationen zu exportieren. Die *MS Access* Applikation erstellt automatisch Dateien, die in *Elements Environment* importiert und mit den entwickelten Regeln bearbeitet werden können. Die Eingabe und Abfrage von Daten erfolgt in der *MS Access* entwickelten Applikation *ESDF.MDB*, Expert System Data Front End (Abb. 39).

Zwei Programmteile des *ESDF* sind dabei entwickelt worden. Die Eingabe der Abfragen und Definitionen der Variablen können vom Systementwickler in einer eigenen Applikationsmaske vorgenommen werden. Diese Applikation ist eine ausgelagerte Bearbeitungsmaske, in der alle relevanten Punkte zum Aufbau einer Frage und die daraus abzuleitenden Variablen definiert werden können (*ESDF_data_edit.MDB*) (Abb. 40). Die Abfragen der Informationen vom Benutzer wer-

den in der eigentlichen *MS-Access*-Applikation durchgeführt. Der Programmteil zur Entwicklung der Fragen muss über den *MS Access* Verknüpfungsassistenten mit der eigentlichen Access Applikation verbunden

werden. In der eigentlichen *MS Access* Applikation (Abb. 39 & 40) können verschiedene zu beurteilende Marmorvorkommen als Fallbeispiele angelegt werden.

Abb. 40 Bearbeitungsmaske des MS Access Data Front End. „Category“ beschreibt die Zugehörigkeit zu den Modulen (siehe Kap. 5.1). „EE Variable“ ist die für *Elements Environment* reservierte Variable. Der Typ der Variable wird in „EE Datatype“ definiert. Minimum, Maximum und Default Value beschreiben den Wert. Einen internen Vermerk über die Bewertung oder andere Informationen findet man unter „Appraisal“. „ID“ ist die fortlaufende Reihenfolge in der Datenbank, „QuestionSequenceNo“ die Reihenfolge im Abfragemodus.

Die während einer Sitzung gesammelten Informationen können gespeichert und zu einem späteren Zeitpunkt wieder abgerufen werden. Am Ende der Beantwortung einiger oder aller Fragen können die eingegebenen Daten nach *Elements Environment* exportiert werden.

Eine Abfrage startet anschließend auf Wunsch *Elements Environment* mit den eingegebenen Daten und den eingestellten Regelwerken. Letztere können in einer Setup-Einstellung (Abb. 41) vorgegeben werden.

Abb. 41 Setup des Experten Systems.

Die eigentliche Dateneingabe wird über den Menüpunkt „Data Input“ erreicht. Nachdem festgelegt wurde, zu welchem Modul (siehe Kap. 5.1) zugehörige Fragen beantwortet werden sollen, werden die Fragen der Reihenfolge nach wie in Abb. 42 eingeblendet.

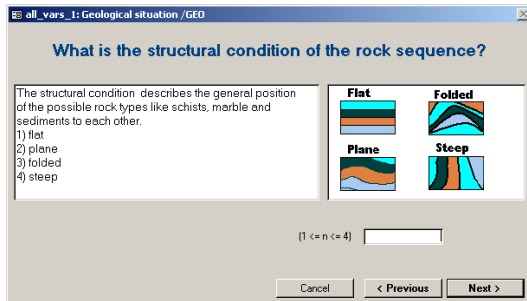


Abb. 42 Beispiel eines Fragedialogs mit dem MS Access Expert System Data Front End. Im rechten Fenster ist eine einfache schematische Abbildung, die geologische Lagerungsverhältnisse darstellt, ausgewiesen. Unten rechts das Eingabefeld mit dem möglichen Wertebereich.

4.4.1.3 Elements Environment

Die Expertensystem-Shell *Elements Environment* ist ehemals von der Firma Neuron Data, jetzt als *Blaze Advisor* von HNC Software, entwickelt worden. Die Software wurde bereits in anderen Projekten an der TU Berlin eingesetzt (Kap. 2.3). Die Software stellt einige Voraussetzungen an die Entwicklungsumgebung. Eine Installation von *MS Visual C++* wird vorausgesetzt, da ein Compiler während der Laufzeit notwendig ist.

Elements Environment bietet eine Vielzahl von numerischen Funktionen, sodass ein Entwickeln von zusätzlichen Routinen außerhalb, d. h. in anderen Anwendungen, nicht notwendig war. Alle für das Projekt notwendigen mathematischen Anforderungen konnte es erfüllen. Andere ähnliche Produkt-Pakete bieten nicht diese Vielfalt an Möglichkeiten. Die in *Elements Environment* entwickelten Regelwerke können in den Nachfolger *Blaze Advisor* importiert werden. *Elements Environment* gibt die Ergebnisse der Analyse in

Textform in einem Ereignisprotokoll aus (Abb. 43)

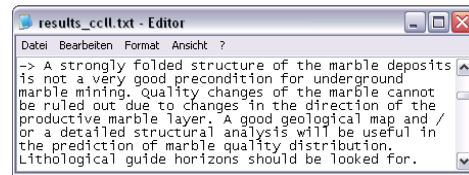


Abb. 43 Ausgabefenster von *Elements Environment*.

Die Entwicklung von Regeln in der Shell von *Elements Environment* ist relativ komfortabel. Ein Regelbrowser und auch ein Objektbrowser erleichtern die Arbeit. Eine Baumdarstellung zeigt die Abhängigkeit der Regeln und Objekte voneinander. Ein Transcript-Fenster zeigt während der Laufzeit die Ergebnisse an (Abb. 44).

Zentraler Bestandteil des Expertensystems ist die Inferenzmaschine (Inference Engine), die Problemlösungsstrategien umsetzt. Die Anfrage an das Expertensystem werden mithilfe der Regeln und der Inferenzmaschine beantwortet. Regeln sind so aufgebaut, dass eine Wenn- Dann- Abhängigkeit zugrunde gelegt wird (vgl. Kap. 4.5.3).

4.4.1.4 MS Visual C++

Microsoft Visual C++ (ab Version 4.0) ist für die Entwicklung und die Laufzeitumgebung von *Elements Environment* notwendig.

4.4.1.5 SPSS

*SPSS*⁶ wurde für einige statistische Analysen der Blockverteilungen verwendet.

4.4.1.6 Surpac2000⁷

Surpac2000 findet hauptsächlich Verwendung im Bergbau. Bergbauliche Situationen im Tagebau wie auch Untertage können mit *Surpac2000* modelliert und visualisiert werden. Die Darstellung geologischer Komplexe

⁶ <http://www.spss.de>

⁷ <http://www.surpac.com>

ist möglich. Wichtig für die Anwendung im Rahmen der Arbeit sind die geostatistischen und statistischen Methoden, die *Surpac2000* zur Verfügung stellt. Informationen über Gehalte und Verteilung von Daten können raumbezogen analysiert werden. Hierzu stehen verschiedene statistische und geostatisti-

sche Methoden (Kriging, Invert Distance, Nearest Neighbor usw.) zur Verfügung, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit genutzt wurden.

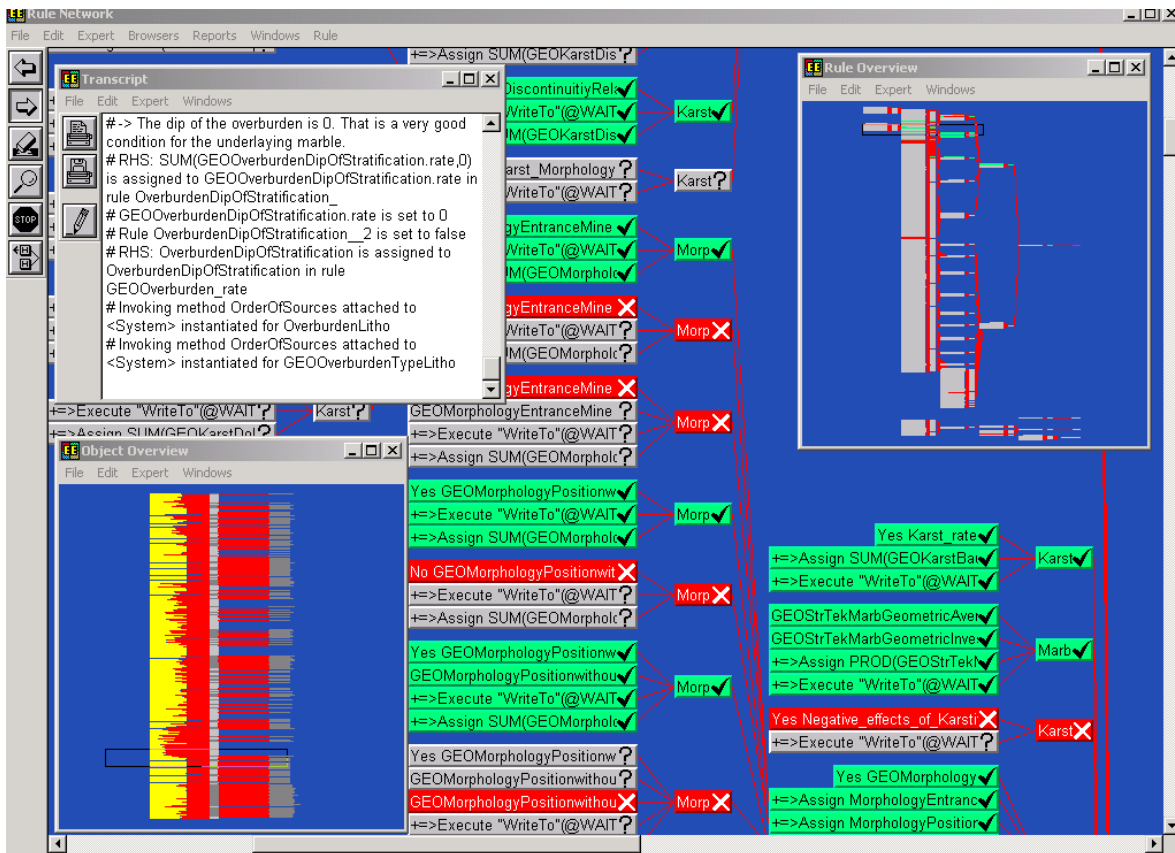


Abb. 44 Arbeitsumgebung von *Elements Environment*.

4.4.2 Zusätzlich für das WBS entwickelte Tools und Schnittstellen

Es wurden Schnittstellen entwickelt, die einen Datenaustausch zu bestehenden Programmen ermöglichen.

4.4.2.1 RESOBLOK

RESOBLOK ist ein Blockgenerator zur Trennflächenanalyse in Festgestein und setzt in der aktuellen Version als Betriebssystem Linux voraus. Ein Blockgenerator stellt die Trennflächen und die daraus entstehenden Blöcke in einem Festgesteinskörper dar. Es

wurde ursprünglich von HELIOT (1988) entwickelt. Seitdem ist von vielen Autoren der Quellcode weiter ausgebaut worden. Zur Zeit wird *RESOBLOK* maßgeblich am Institut National de l'Environnement et des Risques (INERIS, Nancy Frankreich) weiterentwickelt. *RESOBLOK* ist in verschiedene Module unterteilt. Im Teil, der sich mit der Generierung der Blockdaten beschäftigt (BG, Blockgenerator), kann das mathematische Modell eines Gesteinskörpers und seiner Trennflächen räumlich dargestellt werden. Eine „Zone of Interest“ (ZOI), definiert durch

Höhe, Breite und Länge, wird durch die Beschreibung von enthaltenen Trennflächen dargestellt. Die Darstellung erfolgt deterministisch, d. h. jeder Block wird so dargestellt wie im Gelände oder Untertage gemessen. In unbekannten, nicht aufgeschlossenen Bereichen wird mit Hilfe der Iteration der gemessenen Daten ein weiterer Verlauf der Trennflächen und der Verteilung der Blöcke simuliert (Abb. 45).

Die gemessenen Trennflächen, die der Analyse zugrunde liegen, können auch in Form ihrer hydraulischen Eigenschaften beschrieben werden, sodass Reibungskräfte in die Berechnungen einfließen. In einem weiteren Modul (BSA, Block Stability Analysis) werden Statistiken der Stabilität von Blöcken über einem simuliertem Hohlraum berechnet.

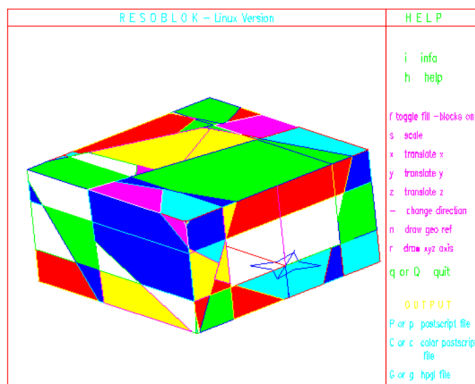


Abb. 45 *RESOBLOK* dient zur Berechnung und Darstellung von Trennflächen und Blöcken im Festgestein.

Die gewonnenen Daten können nach *3DEC*, einem weiteren Programm zur Berechnung von geomechanischen Gesteinsparametern, exportiert werden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit ist eine Schnittstelle in *RESOBLOK* nach *Elements Environment* entwickelt worden, die es ermöglicht, Daten über die Blocklage, die Blockgröße und die räumliche Position zu einem modellierten Hohlraum aus *RESOBLOK* zu exportieren und weiter zu verarbeiten (vgl. Kap. 4.4.2.2).

4.4.2.2 *EE2Surpac*

Um Daten über Rohblockverteilung und -größe zu berechnen, wurde *RESOBLOK* um eine Schnittstelle erweitert. Aus *RESOBLOK* können Rohblock-Informationen nach *Elements Environment* exportiert werden. In *Elements Environment* werden die Rohblockdaten nach verschiedenen Kriterien gefiltert, die dann mit einem weiteren eigens entwickelten Tool *EE2Surpac* nach *Surpac2000* konvertiert werden können, um sie dort grafisch darzustellen (vgl. Abb. 38).

EE2Surpac ist ein in *MS Visual Basic* entwickeltes Tool und konvertiert Daten von *Elements Environment* in ein von *Surpac2000* lesbares Format. Damit können Daten aus *RESOBLOK* in *Elements Environment* verarbeitet, d. h. regelbasiert nach Eigenschaften gefiltert und anschließend in *Surpac2000* visualisiert werden.



Abb. 46 *EE2Surpac* konvertiert Daten von *Elements Environment* nach *Surpac2000*.

Die Filtermöglichkeiten im Rahmen des Projektes bezogen sich in erster Linie auf die Volumengröße einzelner in *RESOBLOK* generierter Daten.

4.4.3 Übersicht der verwendeten Programme
Die Anwendung des in dieser Arbeit entwickelten Systems ist wegen seiner Komplexität und der Verwendung vieler unterschiedlicher Softwareprodukte beim Benutzer mit einem beträchtlichen computertechnischen Aufwand verbunden.
Zusammenfassend gibt Tabelle 5 eine Übersicht der verwendeten Programme.

Der Quellcode des WBS für Element Environment, sowie die anderen entwickelten Programme, stehen unter der URL mindepo2.bg.tu-berlin.de/kbsumm zum Abruf bereit.

Tabelle 5: Verwendete Programme im WBS.

Name	Betriebssystem	Version	Besonderheiten	Verfügbarkeit
<i>Decision Explorer</i>	Win 95/98/NT/2k/XP	3.2		www.banxia.com
<i>Microsoft Access</i>	Win 95/98/NT/2k/XP	2000		www.microsoft.de
<i>Elements Environment</i>	Windows NT/2k	2.1	Nicht mehr verfügbar. Nachfolger Blaze Advisor bietet Import-Möglichkeiten	www.blazesoft.com
<i>Microsoft Visual C++</i>	Win 95/98/NT/2k/XP	> 4.0	Wird benötigt von <i>Elements Environment</i>	www.microsoft.de
<i>Internet Explorer</i>	Win 95/98/NT/2k/XP	> 5.0	Wird benötigt von <i>Microsoft Access</i>	www.microsoft.de
<i>SPSS</i>	Win 95/98/NT/2k/XP	10		www.spss.com
<i>Surpac2000</i>	Win 95/98/NT/2k/XP	3.2-p		www.surpac.com
<i>RESOBLOK</i>	Linux (kernel >2.0)	3		mindepo2.bg.tu-berlin.de/kbsumm *
<i>EE2Surpac</i>	Win 95/98/NT/2k/XP	1		mindepo2.bg.tu-berlin.de/kbsumm *

* Das Zugriffspasswort kann unter koch@bg.tu-berlin.de erfragt werden.

4.5 Quellen für das Wissen und die Inhaltliche Umsetzung

Um Informationen über die untertägige Gewinnung von Marmor zu erhalten, wurden vielfältige Quellen genutzt.

4.5.1 Recherche und Interview bei Steinbruchbetreibern

Zum Beginn des Projekts wurde eine umfangreiche Literaturrecherche durchgeführt. Darauf aufbauend wurde eine Liste von Fragen zusammengestellt, welche die Aspekte beschreibt, die eine untertägige Gewinnung von Marmor beeinflussen. Der Fragebogen wurde grob in Themenbereiche gegliedert (Auszug aus dem Fragebogen siehe Tabelle A2). Zuerst wurde Fragen zur Geologie der Lagerstätte, zu den Eigenschaften des Marmors und den Techniken der Gewinnung gestellt. Die wirtschaftlichen Eckdaten der Betriebe schlossen die Befragung ab.

Um eine Übersicht über alle Kriterien zu erhalten, wurde das Mindmapping Tool *Decision Explorer* eingesetzt, mit dessen Hilfe die Zusammenhänge zwischen den unterschiedlichen Einflussgrößen und der untertägigen Marmorgewinnung analysiert wurden. Die Beurteilung der Einflussgrößen bezog sich dabei immer auch auf sicherheitstechnisch relevante Aspekte und die daraus abzuleitenden produktionstechnischen Möglichkeiten, welche wiederum Einfluss auf das Blockausbringen (Blockgröße und -qualität) haben. Mit diesem Fragebogen wurden die drei im Projekt beteiligten Steinbruchbetreiber, bzw. die Verantwortlichen innerhalb der Betriebe befragt. Die Ergebnisse waren teilweise überraschend. So konnten Fragen nach der Geologie und dem Aufbau der Lagerstätte nicht immer erschöpfend und den Erfordernissen entsprechend beantwortet werden. Einige Fakten, die erfragt werden sollten, waren dagegen so detailliert, dass die Informationen ungeeignet für eine Verwertung erschienen. Es zeigte sich aber auch schnell, dass die

Relevanz einiger Fakten vom Autor des Fragebogens überschätzt wurden. Zum Beispiel ist die Verwendung von Ankerungsmöglichkeiten und dabei eingesetzten Zemente längst nicht so vielfältig wie vermutet.

Bei der Erhebung der Informationen stellte sich schnell heraus, dass eine thematische Gliederung in Module logisch und nützlich ist.

4.5.2 Diskussion und Übernahme geotechnischer Befunde

Im Rahmen des CAD-PUMA Projektes wurden von zwei Arbeitsgruppen auch geotechnische Daten erhoben. Die Gruppe CNR installierte mehrere Stressmeter im Marmor und im Schiefer der drei Experimentalgruben. Die Sensoren in der Feste und dem Deckgebirge installiert lieferten kontinuierlich Messwerte über sich ändernde Druckverhältnisse. Die ermittelten Daten über die Druckverteilung im Nebengestein während des Abbauprozesses wurden protokolliert und dokumentiert. Die Gruppe POLITO verwendete diese Daten für die 3D-Modellierung bzw. -Simulation der statischen Verhältnisse des untertägigen Grubengebäudes.

Von allen Marmoren und Schiefen wurden von CNR Proben im Labor geotechnisch gesteinsphysikalisch untersucht. Insgesamt wurden 900 Proben analysiert.

Tabelle 6 Anzahl der untersuchten Gesteinsproben aus den drei Steinbrüchen.

	Marmor	Schiefer
CCLL	210	-
DMCO	210	40
LASA	370	70

Die Mittelwerte der ermittelten Daten (vgl. Tab. 8) wurden als Referenzdaten in das Wissensbasierte System übernommen. Wenn während der Entwicklung des Wissensbasierten Systems der Bedarf an Standardwerten bezüglich der gesteinsphysikalischen Eigenschaften von Marmor innerhalb der Regelba-

sis benötigt wurde, ist auf diese Daten zurückgegriffen worden.

Die auf Basis der ermittelten Gesteinsparameter und Stressmeterdaten entwickelten Hohlraumszenarien der Gruppe POLITO in 3DEC wurden als Anhaltspunkte und Erfahrungswerte in die Regelbasis übernommen.

Für die numerische Berechnung der statischen Verhältnisse der verschiedenen Grubengebäude war es wichtig, die vorhandenen Trennflächengefüge genau zu bestimmen. Man einigte sich innerhalb des Projektes deshalb auf einen Standard zur Aufnahme von Klüften (siehe dazu auch Tabelle A1 im Anhang). Die Aufnahme der Trennflächen vor Ort musste von den jeweiligen Betreibern selbst durchgeführt werden, weil eine ständige Präsenz der wissenschaftlichen Beteiligten während der Auffahrung der Hohlräume nicht möglich war. Die Trennflächen an der Ortsbrust des aufgefahrenen Hohlraumes wurden mit Fotos dokumentiert und tabellarisch nach einem Schlüssel beschrieben.

4.5.3 Diskussion und Übernahme von Ergebnissen aus den experimentellen Gruben der Steinbruchbetreiber

Die Gewinnungsstrategien der Steinbruchbetreiber im Projekt sind seit vielen Jahren wirtschaftlich erfolgreich. Die eingesetzten Techniken sind den speziellen Anforderungen angepasst.

Durch das Projekt lernten die Steinbruchbetreiber Details der Gewinnungstechnik kennen, die ihnen bisher nicht immer bekannt waren. So wurden Erfahrungen über Diamant-besetzte Schrämmaschinen ausgetauscht und in den eigenen Betrieb übernommen.

Die Übernahme von Informationen und Erfahrungen der Steinbruchbetreiber bildeten insbesondere für die Gewinnungstechnik einen zentralen Punkt.

Die im Rahmen des Projektes CAD-PUMA aufgefahrenen Testfesten und die schrittweise Erweiterung des Hohlraumes um die Festen

herum sind auf der Basis von praktischen Erfahrungen der Betreiber und unter wissenschaftlichen Gesichtspunkten entwickelt worden. Wirtschaftlich war die Auffahrung unter diesen Bedingungen nicht in jedem Fall.

4.5.4 Umsetzung der Ergebnisse in Regeln

Das Ziel ist es, für das Entscheidungshilfesystem aus den gewonnenen Informationen Regeln abzuleiten, die einen optimalen Ablauf der Gewinnung von Marmor untertage beschreiben. Die angewendeten Regeln sollen unter den Gesichtspunkten der optimalen Sicherheit und der maximal möglichen Gewinnung an Rohblöcken hoher Qualität die eingegebenen Daten einer Lagerstätte bewerten und Planungshinweise, Verbesserungsvorschläge, bzw. wichtige Erläuterungen zu den Informationen geben.

Die Regeln und deren Abarbeiten im Entscheidungshilfesystem sind maßgeblich von den zu bewertenden Eingaben in das System abhängig. Wenn keine Informationen über einen gewinnungsrelevanten Aspekt zur Verfügung stehen, kann eine dafür entwickelte Regel nicht abgearbeitet werden. Sind beispielsweise keine Informationen über die Mächtigkeit des Deckgebirges und des überdeckenden Marmors in Bezug auf einen möglichen Hohlraum angegeben, kann das System die Regeln, welche einen maximalen Hohlraum empfehlen, nicht abarbeiten.

Um einen Teil der Fehleingaben abzufangen, wurde im *MS Access Data Frontend* die Möglichkeit eingearbeitet, nur Daten in einem bestimmten Wertebereich einzugeben. So sind Mächtigkeiten zum Beispiel nicht als negative Werte zugelassen.

Voraussetzung für die untertägige Gewinnung ist zuerst eine ausreichende Menge an qualitativ gutem Marmor. Um diese abzuschätzen, werden die einzelnen Informationen über die geologische Situation und die daraus abzuleitende Bruttomasse an Marmor berücksichtigt. Eine Abschätzung der Vorratsmenge geschieht über einfache mathematische Ext-

rapolation, basierend auf den eingegebenen Daten. Schichtmächtigkeiten und Schichtausdehnung werden hierzu verrechnet. Die Informationen über die geomorphologische Situation des untersuchten Gebietes geben Auskunft über eine mögliche Erschließung der Lagerstätte. Regionalgeologische Informationen geben Hinweise auf die Struktur der Lagerstätte und die daraus abzuleitenden Eigenheiten bezüglich der lateralen Ausdehnung.

Die Eigenschaften des Marmorlagers selbst geben viele Hinweise für eine orientierte Abbauplanung. Anordnung, Größe und Form des untertägigen bergmännischen Hohlraums sollte den geologischen Eigenschaften und der Anordnung der Trennflächen Rechnung tragen. Regeln, die eine an ein vorhandenes Trennflächensystem angepasste und optimierte Orientierung des Hohlraumes vorschlagen, sind im System umgesetzt. Empfehlungen für bestimmte geologische Konstellationen der

Marmorlager sind im System integriert. Auswirkung und Verfahren bei Verkarstung des Marmorlagers werden mit Regeln bewertet und kommentiert.

Tabelle 7 zeigt einen Auszug aus dem Quellcode des Modul GEO für die Inferenzmaschine der Expertensystemshell mit einer Teilregel zur Bestimmung des Q-Faktors. Der Q-Faktor als ein Index für die Qualität einer Gesteinsmasse bezüglich ihrer Standfestigkeit (siehe Kap. 5) spielt für die Spannweitenberechnung eine wichtige Rolle. Voraussetzung für eine Bestimmung des Q-Faktors ist die erfolgreiche Bestimmung aller Parameter, die in den Index eingehen. Die Regel QFaktor_1 ist Teil der Hypothese QFaktor.

Einige Bedingungen müssen größer als 0 sein, damit die Regel abgearbeitet wird, andernfalls kann der Wert für den Q-Faktor nicht bestimmt werden.

Tabelle 7: Auszug aus dem Quellcode der Regelbasis GEO für die Inferenzmaschine.

```
(@RULE= QFaktor_1
  @COMMENTS="To evaluate the QFactor for estimating the maximum roof span of an underground layout.";
  @LHS=
    (> (MMP_RQD) (0))
    (> (MMPJointFamilyNumbers) (0))
    (> (MMPJointdescription_Jr) (0))
    (> (Sigma1_from_overburden) (0)))
  (@HYPO= QFactor)
  (@RHS=
    (Execute ("WriteTo"))
    (@WAIT=TRUE;@STRING="@TRANSCRIPT,@FILE=results.txt,@TEXT=--> Because we want to calculate the
condition for underground marble mining, we set the value for the ESR (Excavaton Support Ratio) to 1.6, that describes a permanent
opening.,@ADD";))
    (Assign (SUM(MMP_ESR_Excavation_Support_Ratio,1.6)) (MMP_ESR_Excavation_Support_Ratio))
    (Assign
      (PROD(MMP_RQD,MMPJointdescription_Jr,GroundwaterInflow.rate)/PROD(MMPJointFamilyNumbers,MMPJointdesc
ription_Ja,MMP_ESR_Excavation_Support_Ratio)) (QFactor_result))
    (Execute ("WriteTo"))
    (@WAIT=TRUE;@ATOMID=QFactor_result.Value;@STRING="@TRANSCRIPT,@FILE=results.txt,@TEXT=--> The
result of the calculated Q-Factor from your input is displayed below:,@ADD";)))
  (@EHS=
    (Execute ("WriteTo")) (@WAIT=TRUE;@STRING="@TRANSCRIPT,@TEXT=--> We can not
determine the Q-Factor, because because further data are needed.,@ADD";)))
```


4.5.5 Ableitung von Bewertungskriterien für das Expertensystem

Die in das System eingegebenen Informationen werden im Expertensystem mit zwei Strategien bewertet. Jedes Objekt wird regelbezogen analysiert und das Ergebnis kommentiert. Die im *MS Access* abgefragten Daten werden einzeln in einem Ausgabeprotokoll der Inferenzmaschine kommentiert. Hinweise auf Probleme werden mit kurzen Sätzen ausgeführt. Zum Zweiten werden mithilfe eines Ratings die eingegebenen Fakten bewertet und für die eingegebenen Informationen Punkte vergeben. Da Informationen, die nicht in das System eingegeben werden, nicht bewertet werden können, gibt es hierfür keine Punkte. Die Ergebnisse werden nach der Abarbeitung in der Inferenzmaschine des Expertensystems in das Ergebnisprotokoll geschrieben. Eine hohe Punktezahle bezeichnet eine gute Qualität bzw. günstige Bedingung für die untertägige Gewinnung von Marmor. Nicht anzutreffende negative Phänomene, wie zum Beispiel Verkarstung, die sehr nachhaltige Einflüsse auf die Qualität und Sicherheit des Vorkommens haben, werden dementsprechend mit einer hohen Punktezahle bewertet. Die Art und Weise der Bewertung, wie sie in der Rules Engine (Entscheidungshilfemaschine) realisiert ist, kann im Einzelnen im ESDF-Editor (Expertensystem Data Frontend Editor) unter „Appraisal“ abgefragt werden. In Abbildung 47 wird ein Beispiel für die Bewertung der wichtigsten Verkarstungserscheinungen vorgestellt. Prinzipiell ist Verkarstung eine negative Eigenschaft eines Marmorvorkommens. Höhlen und Speleotheme im Marmor sind das Resultat einer tiefgreifenden Verkarstung. Werden Höhlen oder Speleotheme beobachtet, vergibt das Expertensystem keine Punkte. Ebenso sind Bauxit-Füllungen von Hohlräumen, Dolinen oder Breccien Indikatoren einer Verkarstung. Füllung der Klüfte mit Tonen und farbliche Veränderung der Trennflächen weisen auf einen Eintrag von Material von der Oberflä-

che hin. Offene Wegsamkeiten fördern den Transport von Oberflächenmaterial in den Untergrund. Depressionen der Geländeoberfläche können auf eine tiefgründige Verkarstung hinweisen.

Wenn keine der für Verkarstung typischen charakteristischen Eigenschaften oder Indikatoren beobachtet werden können, dann kann davon ausgegangen werden, dass bezüglich der Bewertung dieses Einflusses ein Optimum erreicht ist. Das Expertensystem würde die maximal eingestellten Punkte dafür vergeben.

No		Yes	
•Clay fillings	5	•Clay fillings	0
•Iron staining (coloured zones on discontinuities)	5	•Iron staining (coloured zones on discontinuities)	0
•Depressions on the surface	5	•Depressions on the surface	0
•Caves	10	•Caves	10
•Speleothems	10	•Speleothems	10
•Breccias	5	•Breccias	5
•Karst Bauxite	8	•Karst Bauxite	8
•Dolines or Sinkholes	8	•Dolines or Sinkholes	8
Very good: 56		Acceptable: 41	

Abb. 47 Punkte-Bewertungssystem des Wissensbasierten Systems für Verkarstungsphänomene als eine wichtige geowissenschaftliche Einflussgröße bei der untertägigen Gewinnung von Marmor.

Es herrschen in dem hier als Beispiel aufgeführten bewerteten Vorkommen somit sehr gute Bedingungen hinsichtlich der Verkarstung, was wiederum optimal für einen untertägigen Abbau von Marmor ist. Sind jedoch Beobachtungen gemacht worden, die darauf hinweisen, dass Verkarstung stattgefunden hat und noch stattfindet, dann gibt es für die beobachteten Kriterien keine Punkte, die Summe der Punktzahl reduziert sich. Ab einem definierten Punktestand kann eine untertägige Aktivität nicht mehr empfohlen werden.

Dieses System der Bewertung bietet relativ einfache Möglichkeiten der Kalibrierung. Es kann auf diese Weise geeicht werden, sollten weitere Erfahrungen gemacht werden, die eine abweichende Bewertung erforderlich machen.

5 Die modulare Struktur des WBS

5.1 Vorbereitende Analyse des Systems „Untertägige Marmorgewinnung“

Zur systematischen Erfassung aller Aspekte, die Einfluss auf die untertägige Gewinnung von Marmor nehmen können, wurde mit dem *Decision Explorer* eine Software zum sogenannten Mind Mapping oder Cognitive Mapping eingesetzt. Mit dieser Technik ließen sich die Einflussgrößen auch auf sinnvolle Weise in Gruppen zusammenfassen, die dann als „Modelle“ in die WBS-Struktur übernommen werden konnten.

Die einzelnen Teilkomponenten des Systems „untertägige Gewinnung von Marmor“ lassen sich in eine Vielzahl von Teilaspekten zerlegen. Die vereinfachte Darstellung des Systems in Abbildung 48 gibt einen Überblick.

Geomorphologische Gegebenheiten, die Lagerungsverhältnisse des Marmorvorkommens, die damit verbundene Mächtigkeit und Ausdehnung zum einen, die strukturgeologische Charakterisierung, die konkrete tektonische Situation, die Verteilung von Trennflächen, und die daraus sich ergebenden natürlichen Primärblockgrößen zum anderen, fließen in ein Marmor-Lagerstättenmodell ein (Marble Deposit Model, MADEM).

Das geomechanische Verhalten des Marmors und des Begleitgesteins gibt maßgeblich die Eckdaten für die Dimensionierung eines untertägigen Hohlraumes vor. Einflussgrößen sind hier die Gesteinseigenschaften, wie Dichte, Festigkeit, Porenvolumen, aber auch die Trennflächendichte und die Teufenlage sind von besonderer Bedeutung.

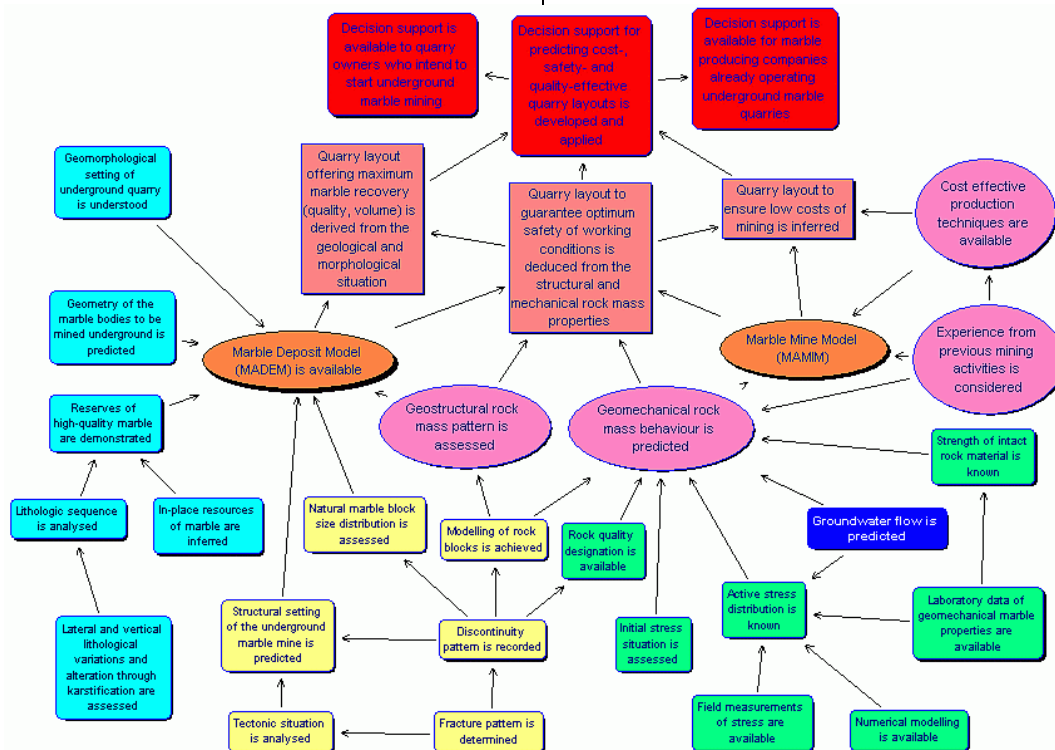


Abb. 48 Vereinfachtes System der Einflussgrößen auf die untertägige Gewinnung von Marmor.

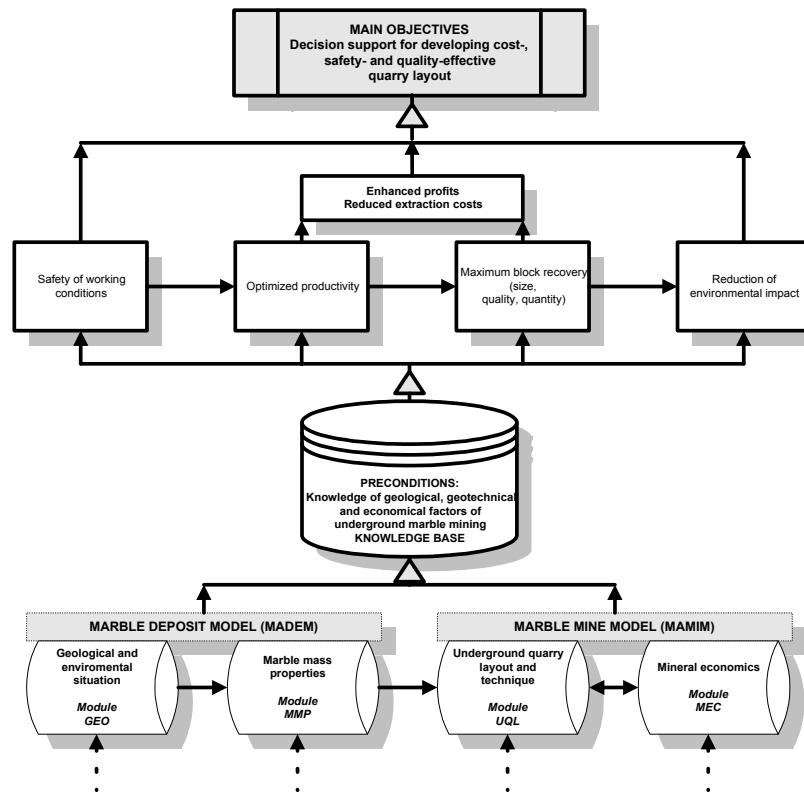


Abb. 49 Modulare Struktur des Wissensbasierten Systems zur Gewinnung von Marmor untertage.

Die Spannungsverteilung im Gestein, gesteinsphysikalische Eigenschaften, aber auch Grundwasser und Wasserwegsamkeiten auf den Trennflächen spielen eine Rolle. Diese Kriterien beschreiben die Einflussgrößen, welche im Modell für einen untertägigen bergmännischen Hohlraum im Marmor abgebildet wurden (Marble Mine Model, MAMIM).

Die beiden Modelle MADEM und MAMIM wurden in jeweils zwei thematische Module weiter unterteilt, so dass sich folgende modulare Struktur des WBS ergibt (Abb. 49):

- Geologische und Umwelt-Situation (GEO)
- Eigenschaften des Marmors bzw. d. Marmor Masse (MMP)
- Bergtechnik (UQL)
- Wirtschaftlichkeit (MEC)

Ziel ist es, möglichst einzelne Komponenten der Module unter Ausnutzung der geologi-

schen Gegebenheiten zu optimieren, sowie eine Lösung für die Planung der untertägigen Gewinnung aufzuzeigen, die ein hohes Ausbringen, maximaler Rohblockgrößen und Qualität, bei gleichzeitiger Sicherheit für die Arbeitsbedingungen ermöglicht. Gleichzeitig sollen die Kosten möglichst niedrig gehalten werden, und das System muss effizient arbeiten.

Die vier entwickelten Module finden sich in der Struktur des Wissensbasierten Systems wieder. Im *MS Access* Data Front End kann der Benutzer des Systems Fragen nur zu den von ihm selektierten Modul beantworten (Abb. 50).

Im Expertensystem sind die vier Module als vier Regeldatenbanken entwickelt, die für die Entscheidungshilfe-Prozesse ebenfalls nacheinander geladen werden können. Im Allgemeinen empfiehlt es sich jedoch, alle Module gleichzeitig zu nutzen. Der Benutzer sollte

alle Fragen zu allen Modulen beantworten und alle Regeldatenbanken laden, um ein ausreichendes Ergebnis zu erhalten.

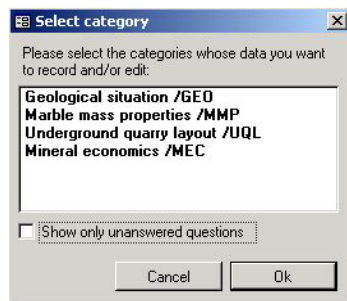


Abb. 50 Auswahldialog im *Microsoft Access* Data Front End zu den wählbaren Modulen.

In den folgenden Kapiteln werden die einzelnen Module diskutiert.

5.1.1 Geologie von Marmor Vorkommen – Modul GEO

Im Modul GEO sind alle geologisch relevanten Merkmale einer Marmorlagerstätte beschrieben. Eine scharfe Abgrenzung zum Modul MMP (Marble Mass Properties) ist hierbei nicht immer möglich. Prinzipiell wurde jedoch versucht, die speziellen Eigenschaften des Marmorlagers selbst in das Modul MMP zu integrieren.

Die Erklärungskomponente des WBS benutzt bezüglich der geologischen Situation vereinfachte, modellhafte Situationen.

5.1.1.1 Generelle Lagerungsverhältnisse

Einige grundsätzliche Bemerkungen zur Geologie von Marmorlagerstätten sollen vorangestellt werden. Marmor entsteht durch Prozesse der Diagenese und Metamorphose aus marinen Karbonatsedimenten. Dementsprechend sind einige grundlegende Konstellationen der Lagerungsverhältnisse zu erwarten. Der in der Regel (mit Ausnahme von Riffkörpern) schichtige Aufbau des Kalksteinkörpers, der während der Ablagerung angelegt wird, ist auch im Marmor wiederzufinden. Das Schichtpaket ist aber durch tektonische Einflüsse mit großer Wahrscheinlichkeit

deformiert worden. Nur selten sind die Schichten gänzlich undeformiert und liegen in ihrer ursprünglichen horizontalen flachen Lagerung vor. Die Variation der Lagerungsverhältnisse reicht also von flach und wenig deformierten, bis hin zu steil deformierten Lagerungsformen (Abb. 51). Die Übergänge sind fließend und auch innerhalb einer Marmorlagerstätte oft gut zu beobachten.

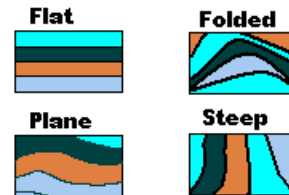


Abb. 51 Schema möglicher Lagerungsverhältnisse in Marmorlagerstätten.

Im WBS werden daher generell vier verschiedene Lagerungstypen für die Marmor-Lagerstättenkörper unterschieden. Flache Lagerung, die lateral gleichmäßige Schichtung der Marmorlager zeigt (Flat); leicht wellige Lagerung (Plane); verfaltete Lagerung (Folded) und steile Lagerung (Steep). Die für die untertägige Gewinnung günstigste Lagerungsform ist die flache Lagerung. Es ist zu erwarten, dass das Marmorlager in seiner lateralen Ausdehnung hinsichtlich der Qualität recht gleichmäßig ausgebildet ist, bzw. das rasche horizontale Qualitätswechsel eher unwahrscheinlich sind. Die Abbaukammern können der Schichtung/Bankung folgend aufgeföhren werden. Ein Hohlraum kann hier unter günstigen Bedingungen angelegt werden. Ist das Marmorlager dagegen leicht wellig deformiert, ist die Sohle des aufzuföhrenen Hohlraumes in verschiedenen Ebenen anzulegen, um die Lagerstätte zu erschließen. Eine Variation der Qualitätsverteilung ist sowohl lateral als auch vertikal zu erwarten. In einem stark verfalteten Marmorlager sind in schnellem Wechsel Qualitätsänderungen in jede Richtung möglich, dann muss eine langfristige Planung durch zusätzlichen Untersu-

chungsaufwand, wie zum Beispiel durch Bohrungen, abgesichert werden.

5.1.1.2 Überlagerung

Das dem Marmorlager auflagernde Gebirge (Abb. 52) beeinflusst in seiner Ausbildung und Mächtigkeit die Entscheidung, ob eine übertägige oder untertägige Gewinnung erfolgen soll, in starkem Maße. Bis zu welchen Mächtigkeiten die Entfernung des Deckgebirges als Abraum noch rentabel ist, kann nur im Einzelfall beurteilt werden. Festigkeit und Mächtigkeit des Deckmaterials sind dabei entscheidend. Ab einer Überdeckung des Marmorlagers durch mindestens 10 Meter mächtiges Festgestein ist eine untertägige Gewinnung in der Regel möglich. Dabei muss das Deckgebirge jedoch auch ausreichend stabil sein, um den Sicherheitsanforderungen zu entsprechen.

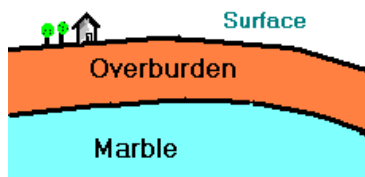


Abb. 52 Deckgebirge auf einem Marmorlager.

Auch das Einfallen der Schichten des Deckgebirges geht in das Lagerstättenmodell ein, da es von dem des Marmorlagers abweichen kann. Auch eine diskordante Überlagerung ist hier möglich.

Wenn eine Überdeckung des bauwürdigen Marmorlagers vorhanden ist, muss sie durchteuft werden. Um einen optimalen Ansatz zu finden, ist eine kurze Wegstrecke durch überdeckendes Gestein vorzuziehen. Ein flacher Einfallwinkel des Schichtkontaktes zwischen überdeckender Schichten und des Marmorlagers ist in jedem Falle ungünstiger.

5.1.1.3 Übergangszonen

In der lithologischen Abfolge von Marmorlagerstätten treten häufig Schiefereneinschaltungen auf. Im Übergangsbereich zum Marmor sind in Linsen und Schlieren Mischungen aus

den beiden Lithologien zu erwarten (Abb. 53). Der Kontakt zwischen den beiden lithologischen Einheiten muss nicht fließend sein, sondern ist oft auch relativ scharf entwickelt. In diesem Bereich stellen die Schichtgrenzen Schwächezonen dar, die keine gute Voraussetzung für einen untertägigen Hohlraum in diesem Bereich darstellen.

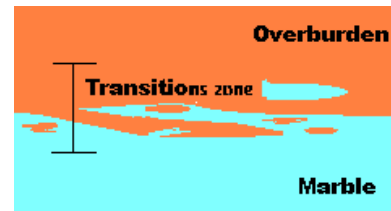


Abb. 53 Übergangszone zwischen Marmor und Deckgebirge, in der Regel Schiefer.

Die Firste eines untertägigen Hohlraumes sollte in einem ausreichenden Abstand zu der lithologischen Übergangszone angelegt werden, damit eine ausreichende Standfestigkeit erreicht werden kann. Tritt keine Übergangszone zwischen Marmor und Deckgebirge auf, dann sollte ein Abstand von mindestens 25 Metern zur Schichtgrenze eingehalten werden. Sind die Übergänge vom Deckgebirge zu Marmor mit Linsen und Schlieren eher fließend, so kann der Sicherheitsabstand zur Schichtgrenze verringert werden (empfohlen sind 5 Meter). Diese Sicherheitsabstände bedingen also unter Umständen eine erhebliche Reduzierung des gewinnbaren (ausbringbaren) Marmorvolumens.

Um den Übergangsbereich im WBS beurteilen zu können, müssen im System die Ausbildung der Kontaktflächen zwischen den lithologischen Einheiten charakterisiert werden (Abb. 54.)

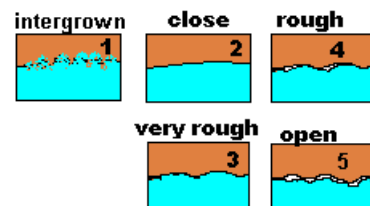


Abb. 54 Kontakte der Trennflächen.

Die Kontaktflächen können unterschiedlichste Ausprägungen aufweisen. Eine dichte kompakte Verwachsung und Vermischung (intergrown) von Marmor und Schiefer ist die optimale Situation. Beobachtet werden geschlossene (close), leicht geöffnete (rough), raue (very rough), sowie geöffnete (open) Kontaktflächen. Letztere sind die ungünstigsten Schichtgrenzen, weil das Gebirge im Übergangsbereich zwischen Überdeckung und Marmor damit eine potenzielle mechanische Schwächezone darstellt. Ist im Bereich des möglichen Tagebaus oder eines anderen natürlichen Aufschlusses die Kontaktzone aufgeschlossen, kann diese Übergangszone beobachtet und bewertet werden. Oft ist ein solcher Kontakttypus über weitere Strecken mit ähnlicher Ausprägung zu finden.

5.1.1.4 Flächenbeurteilung

Das gesamte zu bewertenden Verbreitungsgebiet des Marmors ist vor der Beurteilung einer sorgfältigen lithologischen Analyse zu unterziehen. Sind in einigen Bereichen die Voraussetzungen für eine positive Beurteilung nicht gegeben, so können in anderen Bereichen des geplanten Abbaus dennoch gute Bedingungen dies kompensieren.

5.1.1.5 Hangneigung im Deckgebirge und Marmor

Die Neigung des Hanges, von dem aus ein Vortrieb zu einem Marmorlager durchgeführt werden soll, stellt besondere Anforderung an die Sicherheit. Je nach der möglichen Neigung des Hanges und der Orientierung von Trennflächen kann es zu Hangrutschungen kommen. Eine statistische Trennflächenanalyse des im Hangbereiches anzutreffenden Kluftsystems ist deshalb von besonderer Bedeutung. Abhängig vom Gestein kann es zu unterschiedlichen Typen von Hangrutschungen kommen. In einem homogen weichen oder auch einem sehr stark mit Trennflächen durchsetzten Gesteinstyp kann es aufgrund der flächenhaft regelmäßig verteilten Trenn-

flächen und/oder Schwächezonen zu einem halbkreisförmigen Ausbrechen des Hanges kommen (Abb. 55 A). Das Material ist höchst instabil und die Auffahrung eines Hohlraumes auch mit entsprechender Sicherungstechnik häufig unmöglich.

In Abbildung 55 sind die Fälle B und C die am häufigsten anzutreffenden Situationen im geologischen Umfeld einer Marmorlagerstätte. In der Regel wird es sich bei der Überdeckung eines Marmorlagers um ein Festgestein handeln, das von Trennflächen durchzogen verschiedene Konstellationen an Hangrutschungen hervorbringen kann.

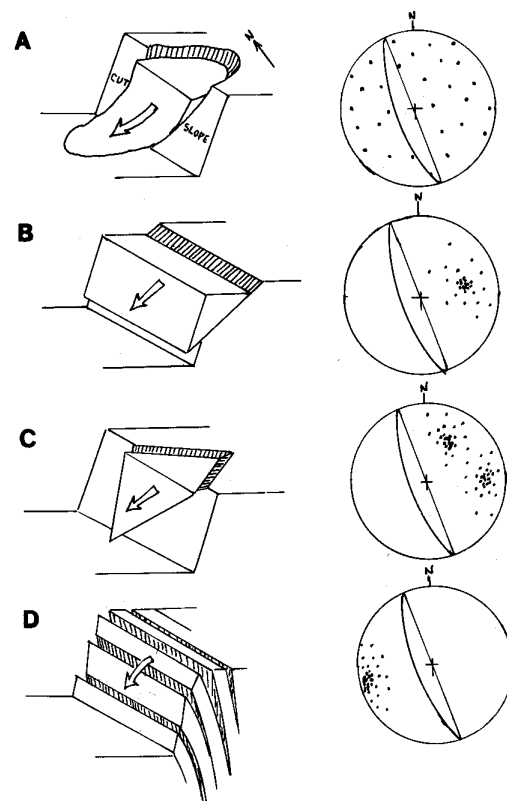


Abb. 55 Haupttypen von Hangrutschungen und die dazugehörigen Stereoplots der strukturbildenden Komponenten mit dem Habitus der daraus entstehenden Rutschung (RAHN, 1986).

Eine Trennflächenanalyse zeigt in diesen Fällen, dass die Polflächen bei der Stereoplotdarstellung deutliche Maxima ausbilden. Eine Scherflächenschar stellt sich als Punkthäufung dar, zwei Punkthäufungen weisen

auf rutschungsgefährdete Keile hin. Mit Sicherungsmaßnahmen sind diese Konstellationen in der Regel jedoch mit vertretbaren Mitteln zu bewältigen. Eine detaillierte Trennflächenanalyse verbunden mit einer Risikoabschätzung und Vorschlägen für Sicherheitsmaßnahmen muss in jedem Fall erfolgen (PARKA & WEST, 2001, WANG & YIN, 2002).

Art und Lagerungsverhältnissen der Überdeckung kommen bei der Erschließung einer Lagerstätte also eine erhebliche Bedeutung zu. Zumal oft mehrere Zugänge zu den untertägigen Hohlräumen aus sicherheitstechnischer Sicht nötig sind. Die günstigste Konstellation für die Auffahrung eines untertägigen Hohlraumes ist sicher eine Situation ohne jede Überdeckung. In diesem Falle kann aber auch der Tagebau in Konkurrenz zu der untertägigen Gewinnung treten. Ausschlaggebend sind in solchen Situationen andere Rahmenbedingungen, wie zum Beispiel unerwünschte Umweltbeeinflussung durch Tagebauaktivitäten.

5.1.1.6 Verkarstung

Bei diesem Vorgang lösen sich verwitterungsbedingt Teile des karbonatischen Gesteins und es entstehen Hohlräume, Senken an der Oberfläche und Farbveränderung der Karbonate (Abb. 56). Solche Verkarstungsphänomene sind meist rezent bis subrezenten Alters, es können aber auch fossile Verkarstungsphänomene gegeben sein, die in den karbonatischen Ausgangsgesteinen des Marmors angelegt worden sind.

Durch Verkarstung erweiterte Trennflächen, auf denen die Wegsamkeit für Wasser erhöht ist, können mit tonigem, eisenreichem Verwitterungsmaterial gefüllt sein. Die Reibung auf diesen Trennflächen wird dadurch herabgesetzt. Trennflächen können durch Verkarstung zu klaffenden Hohlräumen erweitert worden sein, was die Stabilität des gesamten Gesteinskörpers nachhaltig verringert. Werden in dem zu untersuchenden Marmorvor-

kommen typische Verkarstungserscheinungen beobachtet, wird dies abhängig von der Ausbildung und der Intensität der Phänomene vom WBS negativ bewertet.

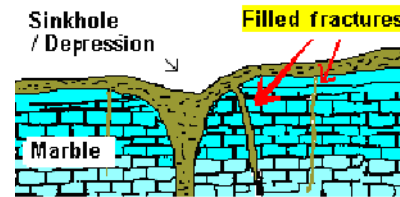


Abb. 56 Verkarstungserscheinungen.

Verschiedene Indikatoren weisen an der Oberfläche auf eine tiefgründige Verkarstung hin. So ist die Existenz von Höhlenzugängen einer der schwerwiegendsten Hinweise auf einen durch Verkarstung beeinträchtigten Marmorkörper im Untergrund.

Eine genaue Kenntnis über Lage und Ausdehnung der durch Verkarstung entstandenen Hohlformen ist bei der Auffahrung von untertägigen Hohlräumen unbedingt notwendig (Abb. 57). Unbekannte Höhlensysteme stellen ein unkalkulierbares Risiko für den Abbau dar. Eine genaue Lokalisierung von Karsthöhlen ist aber nicht immer möglich, da sie nicht immer die Oberfläche erreichen. In einigen Fällen sind geophysikalische Messungen notwendig, um den Hohlraum zu erfassen.



Abb. 57 Karsthöhle.

Durch Verkarstung erweiterte tektonische Trennflächen, die oft durch Übergänge mit offenen Hohlräumen verbunden sind, können mit Nebengesteinsbruchstücken gefüllt sein, die aus der unmittelbaren Umgebung, aber auch aus dem umlagernden Gesteinseinheiten stammen können. Im letzten Falle ist damit zu rechnen, dass es sich um Verkarstungspro-

zesse mit erheblicher Trennflächenerstreckung handelt.

Oft finden sich in ehemaligen Hohlräumen auch fossile Bauxite, die Diaspor und Korund führen. Hierfür sind ein verkarsteter Kalkstein und ein Karstbauxit metamorph überprägt worden. Lokal haben sich auf diese Weise korundführende Meta-Karstbauxite gebildet, die als „Smirgel“ für abrasive Zwecke abgebaut werden können. Werden Karstbauxite beobachtet, ist dies immer ein Qualitätsminderndes Merkmal in Hinblick auf die Marmorlagerstätte.

Speleotheme, wie etwa Stalagmiten und Stalaktiten (Abb. 58) entstehen in Höhlen innerhalb von Karbonatgesteinen.



Abb. 58 Speleotheme.

Sie belegen eine tiefgründige Verkarstung. Ihr Auftreten zeugt von einem lang anhaltenden Lösungsprozess im karbonatischen Ausgangsgestein.

Gute Karstindikatoren an der Oberfläche sind Karren (Abb 59). Dabei handelt es sich um kleinere Korrosionsformen, die an der Oberfläche von karbonatischen Gestein entwickelt sind.

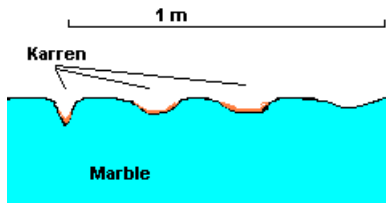


Abb. 59 Karren.

Da eine tiefgründige Verkarstung nicht immer durch Höhlenzugänge und oberflächliche Marmorverkarstungsformen zu erkennen ist, müssen diverse oberflächennahe Strukturen als Hinweise auf eine Verkarstung ausgewertet werden. Eine Lösung im Untergrund kann

sich an der Oberfläche durch verschiedene Senkungsformen äußern. Solche Depressionen sind allerdings ohne Kenntnisse über die konkreten Lagerungsverhältnisse der Gesteine im Untergrund nur eingeschränkt als Verkarstungsindikatoren zu werten (Abb. 60).

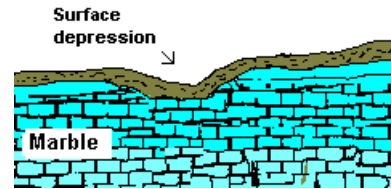


Abb. 60 Oberflächen-Depression durch Verkarstung im Untergrund.

Aussagekräftiger sind in dieser Hinsicht Dolinen (Sinkholes, Abb. 61), die durch den Einsturz oberflächennaher Höhlensysteme entstehen. Sie sind eindeutige Hinweise für Verkarstung im Untergrund. Untertägige Aktivitäten sind in solchen Bereichen durch unvermittelt auftretende Hohlräume gefährdet. Techniken zur Sondierung von Hohlräumen, wie Georadar oder Refraktionsseismik sollten dann unbedingt eingesetzt werden, um solche Hohlräume ansatzweise zu erfassen.

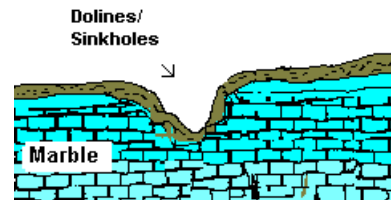


Abb. 61 Dolinen.

Weitere Beobachtungen, die auf eine Verkarstung hinweisen, sind farbliche Veränderungen des Marmors, meist eine rötliche Verfärbung, die auf Eisenoxidation zurückzuführen ist (iron staining). Zwei verschiedene Mechanismen sind hier denkbar: Durch sauerstoffreiches Oberflächenwasser kann das im Kalzitgitter enthaltene Fe^{2+} zu Goethit oxidiert werden oder durch Lösungsmischung können aus reduzierenden Lösungen Fe^{3+} -Verbindungen ausgefällt werden. In beiden Fällen wird die Marmorqualität durch die von

den Trennflächen her eindringende Verfärbung negativ beeinflusst.

Eine Steigerungsform dieser eben genannten Eisenverfärbungen ist die Bildung von Eisenkrusten (iron oxide crust). Hierbei bilden sich feste, krustige Aggregate von Fe-Oxiden in den offenen Klüften. Sie beeinflussen neben der farblichen Veränderung auch die Oberflächenbeschaffenheit der Trennfläche, setzen die Reibung herab und gefährden so die Stabilität eines bergmännischen Hohlraumes, wenn er unter diesen Bedingungen aufgefahren wird.

Sind diese Krusten zusätzlich mit großen Anteilen an Ton versehen (red clay intercalations), wird der Reibungswiderstand weiter herabgesetzt und auch die Qualität des umgebenden Marmors weiter reduziert.

Sind die Aufschlussverhältnisse im Marmorvorkommen so gut, dass die Trennflächen an der Oberfläche beobachtet und bewertet werden können, dann kann der Habitus der Klüfte Aufschluss auf mögliche Verkarstung geben.

5.1.1.7 Topographie und Geomorphologie

Die morphologische und topographische Situation eines Marmorvorkommens ist entscheidend für die Erschließung der Lagerstätte. Das Auffahren einer Lagerstätte im Hochgebirge ist technisch weitaus anspruchsvoller und kostspieliger als im Flachland. Eine Bewertung durch das WBS stuft daher die Höhenlage in unterschiedliche Teilbereiche ein. Marmorvorkommen im Hochgebirge sind schlechter bewertet als im Flachland liegende.

5.1.1.8 Geometrie und Position des Marmorlagers

Die Lagerungsverhältnisse des Marmorlagers sind entscheidend für die Erschließung eines untertägigen Hohlraumes zur Gewinnung von Marmor. Liegt das Deckgebirge in flacher Lagerung über ebenso gelagertem Marmorgebirge, so sind dies ideale Voraussetzungen

für das Auffahren eines Hohlraumes. Bei einer geneigten Lagerung ist die Ausnutzung der maximalen Schichtmächtigkeit eines anstehenden Marmorlagers nicht vollständig möglich. Dabei sind Abweichungen von wenigen Gradern noch tragbar. Grund für diese Beurteilung ist die eingesetzte Abbautechnik. Die setzt grundsätzlich ebene Flächen voraus, da die eingesetzten Maschinen, z. B. Schrämmaschinen oder Radlader optimal auf horizontalen Flächen arbeiten (Abb. 62). Um ein mit 45° Grad einfallendes Lager abzubauen, muss, wenn vorhanden, ein Deckgebirge teilweise durchteuft werden.

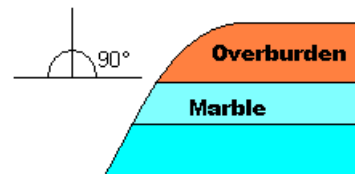


Abb. 62 Lagerungsverhältnisse des Marmors und des Deckgebirges.

Der Neigungswinkel des Hanges, an dem eine Auffahrung im anstehenden Marmorlager durchgeführt werden soll, ist ebenso ein entscheidendes Kriterium. Bei einer flacher Lagerung und flacher Morphologie muss mit aufwändigen Mitteln der Zugang mithilfe eines Schrägschachtes oder einer Rampe geschaffen werden. Eine Situation, in der auf einer der Begrenzungen des zu erschließenden Marmorlagers ein natürlicher oder durch einen Steinbruch geschaffener Hang vorhanden ist, ist ideal. Eine Durchörterung von überdeckendem Gebirge ist dann nicht notwendig (Abb. 63).

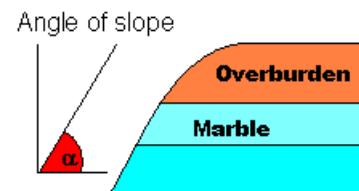


Abb. 63 Ideale Hangsituation für die untertägige Gewinnung eines Marmorlagers.

Basis für die Beurteilung der Eignung eines Vorkommens ist natürlich die vermutete Schichtmächtigkeit des abzubauenden Marmorvorkommens, die aus Bohrungen und Kartierungen ermittelt werden kann. Die Mächtigkeit bestimmt die möglichen Abbauhöhen von bergmännischen Hohlräumen im Marmor.

Die maximale, durchschnittliche und minimale Schichtmächtigkeit des Marmors wird für eine Beurteilung durch das WBS herangezogen (Abb.64).

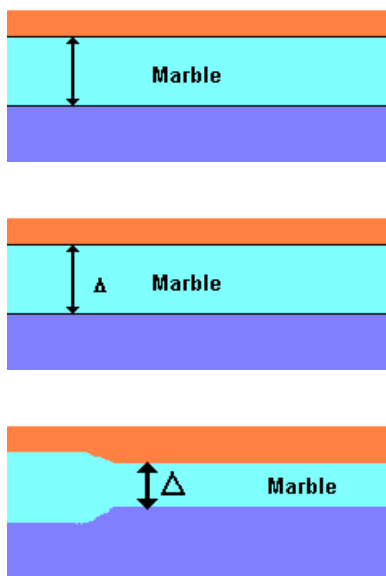


Abb. 64 Maximale, durchschnittliche und minimale Schichtmächtigkeit des Marmorlagers.

Ist die Variation der Schichtmächtigkeiten sehr groß, muss die Abbautätigkeit möglicherweise oft ins Nebengestein ausweichen. Starke Schwankungen der Marmor-mächtigkeit erschweren die Abschätzung des Sicherheitsabstandes zum Deckgebirge, wie auch die Bestimmung der gewinnbaren Marmor-menge.

Die Fläche, über die sich das Marmorlager erstreckt, dient zur Ermittlung der Vorräte des abbaufähigen Materials (Abb. 65). Eine Bestimmung der Fläche kann über Kartierungen und Bohrungen erfolgen.

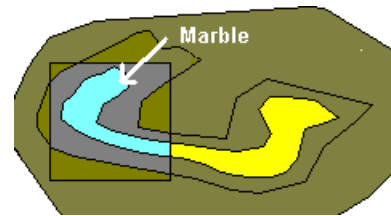


Abb. 65 Fläche des bauwürdigen Marmorlagers.

Viele Marmorlagerstätten sind lithologisch inhomogen aufgebaut. Eine Wechsellagerung von hellen und dunklen Marmorqualitäten kann meist als Relikt der Schichtung der ursprünglichen Karbonatsedimente interpretiert werden. Für die Marmorgewinnung günstiger sind homogen aufgebaute Lagerstätten, da sie längerfristig die Gewinnung eines qualitativ einheitlichen Materials ermöglichen (Abb. 66). Durch tektonische Verfaltung des Marmors kann die Inhomogenität verstärkt, bei sehr starker Deformation aber auch gemindert werden.

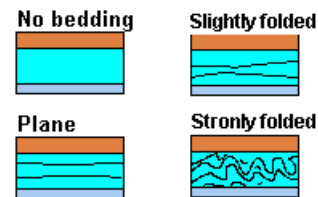


Abb. 66 Wechsellagerung innerhalb des Marmorvorkommens bei unterschiedlicher Deformation.

In allen Fällen, in denen keine homogene Textur vorhanden ist, muss bei der Schnittführung und der Weiterverarbeitung der Rohblöcke auf die Schnittlage geachtet werden. Um ungünstige Effekte zu verhindern, muss oft in einem bestimmten Winkel abhängig von der Wechsellagerung geschnitten werden, damit man im Endprodukt ästhetisch ansprechende rhythmische Muster erreicht.

Generell sind solche Bereiche eines Marmorvorkommens beim Abbau zu bevorzugen, bei denen die vertikale und laterale Differenzierung der Marmorqualität gering und damit die Prognose der Qualitätsentwicklung beim Abbau erleichtert wird (Abb. 67).

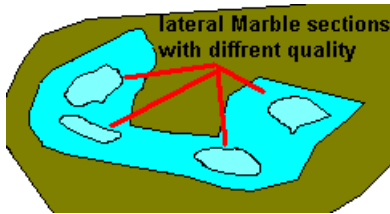


Abb. 67 Verteilung von verschiedenen Qualitäten im Marmor.

In welcher Höhenlage der Zugang zum untertägigen Hohlraum aufgefahren wird, ist ebenfalls entscheidend. Je weniger der Eingang der Grube über NN liegt, desto generell günstiger ist die Situation für einen Abtransport der gewonnenen Rohblöcke (Abb. 68).

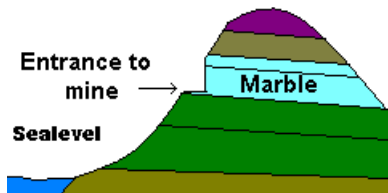


Abb. 68 Höhenlage des Mundloches.

5.1.1.9 Schieferung

Schieferung des Marmors kann in unterschiedlichen Intensitäten auftreten (Abb. 69). Unter Umständen ist sie mit bloßem Auge gar nicht zu erkennen. Hilfreich ist es dann, die Übergänge zu Schieferereinschlüssen oder -überlagerungen näher zu untersuchen, um die Raumlage der Schieferungsflächen zu ermitteln.

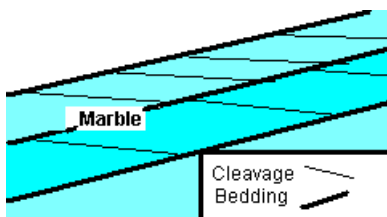


Abb. 69 Schieferung und Schichtung im Marmor.

Dies kann unter Umständen mithilfe von schieferungsparallel orientierten Glimmerplättchen erfolgen. Die Schieferung stellt einen abbautechnisch relevanten Faktor dar, weil sich die zu gewinnenden Rohblöcke parallel zur Schieferung wesentlich leichter

lösen lassen. Sowohl bei der Rohblockgewinnung aber auch der Weiterverarbeitung der Rohblöcke sind Kenntnisse über die Raumlage der Schieferung wichtig und sollten bei der Abbauplanung berücksichtigt werden. Grundsätzlich gilt: je ausgeprägter die Schieferung, desto wichtiger ist sie für die Abbauplanung. Die Schieferung kann schwach bis stark entwickelt sein. Das WBS unterscheidet vier Intensitätsstufen (Abb. 70).

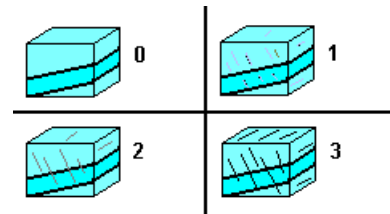


Abb. 70 Intensitäten der Schieferung im Marmor.

Besonders günstig zu bewerten ist eine Situation, bei der die Schieferung parallel oder in einem flachen Winkel zu der Schichtung/Bankung des Marmors verläuft (Abb. 71).

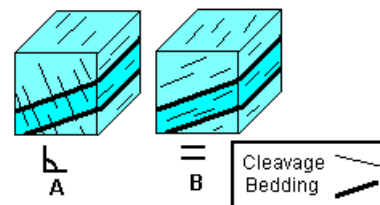


Abb. 71 Raumlage der Schieferung im Verhältnis zur Schichtung.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Schieferung für die Produktion von Rohblöcken ein ebenso wichtiger Faktor wie die Schichtung bzw. Bankung des Gesteins ist. Der technische Aufwand und die Kosten gegen eine Schieferungsrichtung abzubauen sind wesentlich höher, als wenn man sich die Schieferung zunutze macht und das zu gewinnende Material nach der Schieferung teilt.

5.1.1.10 Störungszonen

Im Bereich von Metamorphiten, die in aller Regel stark tektonisch beansprucht worden sind, treten mit hoher Wahrscheinlichkeit

auch Störungen (Faults) oder ganze Störungssysteme auf (Abb. 72). Im Umfeld von Störungen verdichten sich auch die begleitenden Trennflächen in allen anstehenden Gesteinen.

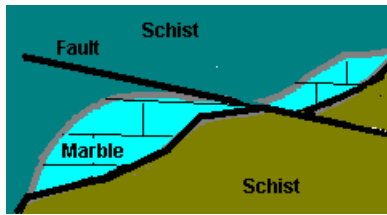


Abb. 72 Störung in einem Marmorvorkommen.

Verschiedene Störungssysteme haben unterschiedliche Auswirkung hinsichtlich der Verursachung von Trennflächen im Marmor. Mithilfe einer detaillierten geologischen Kartierung sind Störungssysteme im Gelände in der Regel gut zu erfassen. Ist ein Störungssystem in unmittelbarer Nähe eines Marmorvorkommens anzutreffen, dann bewertet das WBS dies als ungünstige Voraussetzung für die untertägige Gewinnung von Marmor.

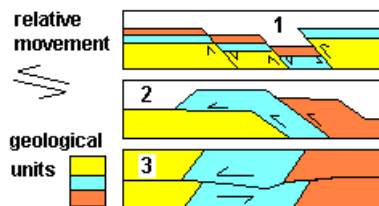


Abb. 73 Unterschiedliche bruchtektonische Situationen.

Die bruchtektonischen Situationen in denen ein Marmorvorkommen auftreten kann, wirken sich auch unterschiedlich auf die Anlage von Trennflächensystemen aus. Prinzipiell unterscheidet das WBS nur unter drei möglichen Szenarien. Einfache Staffelbrüche induzieren mäßig viele begleitende Trennflächensysteme. Auch die in Abbildung 73 unter Punkt drei angeführten Horizontalverschiebungen erzeugen in einem Marmorvorkommen mäßig viele Trennflächen. Am intensivsten ist die Beanspruchung eines Marmorvorkommens in einer Überschiebungssituation (Fall 2 in Abb. 73). Hier sind die geologischen Einheiten einer besonders starken Be-

anspruchung unterzogen worden, die ein dichtes Trennflächensystem induzieren. Marmorvorkommen in diesem tektonischen Szenario werden deshalb vom WBS schlecht bewertet.

5.1.1.11 Intrusionen

Marmore treten auch selten in Bereichen von Intrusionen magmatischer Gesteine auf (Abb. 74). Dort sind sie dann meist kontaktmetamorph gebildet oder überprägt. Solche Marmore zeigen häufig eine starke mineralogische und gefügemäßige Differenzierung in Abhängigkeit von der Nähe zum Intrusivkörper. Die Qualitätsmerkmale des Marmors schwanken daher sehr stark. Derartige Marmorvorkommen werden vom WBS deshalb als negativ bewertet.

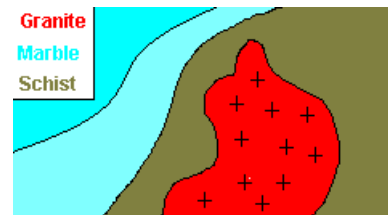


Abb. 74 Granitintrusion in Marmor und Schiefer.

5.1.1.12 Erdbeben

Die Gewinnung von Marmor stellt hohe Anforderungen an die Sicherheit. Untertägige Hohlräume in Erdbebengebieten sind besonders gefährdet. In solchen Gebieten müssen strengere Sicherheitsvorschriften, z. B. größere Festendimensionierungen, beachtet werden, die eine Auffahrung verteuern.

5.1.1.13 Hydrogeologische Verhältnisse

Bei der Vorbereitung und Planung der untertägigen Gewinnung von Marmor sind auch die hydrogeologischen Verhältnisse zu berücksichtigen. Einerseits muss sichergestellt sein, dass der Abbau oberhalb des Grundwasserspiegels durchgeführt werden kann und auch keine starken Wasserzuflüsse von der Oberfläche her – etwa durch Karstsysteme – zu erwarten sind. Zum anderen ist natürlich

die Verfügbarkeit von Wasser für den Einsatz der meisten Gewinnungs- und Verarbeitungsmaschinen notwendig. In das WBS geht der Abstand des abzubauenden Marmorkörpers von der Grundwasseroberfläche als Bewertungskriterium ein (Abb. 75).

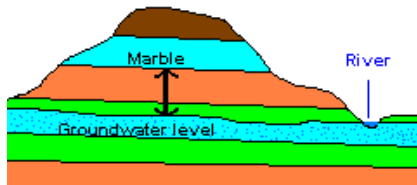


Abb. 75 Lage des Grundwasserspiegels.

5.1.1.14 Klima

Die klimatischen Bedingungen, insbesondere die Temperatur, spielen eine nicht unwichtige Rolle bei der Gewinnung von Marmor. Temperaturen unter null Grad sind für die auf Wasser basierenden Gewinnungsmethoden, wie die meisten verwendeten Säge- und Bohrtechniken, ungeeignet. In großen Höhenlagen können saisonale Tieftemperaturen und Schnee den Abbau und Transport behindern. Aber auch lang anhaltende hohe Temperaturen verursachen in trockenen Gebieten zusätzliche Kosten, da die Fahrwege regelmäßig bewässert werden müssen, damit die Sicherheit auf den Fahrwegen und an den Arbeitsplätzen erhalten bleibt und die Umweltbelastung durch entstehenden Staub vermieden wird. So sind hinsichtlich des Klimas semihumide Bereiche am besten für eine Naturwerksteingewinnung geeignet.

5.1.2 Eigenschaften des Marmors – Modul MMP

Das Modul MMP beschreibt und bewertet die Eigenschaften des Marmors, dessen untertägige Gewinnung in Betracht gezogen wird.

5.1.2.1 *Qualität der Informationen*

Das Modul MMP des WBS erfragt und bewertet eingangs Umfang und Qualität der verfügbaren Informationsquellen.

Sind geologische Karten vorhanden, oder können für die Beurteilung des Marmors Aufschlüsse verwendet werden, wird dies positiv bewertet. In jedem Falle ist eine Vielzahl von Informationen vom Satellitenbild bis zur Detailkartierung hier von großem Nutzen.

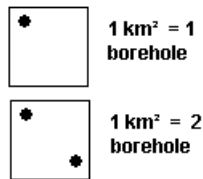


Abb. 76 Bohrrasterdichte.

Sollte es Bohrungen geben, die das Marmorlager durchteuft haben, so wird dies als positiv bewertet (Abb. 76), weil damit eine hohe Informationsdichte bezüglich der Eigenschaften des Marmorlagers zu erwarten ist. Eine hohe Bohrlochdichte wird positiv bewertet.

5.1.2.2 *Hauptbestandteile des Marmors*

Im WBS soll die Qualität eines Kalzitmarmors in einem abbauwürdigen Vorkommen beurteilt werden. Daher sind dolomitisierte Zonen oder überwiegend aus Dolomit gebildete Kalzitmarmore hier berücksichtigt bzw. eine qualitätsmindernde Einflussgröße. Reine Dolomitmarmore finden als Natursteinwerkstein natürlich ebenfalls ihre Verwendung. Solche dolomitischen Marmore sind in der Regel viel feinkörniger und dichter als ein kalzitischer Marmor.

Die Textur und die darauf beruhenden Muster des Marmors, sowie deren Homogenität bzw.

Heterogenität werden bewertet. Ein fein- bis mittelkörniger, im Muster homogener Marmor wird vom WBS als besonders geeignetes Material für die Gewinnung bewertet, da er sowohl gut bearbeitbar und einsetzbar ist als auch ästhetisch wirkt.

Erhöhte Porosität, wie sie u. a. bei grobkristallinen Kalzitmarmoren auftreten kann, ist für den Werkstein Marmor ein negatives Merkmal, da sie auch eine geringere Verwitterungsbeständigkeit zur Folge hat.

5.1.2.3 *Akzessorien als Qualitätsmerkmal im Marmor*

Zum einen sind akzessorische Minerale im Marmor in der Regel störende Komponenten, zum anderen sind sie aber auch maßgeblich Textur- bzw. Musterbildend. Graphit, ein typisches akzessorisches Mineral, ist oft erwünscht, da es für die typische Textur und Musterung einiger Marmore verantwortlich ist. Ist jedoch rein weißer Marmor gewünscht, stört auch Graphit. Das WBS bewertet deshalb nicht die Anteile an Graphit im Marmor. Auch Einschlüsse von Schieferlinsen können ein erwünschtes Textur- und Mustermerkmal sein. Da sie aber nicht die Regel sind, wird ein quarzreicher und mit Schiefer durchsetzter Marmor hinsichtlich der Qualität generell negativ beurteilt.

Andere Nebenbestandteile wie Sulfide hingegen sind sehr ungünstig für die Verwendung von Marmor. Sulfide oxidieren unter atmosphärischen Bedingungen und beeinträchtigen die Oberflächen durch Verfärbung.

Im Zusammenhang mit den Akzessorien sind auch die Lagerungsverhältnisse von Bedeutung. In stark verfalteten Marmoren ist das Auftreten von qualitätsmindernden Akzessorien wesentlich schwerer vorherzusagen als bei flacher Lagerung.

Tabelle 8: Geotechnische Eigenschaften (Mittelwerte) des Marmors aus den 3 untertägigen Betrieben (aus GERMANN et al. (2000); Daten von CNR):

			DMCO	CCLL	LASA
Direct Strength	Compression	σ_c (MPa)	72	95	82
		E_s (MPa)	52000	40300	40000
		ν_s	0,131	0,182	0,280
		E_t (MPa)	73000	62700	53000
		ν_t	0,252	0,280	0,220
		E_{dyn} (MPa)	78500	66000	63000
		ν_{dyn}	0,31	0,34	0,23
	Tension	σ_t (MPa)	5,2	8,4	5
		E_s (MPa)	101000	62500	24000
		ν_s	0,248	0,148	0,07
		E_t (MPa)	100000	53000	15500
		ν_t	0,32	0,15	0,05
σ_{τ} Brasil. (MPa)			6,8	10,4	8,2
C (MPa)			24	21,4	20,9
ϕ (°)			36,2	42	34,3
τ (MPa)			17	17,3	17
ϕ_b (°)			31,2	32,3	29,5
K_{Ic} (MPa/m) ^{1/2}			1,4355	1,534	3,119
CTOD _c (mm)			0,0049	0,0042	0,0073
Discontinuities characterisation					
JRC (-)			12	12,4	12,6
C _p (MPa)			0,87	0,7	0,3
ϕ_p (°)			33,5	36	42
C _r (MPa)			0,7	0,48	0,23
ϕ_r			34,5	41,5	39,8

σ_c - Compressive strength; σ_t - Tensile strength; $\sigma_{\tau \text{ Brasil.}}$ - Brazilian test; E - Young modules (compression for t= tangent, s= secant, dyn= puls bar test); ν - Poisson ratios (t= tangent, s= secant, dyn= puls bar test);

C - Cohesion, ϕ - Friction angles; τ - Shear strength; K_{ic} Hydraulic conductivities; CTOD_c - critical opening displacement of the original pre-crack tip; C_p - maximum attainable value of the cohesion JRC - Roughness index.

5.1.2.4 Geotechnische Eigenschaften des Marmors

Für die Berechnungen und Beurteilung von geotechnischen Eigenschaften im WBS wurden Daten zugrunde gelegt, die aus der Literatur zusammengestellt und im Rahmen des Projektes CAD-PUMA ermittelt wurden.

Im Rahmen des Gesamtprojektes sind den 3 Marmorlagerstätten 900 Gesteinsproben orientiert entnommen worden. Die Ergebnisse

der gesteinsphysikalischen Untersuchungen der Marmore durch die Gruppe CNR sind in Tabelle 8 dargestellt. Die Proben wurden an verschiedenen Stellen der untertägigen Hohlräume entnommen. Dabei wurde für die meisten Proben eine orientierte Probennahme durchgeführt. In den Richtungen x, y, z wurden dabei zylindrische Bohrkern dem Marmor entnommen. Abbildung 77 veranschaulicht die Orientierung der Proben.

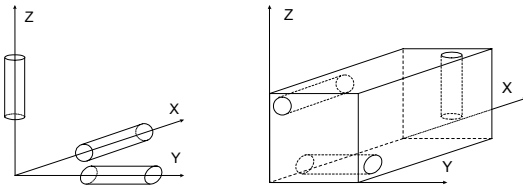


Abb. 77 Orientierte Probennahme.

Mit dieser sehr detaillierten Beprobung ist es möglich, auch gesteinsmechanisch relevante Gefügemerkmale wie der Schieferung und Schichtung des Materials Rechnung zu tragen, denn diese beeinflussen die Messwerte richtungsabhängig. Aus den gemessenen Einzelproben wurden dann mittlere geotechnische Kennwerte ermittelt. Wenn in den Regeln für die Inferenzmaschine Referenzdaten über gesteinsphysikalische Parameter von Marmor oder Schiefer benötigt wurden, sind in erster Linie diese Messwerte verwendet worden.

5.1.2.5 Trennflächenanalyse

Die Anzahl der gemessenen Trennflächen und der daraus abgeleiteten Trennflächenfamilien bzw. -scharen gibt Auskunft über Anordnung und die Dichte des Trennflächengefüges. Ein hoher Durchtrennungsgrad des Gebirges wird vom WBS negativ beurteilt. Die Anzahl ermittelter Trennflächenfamilien hängt von der Anzahl der gemessenen Klüfte, also auch von den Aufschlussverhältnissen ab.

Die Bewertung der Trennflächen stellte sich im Rahmen des Projektes CAD-PUMA als zentraler Punkt für die Optimierung eines untertägigen Hohlraumes heraus. In die Bewertung des WBS ging daher die Beurteilung der erfassten Trennflächen und der daraus mithilfe statistischer Methoden ermittelten Trennflächenfamilien ein. Das WBS ermittelt, basierend auf maximal 4 Trennflächenfamilien und deren Streich- und Einfallrichtung (Abb. 78 & 79) die bevorzugte Richtung für einen untertägigen Hohlraum. Grundlage für die Regeln des WBS, die eine optimale Orientierung eines untertägigen bergmänni-

schen Hohlraumes vorschlagen, ist das Ergebnis der Rohblockmodellierung mit *RESOBLOK* und *Surpac2000* (siehe dazu auch Kap. 7.1).

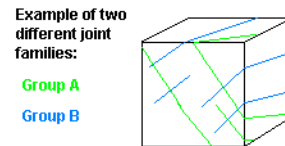


Abb. 78 Anzahl an Kluftfamilien.

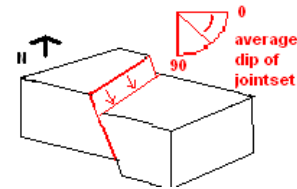


Abb. 79 Streichen und Einfallen der Kluftfamilie.

Basierend auf den eingegebenen Trennflächendaten wird im WBS wenn möglich ein Winkel größer 90° zwischen zwei Trennflächenscharen ermittelt und die daraus abzuleitende Richtung als mögliche Ausrichtung eines Hohlraums vorgeschlagen.

Eine Bewertung der Trennflächen soll auch die Rauigkeit und die Reibung auf deren Oberflächen beurteilen. Die Trennflächen zeigen unterschiedliche Rauigkeiten abhängig von ihrem Habitus (Abb. 80). Trennflächen mit einer planen Oberfläche besitzen eine niedrigere Reibung als stark wellige unebene Flächen. In der Gesteinsmechanik wird diese Rauigkeit mit dem Parameter J_r (Joint roughness) beschrieben (vgl. 5.1.2.9). Für die Beurteilung der Qualität der Trennflächen bezüglich der Rauigkeit innerhalb des WBS und auch für die Verwendung in *RESOBLOK* wurde die Klassifikation nach BROWN (1981) gewählt.

Es werden darin drei Stufen der Kluftausbildung unterschieden. Innerhalb dieser drei Gruppen werden dann nochmals Unterkategorien unterschieden.

Eine hohe Rauigkeit ist eine gute Voraussetzung für eine erhöhte Stabilität und bietet auch bei höherer Trennflächendichte ein aus-

reichendes Maß an Standsicherheit von Hohlräumen und Festen.

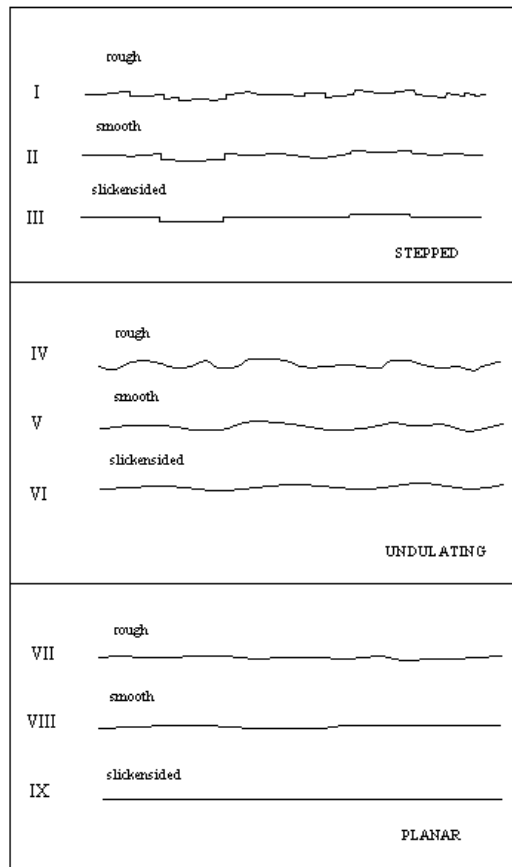


Abb. 80 Beschreibung der Trennflächenrauigkeit (Brown, 1981).

Die Kluftöffnungsweiten (Abb. 81) sind ebenfalls ein wichtiges Kriterium für die Stabilität des Gebirges. Grundsätzlich gilt, dass kleine Öffnungsweiten unter Sicherheitsgesichtspunkten günstiger einzuschätzen sind, als weite, offen stehende Trennflächen. Trennflächen mit einer durchschnittlichen Öffnungsweite von unter einem cm sind noch akzeptabel. Größere Öffnungsweiten sind jedoch schon als kritisch zu bewerten.

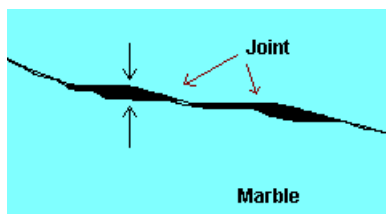


Abb. 81 Kluftöffnungsweiten.

5.1.2.6 Trennflächenbeurteilung mithilfe des RQD

Die Ermittlung des RQD (Rock Quality Designation Index) kann eine erste Einschätzung der Trennflächendichte und damit auch der Primärblockgrößen liefern (DEERE & DEERE, 1988). Der RQD wird aus der Gesamtlänge der intakten Kernstücke mit einer Länge >10 cm ermittelt, wobei davon ausgegangen wird, dass die Kernstücke von natürlichen und nicht künstlich durch das Bohren geschaffenen Trennflächen begrenzt werden (Abb. 82).

$RQD =$

$$\frac{\sum \text{Length of core pieces} > 10 \text{ cm length}}{\text{Total length of core run}} \times 100\%$$

Der Bohrkern sollte mindestens 6 Meter lang sein. Ein Wert größer 0,9 ist in jedem Falle nötig, um eine geeignete Blockgröße erwarten zu können.

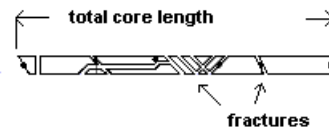


Abb. 82 RQD Bohrkern-Auswertung (DEERE & DEERE, 1988).

Tatsächlich ist eine Abschätzung von Rohblockgrößen basierend auf RQD-Wert nicht sicher, da damit nur zweidimensionale Informationen wiedergegeben werden. Selten werden orientierte Bohrkernuntersuchungen durchgeführt, die eine bessere Einschätzung zulassen, aber in der Regel sehr teuer sind. Erst mehrere Bohrungen mit orientierter Bohrkernerfassung in verschiedenen Richtungen (x, y, z) könnten als Anhaltspunkt dienen (siehe dazu auch Kap. 7.1 Numerische Simulation der Rohblockverteilung und -größe).

Eine Möglichkeit der systematischen Bohrkernaufnahme und der Ermittlung des RQD zeigen z. B. LEMY et al. (2001) mithilfe eines Bildverarbeitungssystems auf. Eine Analyse und Simulation des RQD nimmt ZEKAI (2000) vor, um eine mathematische Beschreibung des RQD mithilfe von Monte Carlo-Simulationen zu erreichen.

5.1.2.7 Methoden der Abschätzung von Primärblockgrößen

Wenn Aufschlüsse eine genauere Aufnahme von Trennflächen zulassen, dann ist die Bestimmung der Trennflächenentfernungen voneinander bzw. der Trennflächendichte oder Trennflächenweitständigkeit sehr nützlich, um eine erste Abschätzung der Primärblockgrößen zu erhalten.

Um die Trennflächendichte zu ermitteln, teilt man die Summe der Länge der gemessenen Trennflächenabschnitte bis zur nächsten begrenzenden Trennfläche durch die Gesamtzahl der gemessenen Klüfte (Abb. 83). Liegt der Wert dieses ermittelten mittleren Trennflächenabstandes über 6, so bewertet das WBS dies mit sehr gut. Dieser Wert ergibt sich aus den Untersuchungen in den Marmorsteinbrüchen.

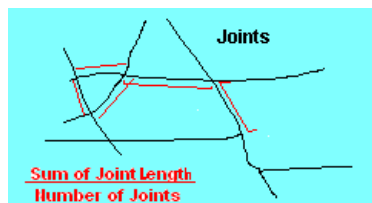


Abb. 83 Mittlerer Trennflächenabstand.

Werden größere Werte gemessen, dann sind die Primärblockgrößen erreicht, die für eine optimale Nutzung des Vorkommens durch die Gewinnung von Rohblöcken sprechen. Diese Methode der indirekten Abschätzung von Primärblockgrößen ist jedoch sehr ungenau.

Wenn sehr gute Aufschlussverhältnisse, wie zum Beispiel in einem Steinbruch vorhanden sind, ist die Methode der Rohblockbestimmung nach SINGEWALD (1992) (Abb. 84)

eine geeignetere Methode, um eine Naturwerksteinlagerstätte zu bewerten.

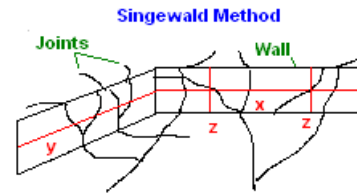


Abb. 84 Ermittlung der durchschnittlichen Rohblockgröße nach SINGEWALD (1992).

Über Profile in x, y und z Richtung werden die Abstände der Trennflächen voneinander gemessen und dann daraus die Größe eines durchschnittlichen Rohblockes (nach SINGEWALD) ermittelt (vgl. auch Kap. 7.1).

5.1.2.8 Wasser auf den Trennflächen

Niederschläge oder Grundwasser können auf den Trennflächen austreten. Die Wassermengen unterliegen naturgemäß saisonalen Schwankungen. Durch die zutretenden Wasser wird die Standfestigkeit des Gebirges oft sehr beeinflusst. Der zu ermittelnde und im WBS bewertete Wert bezieht sich auf die Menge an Wasser (in l/h), die in 10 Meter Tunnellänge oder Aufschluss aus den Trennflächen zutritt.

5.1.2.9 Bewertungsmethoden der Gebirgsfestigkeit

Eine Reihe von geomechanischen Indices erlaubt eine Klassifizierung des Trennflächengefüges. Daraus lassen sich Gebirgsfestigkeiten und mögliche Hohlraumdimensionen des Marmorvorkommens abschätzen.

RMR (Rock Mass Rating)

Mithilfe des Wertes für das RMR (Rock Mass Rating) (BIENIAWSKI, 1974) wird die durchschnittliche Gebirgsfestigkeit des Marmorvorkommens ermittelt. Aus dem RMR lässt sich auch die Notwendigkeit von Ankersystemen ableiten. Der RMR-Wert wird aus einer Reihe von Parametern ermittelt, die im WBS vom Benutzer abgefragt wurden. Der

Wert, der vom Benutzer eingegeben wird, kann vom WBS mit dem ermittelten RMR verglichen werden, vorausgesetzt alle notwendigen Informationen sind vorhanden. In die RMR-Bestimmung gehen folgende Parameter ein: die Druckfestigkeit, der RQD-Index, die Weitständigkeit von Trennflächen, die Trennflächenbeschaffenheit, Grundwassereinfluss und der Typ des Hohlraumes. Mithilfe des ermittelten oder eingegebenen RMR wird die Notwendigkeit eines Ankersystems abgeschätzt.

$$P = \frac{100 - RMR}{100} \gamma B$$

P zu sichernde Kraft, kN

B Hohlraum-Weite, m

γ Gesteinsdichte, kg/m³

Auch die mögliche Spannweite eines Hohlraumes kann aus dem RMR-Wert ermittelt werden.

Eine erste Fassung dieser Methode ist von BIENIAWSKI (1989) entwickelt und von WANG et al. (2002) überarbeitet und leicht korrigiert worden (Abb. 85).

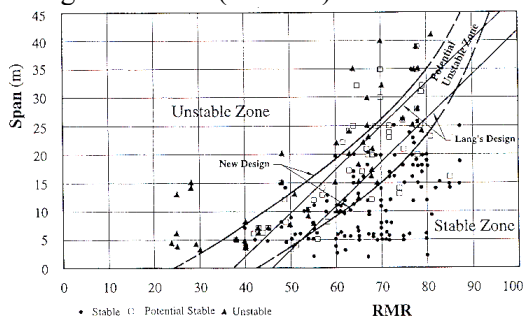


Abb. 85 Spannweiten von Hohlräumen im Gestein in Abhängigkeit vom RMR (WANG et al., 2002).

Sie ist als Grundlage in das WBS übernommen worden. So ergibt sich zum Beispiel für einen RMR-Wert von 80 eine maximale Spannweite (Span) von 22,5 m, die auch stabil bleibt. Der RMR-Wert in den hier untersuchten drei Marmor-Steinbrüchen variiert von ca. 65 (DMCO) bis 90 (CCLL).

GSI (Geological Strength Index)

Der GSI (HOECK et al., 1995) beschreibt die Struktur und die Oberflächenverhältnisse der Trennflächen eines Gebirges. Der GSI wird ermittelt aus dem RQD-Index, der Anzahl der Trennflächenscharen (J_n), der Rauigkeit (J_r) der Trennflächenoberflächen und der Alteration (J_a) auf den Trennflächen.

$$GSI = 9 \log \left[\left(\frac{RQD}{J_n} \right) \left(\frac{J_r}{J_a} \right) \right] + 44$$

Ausreichende GSI-Werte müssen für die untertägige Gewinnung von Marmor mit mindestens 55 angesetzt werden. Werte größer 60 sind befriedigend und alle größer 70 als gut bis sehr gut zu bezeichnen. Die untersuchten Steinbrüche sind alle mit Werten über 60 in den gewinnenden Bereichen einzustufen.

GEOLOGICAL STRENGTH INDEX		SURFACE CONDITIONS				
From the description of structure and surface conditions of the rock mass, pick an appropriate Box in this chart. Estimate the average value of the Geological Strength Index (GSI) from the contours. Do not attempt to be too precise. Quoting a range of GSI from 36 to 42 is more realistic than stating that GSI = 38. It is also important to recognise that the Hoek-Brown criterion should only be applied to rock masses where the size of individual blocks is small compared with the size of the excavation under consideration. When individual block sizes are more than approximately one quarter of the excavation dimension, failure will be structurally controlled and the Hoek-Brown criterion should not be used.		STRUCTURE				
		DECREASING SURFACE QUALITY →				
DECREASING INTERLOCKING OF ROCK PIECES ↓	INTACT OR MASSIVE – intact rock specimens or massive in situ rock masses with very few widely spaced discontinuities	90	80	N/A	N/A	N/A
	BLOCKY – very well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three orthogonal discontinuity sets	70	60	50	40	30
	VERY BLOCKY – interlocked, partially disturbed rock mass with multifaceted angular blocks formed by four or more discontinuity sets	50	40	30	20	10
	BLOCKY/DISTURBED – folded and/or faulted with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	DISINTEGRATED – poorly interlocked, heavily broken rock mass with a mixture of angular and rounded rock pieces	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	FOLIATED/LAMINATED/SHEARED – Thinly laminated or foliated and tectonically sheared weak rocks. Closely spaced schistosity prevails over other discontinuity set, resulting in complete lack of blockiness	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Abb. 86 Geological Strength Index - GSI (HOECK 1998).

In Abbildung 86 sind die ermittelten GSI-Werte zu unterschiedlichen Strukturen des Gesteinskörpers und zur Qualität der Oberflä-

chenausbildung der Trennflächen in Beziehung gesetzt.

5.1.2.10 Q-System

Das Q-System wurde von BARTON et al. (1974) am norwegischen Geotechnischen Institut (NGI) entwickelt. Es basiert auf sechs Parametern: dem RQD-Wert, der Anzahl an Trennflächenfamilien, der Rauigkeit der meisten Trennflächen, der Intensität der Alteration des Gesteins, der Wasserwegsamkeiten und den Spannungsverhältnissen. Diese Parameter ergeben den Q-Wert wie folgt:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF}$$

RQD = Rock Quality Index

J_n = Anzahl an Trennflächenfamilien

J_r = Kluft-Rauigkeit

J_a = Kluft-Alteration

J_w = Reibungsreduktion durch Wasser

SRF = Spannungsreduktionsfaktor

Der Q-Faktor ist in Bezug auf die Auffahrung eines Tunnels im Gebirge auf die Spannweite/Öffnungsweite ausgelegt, wird aber auch in anderen Bereichen verwendet (MILNE et al., 1998).

Der ESR (Equivalent Support Ratio) ist ein Faktor, der bezogen auf die Dimensionierung von bergmännischen Hohlräumen und der nötigen Sicherung des Gebirges durch Ankerungstechniken, im Verhältnis zu der Öffnungsweite ein Verhältnismaß ergibt (Abb. 87). Bei einem permanent geöffneten Hohlraum, wie er bei der untertägigen Gewinnung von Marmor vorausgesetzt wird, ist mindestens eine ESR von 1 anzunehmen. Das Verhältnis zu dem Q-Faktor und dem der Dimensionierung eines bergmännischen Hohlräum und den daraus abzuleitenden notwendigen Sicherungsmaßnahmen ist in folgender Abbildung dargestellt.

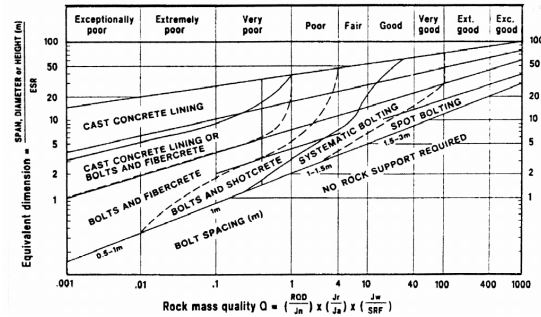


Abb. 87 Q-System und Hohlraumdimensionierung (BARTON & GRIMSTAD, 1994).

Die Länge von Ankern (L) lässt sich umsetzen und ableiten durch

$$L = \frac{2 + 0,15B}{ESR}$$

mit B als der Weite des Hohlräum in Metern. Die maximale ungesicherte Weite des Hohlräum ergibt sich aus:

$$Max. \text{Öffnungsweite} = 2(ESR) \cdot Q^{0.4}$$

Der Q-Faktor korreliert gut mit dem RMR-Wert (Abb. 88). Dabei gilt laut JETHWA (1982).

$$RMR = 9 \ln Q + 44$$

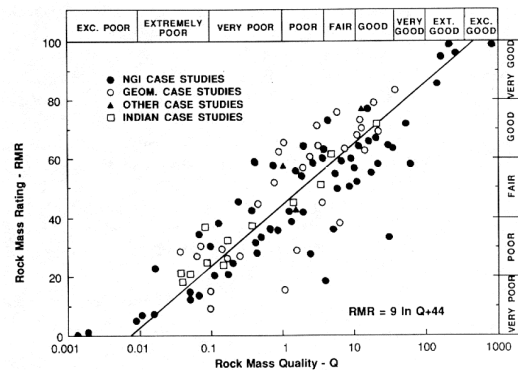


Abb. 88 Korrelation von RMR und Q (BIENIAWSKI, 1989).

Die Korrelation basiert auf mehreren Fallstudien (BIENIAWSKI, 1989). Der errechnete Q-Faktor kann also mit dem ermittelten RMR-Wert abgeglichen werden. Das WBS überprüft hier die Plausibilität. Ist ein ermittelter RMR zu groß für einen errechneten Q-Faktor, weist das System darauf hin.

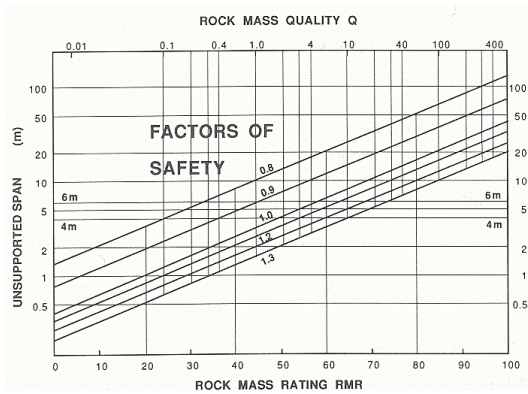


Abb. 89 Spannweiten von ungesicherten Hohlräumen in Abhängigkeit von RMR-Wert und Q-Faktor (BIENIAWSKI, 1989).

Aus dem Q-Faktor kann, wie auch aus dem RMR-Wert, die ohne zusätzliche Sicherungsmaßnahmen mögliche Spannweite eines Hohlraumes ermittelt werden (Abb. 89).

Die vom WBS ermittelten Spannweiten basieren auf diesen Abhängigkeiten. Bei den von den Steinbruchbetreibern des Projektes anzutreffenden Marmorlagern ergaben sich für die ungesicherten Öffnungsweiten danach ca. 10 m.

Die tatsächlichen Öffnungsweiten sind bis zu 50% größer, was aber ausschließlich auf eine Entscheidung während des Abbaus zurückzuführen ist. An vielen Stellen wurde von vornherein eine Sicherung mit Hilfe von Stahlan kern durchgeführt, sodass eine zusätzliche sicherheitstechnische Überprüfung nicht mehr durchgeführt werden konnte.

5.1.2.11 Spannungszustände im Gebirge

Um die Werte für RMR zu verifizieren und andere Indices beurteilen zu können, werden auch die Spannungszustände des Gebirges im WBS berücksichtigt. Dabei werden die Normalspannungen σ_1 und σ_3 erfragt, die sich näherungsweise auch aus der Mächtigkeit der Überdeckung des Marmorlagers ableiten lassen (Abb. 90).

Fehlen entsprechende Werte, wird bei den Berechnungen innerhalb des Systems auf die

im Projekt ermittelten durchschnittlichen Werte zurückgegriffen.

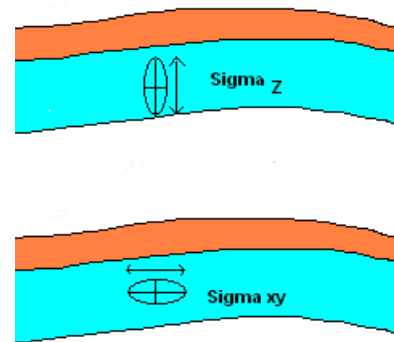


Abb. 90 Lage der Spannungen Sigma 1 (σ_z) und 3 (σ_{xy}) im Gebirge.

Diese Werte stehen also nur dann zur Verfügung, wenn ausreichend Angaben über die Überdeckung des Marmorlagers gemacht werden können. In der Regel lassen sich diese Werte durch eine einfache Abschätzung ermitteln. Aufwendige Testverfahren, wie im Rahmen des Projektes CAD-PUMA zur Bestimmung der untertägigen Spannungszustände durchgeführt, sind im normalen Steinbruchbetrieb nicht möglich.

Im vorliegenden Falle können dem WBS zusätzlich die Druckfestigkeit, die Zugfestigkeit und der Punktlast-Index des Marmors für die Auswertung zur Verfügung gestellt werden.

5.1.3 Abbautechniken – Modul UQL

Aus den gesammelten Daten der Module GEO und MMP lassen sich bereits relativ viele Parameter für die Dimensionierung eines untertägigen Hohlraumes im Marmor ableiten. Die Empfehlungen des WBS beschränken sich jedoch auf die Orientierung, die maximalen Spannweiten und die sich daraus ergebenden Festendimensionierungen. Es werden deshalb im Modul UQL auch Informationen abgefragt, die sich auf bereits bestehende untertägige Gewinnungstätigkeiten bzw. die geplanten Gewinnungstechniken beziehen.

Um die Qualität der Informationen und Erfahrungen des Systembenutzers abzuschätzen, werden weitere Daten über eine eventuell bereits existierende über- und untertägige Gewinnung und die dabei eingesetzte Technik abgefragt.

5.1.3.1 Existierende Marmorgewinnung

Wenn bereits Marmorsteinbrüche existieren, dürften in aller Regel hinsichtlich der Qualität des Rohstoffes die Voraussetzungen gegeben sein, die auch eine untertägige Gewinnung zulassen werden. Jedoch sind vor der Planung und Entscheidung über eine untertägige Auffahrung noch einige grundsätzliche Fragen zu klären, die mithilfe des WBS alleine nicht ausreichend beantwortet werden können:

- Hat der Steinbruchbetreiber einschlägige Erfahrungen mit der untertägigen Gewinnung von Marmor, so ist dies positiv für weitere Planung und Optimierung zu bewerten.
- Sind die für eine Auffahrung eines untertägigen Hohlraumes notwendigen Ausrüstungen vorhanden, gilt dies ebenfalls als ein positiver Aspekt für die Realisierung.
- Zusammenfassend kann man davon ausgehen, dass, wenn diese Bedingungen erfüllt sind und der Marmor-Steinbruchbetreiber eine weitere Auffahrung untertägiger Lagerstättenbereiche durchführt, diese von existierenden bergmännischen Hohlräumen aus relativ einfach durchzuführen ist.

5.1.3.2 Existierende untertägige Gewinnung

Existieren bereits untertägige, bergmännisch geschaffene Hohlräume, wird dies vom WBS positiv bewertet. Die Empfehlungen aus der Trennflächen-Analyse können hilfreich sein, ein höheres Ausbringen zu erreichen.

Die Dimension der existierenden untertägigen Hohlräume wird vom WBS ebenfalls bewertet (Abb. 91).

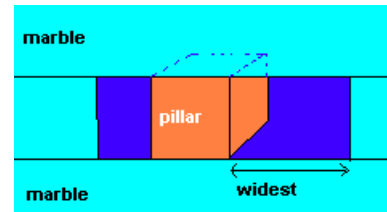


Abb. 91 Spannweite von Hohlräumen mit Festen.

Die Standzeit der vorhandenen Hohlräume ist dabei ein wichtiges Bewertungskriterium. Lange Standzeiten vorhandener Hohlräume (> 10 Jahre) sind sehr günstig und deuten entweder auf ausreichende Erfahrung basierend auf Sicherungsmaßnahmen oder auf ein stabiles und standfestes Marmorlager hin.

Die Spannweiten des maximalen Hohlraumes geben Anhaltspunkte für die möglichen künftigen Abbaukammer-Dimensionen und können mit den im WBS errechneten Werten verglichen werden.

Die Öffnungsweite von Hohlräumen ohne Festen liefert ebenfalls Anhaltspunkte über die Qualität des Gebirges (Abb. 92). Auf günstige Gebirgseigenschaften weisen Werte über 10 Meter hin. Spannweiten der Öffnungen größer 15 Meter entsprechen sehr guten Voraussetzungen.

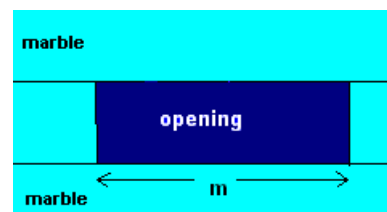


Abb. 92 Spannweite von Hohlräumen ohne Festen.

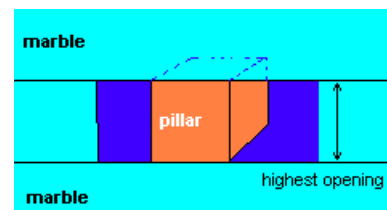


Abb. 93 Festenhöhe.

Der Schlankheitsgrad einer Feste ist ebenfalls ein wichtiges Kriterium. Der Schlankheitsgrad bezeichnet das Verhältnis von Festen-

breite und Festenhöhe (Abb.93). Beides hängt maßgeblich von der Teufenlage des Hohlraumes um die Feste herum ab. Prinzipiell gilt: je tiefer der Hohlraum gelegen ist, bzw. je mächtiger die Überdeckung ist, desto geringer sind die erreichbaren Festenhöhen. Die Dimensionierung der Festen hängt aber auch stark von den Trennflächengefügen ab (siehe auch Kap 7.2).



Abb. 94 Höhe der Hohlräume ohne Festen.

Die Höhen der Hohlräume ohne Festen sind in der Regel weniger kritisch einzuschätzen (Abb. 94). Wenn die maximale Spannweite eines Hohlraumes erreicht ist, wird die Standfestigkeit durch eine weitere Erhöhung des Raumes wenig beeinflusst werden. Entscheidender ist die Konstellation der Trennflächen und der Primärblöcke, die möglicherweise aus der Firste in den Hohlraum einbrechen können.

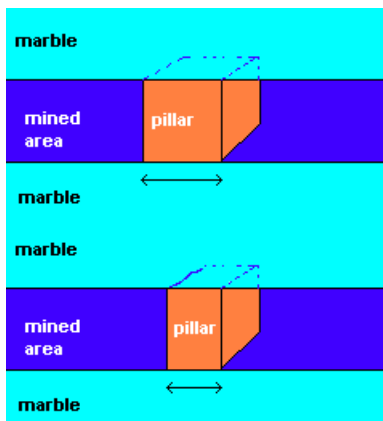


Abb. 95 Maximale und minimale Festenbreite.

Verfügbare Daten über maximale und minimale Festenbreiten werden nach Sicherheitsgesichtspunkten für die maximal und minimal zulässigen Festenbreiten, die das WBS errechnet hat, beurteilt (Abb. 95).

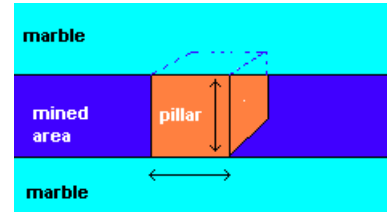


Abb. 96 Breiten/Höhenverhältnis von Festen.

Mit Hilfe des Breiten/Höhenverhältnisses (Abb. 96) kann die Qualität der bestehenden Feste bewertet werden. Die Information wird mit den im WBS ermittelten Daten verglichen und bewertet.

5.1.3.3 Sicherungsmaßnahmen

Der bisherige Einsatz von Sicherungstechnik zeigt, inwieweit bereits Erfahrungen mit Sicherungsmaßnahmen vorhanden sind.

Ankerungstechniken können die Effizienz des Abbaus und die Sicherheit erhöhen. Die gängigsten Typen von Ankerungstechniken werden vom WBS erwähnt und bewertet. Die empfohlene Länge der Anker kann, wie beschrieben, unter Umständen vom Q-Faktor abgeleitet werden, wenn dieser ermittelt werden kann.

Das Ankerungsmaterial zum Fixieren der Anker wird ebenfalls bewertet. In der Regel werden hierbei Zemente aber selten auch Kunststoffkleber verwendet.

Das Füllmaterial für weit offene Trennflächen oder gar Höhlen ist oft nicht einfach zu beschaffen. Denn in Verbreitungsgebieten von Metasedimenten wie Schiefern und Marmoren sind Schotter und Sande als Zuschlagstoffe für einen Beton nicht weit verbreitet. Die Zuschlagstoffe müssen daher oft weit transportiert werden und können bei stark alterierten und verkarsteten Marmorvorkommen mengenmäßig ein nicht unerheblicher Faktor werden, wenn aus sicherheitstechnischer Sicht viel Beton eingebracht werden muss.

In Marmorlagern mit engständigem Trennflächengefüge und intensiven Verkarstungserscheinungen sind Maßnahmen zur Kontrolle von Bewegungen im Gebirge ein wichtiger

Aspekt. Von elektronischen und optischen Messgeräten bis hin zu einfachen Techniken mit Klebestreifen über den Trennflächenöffnung zur Bewegungsanalyse reichen die Maßnahmen, die getroffen werden müssen, um die Sicherheit zu gewährleisten. Je instabiler das Marmorlager, desto höher die Kosten für eine detaillierte Untersuchung der Gebirgsbewegungen.

5.1.3.4 Gewinnungstechnik

Die verwendete Technik bei der untertägigen Gewinnung von Marmor unterscheidet sich maßgeblich in zwei Bereichen von der Gewinnung im Steinbruch. Zum einen werden spezielle Schrämmaschinen (Kettensägen) eingesetzt, zum anderen sind es die zusätzlichen Sicherungsmaßnahmen, die untertage angewendet werden müssen.

Die verwendeten Schrämmaschinen (z. B. von Korfmann) werden speziell für die untertägige Gewinnung gefertigt. Dort eingesetzte Schrämmaschinen können sowohl mit Widia als auch mit Diamant besetzt sein. Der ausschlaggebende Faktor hierfür ist die Gesteins Härte bzw. der Quarzanteil im Marmor. Ist der Quarzgehalt größer 2 Vol %, dann ist der Einsatz von Diamant-besetzten Sägen ratsam und wirtschaftlich. Aus den Informationen über die Quarzgehalte und die Einschaltungen von silikatischen Gesteinen in den Marmor, die in dem Modul MMP und GEO gesammelt sind, lassen sich entsprechende Empfehlungen ableiten (vgl. Kap. 5.1.2.3).

Seilschrämmaschinen (Seilsägen) werden unter anderem beim Zuschnitt und der Zerkleinerung der Rohblöcke eingesetzt. Auch hier ist der Besatz der Säge wichtig. Wie auch bei Schrämmaschinen ist der Quarzgehalt des Marmors entscheidend.

Die Schnittgeschwindigkeiten hängen bei den Schrämmaschinen sowohl von der Leistung der Antriebsaggregate als auch von dem Trennflächengefüge ab. Das Verkeilen der Schrämmaschinen bei dichtem Trennflächen-

gefüge kann den Gewinnungsprozess erschweren. Seilschrämmaschinen reagieren aller Erfahrung der Steinbruchbetreiber nach empfindlicher als Kettenschrämmaschinen.

5.1.3.5 Wasserbedarf

Wasser ist für die Gewinnung von Marmor wichtig. Die Spülung der Sägen erfolgt ausschließlich mit Wasser. Erst seit wenigen Jahren existieren mit Diamant besetzte Schrämmaschinen (Kettenschrämmaschine), die nur mit einem speziellen Fett geschmiert werden müssen und ohne Wasserspülung arbeiten.

Auch für die Bewässerung des Steinbruches im Sommer, wenn die Zufahrtswege trocken sind, muss Wasser versprüht werden, damit die Staubentwicklung gering bleibt. Eine eigene Wasserversorgung ist also von großer Bedeutung für den Betreiber. Muss Wasser gekauft und herangeschafft werden, ist dies ein erheblicher Kostennachteil.

Der Verbrauch an Wasser pro Jahr in einem existierenden Tagebau kann mit Verlagerung der Bergbauaktivitäten nach untertage sicherlich verringert werden, weil eine geringere Staubentwicklung zu erwarten ist und damit weniger Wasser zur Befeuchtung der Wirtschaftswege erforderlich ist.

In die Bewertung der WBS geht positiv eine eigene Wasserhaltung ein bzw. ein erreichbarer Grundwasserleiter, der die untertägige Gewinnung nicht nachteilig beeinflusst.

5.1.3.6 Abraum - Versatz

Die Lagerung des anfallende Abraums bei der Neuerschließung von untertägigen, bergmännischen Hohlräumen in benachbarten Tagebaubetrieben ist unproblematisch. Untertage anfallendes Material kann in der Regel in alte Abbauhohlräume als Versatz verbracht werden. Lange Transportwege für Abraum bedeuten generell höhere Kosten (Abb. 97).

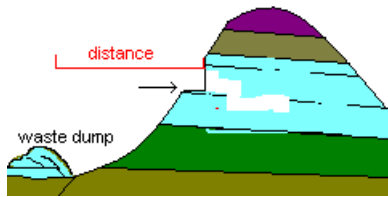


Abb. 97 Entfernung zwischen dem Eingangsbereich der Mine und dem Versatzbereich.

5.1.4 Wirtschaftliche Aspekte – Modul MEC

Wirtschaftliche Einflüsse auf die untertägige Gewinnung von Marmor konnten nur sehr eingeschränkt in das System integriert werden, da nicht genügend Daten verfügbar waren. Die drei projektbeteiligten Steinbruchbetriebe sind zu unterschiedlich, als dass einheitliche Eckdaten für die Wirtschaftlichkeit ableitbar gewesen wären.

Folgende Fakten sind jedoch als grundlegende Bedingungen für die Anlage eines untertägigen Hohlraumes für die Marmorgewinnung zu nennen:

Als personelle Basis für die Anlage eines untertägigen Hohlraumes werden mindestens 4 bis 5 Arbeiter benötigt. Abhängig von den bergrechtlichen Bestimmungen ist auch ein Bergingenieur für die Durchführung verantwortlich.

Als technische Grundausstattung ist eine Schrämmaschine und eine Seilschrämmaschine zum Lösen und Formatieren von Primärblöcken notwendig. Hydraulische Bohrhämmer sind für den Einsatz von Seilschrämmaschinen und zum Formatieren der Primärblöcke erforderlich. Radlader und LKWs werden für den Abtransport benötigt.

Weitere Punkte sind förderlich für eine optimale Nutzung des gewonnenen Rohmaterials.

- Steinbruchbetriebe bieten geeignetes personelles und technisches Potential um einen untertägigen Betrieb zu unterstützen. Außerdem wird die untertägige Gewinnung durch einen Steinbruchbetrieb hinsichtlich einer kontinuierlichen Produktion an Rohblöcken unterstützt.

- Weiterverarbeitende Einrichtungen, die neben reinen Rohblöcken zusätzlich Produkte (z. B. Natursteinfliesen, Zuschlagstoffe) aus dem Marmor gewinnen, können auch mindere Qualitäten verarbeiten und so Gewinne erwirtschaften.

5.2 *Ranking als Bewertungsmethode*

Um die eingegebenen Daten zu bewerten und unterschiedliche Marmorlagerstätten hinsichtlich ihrer Eignung für die untertägige Gewinnung vergleichen zu können, ist ein Punktesystem in das WBS implementiert worden. Die Bewertung wird mithilfe eines Ranking durchgeführt. Die Punkteverteilung musste für die Entwicklung des Systems flexibel gewählt werden. Deshalb sind die Ober- und Untergrenzen der Punkteverteilung nicht einheitlich auf Schwellenwerte fixiert. Generell werden Kriterien, die für die Auffahrung eines untertägigen Hohlraum günstig sind, positiv bewertet. Nachteilige Eigenschaften werden mit Punktabzug gewertet.

Tabelle 9 gibt einen Auszug einzelner Bewertungspunkte wieder. Die Bewertungspunkte beziehen sich auf Teilbereiche der Module im WBS.

Es sind in der Tabelle die ermittelten Ranking-Werte für die drei untersuchten Steinbrüche, sowie ein fiktives Fallbeispiel wiedergegeben. Die letzten beiden Spalten geben Minima und Maxima der möglichen Werte wieder.

Vergleicht man die Werte für die geomorphologische Situation, sind die Werte bei DMCO am höchsten. Bei DMCO ist der Transportweg für die Rohblöcke optimal. Die strukturgeologischen Voraussetzungen sind in LASA und CCLL am günstigsten. Bei DMCO schlägt sich die negative Beurteilung des vorhandenen Störungssystems in der Marmorlagerstätte nieder. Der ermittelte RQD ist in der Marmorlagerstätte von CCLL optimal. Die hohe Trennflächendichte stellt für die

Marmorlagerstätte LASA einen besonderen Nachteil dar. Bei den Hauptkomponenten wird deutlich, dass in allen Lagerstätten ein qualitativ hochwertiger Kalzitmarmor gewonnen wird. Die RMR- und GSI-Bewertung fällt für CCLL am besten aus, die Trennflächendichte ist hier am geringsten.

Einige Werte werden nur berechnet, wenn bestimmte Bedingungen erfüllt sind. So sind ermittelte bzw. hergeleitete Werte aus dem Q-System, dem RMR-System Voraussetzung für die max. Hohlraumweite eines möglichen untertägigen Grubengebäudes, die nur berechnet wird, wenn noch kein untertägiger Hohlraum besteht. In dem in Tabelle 9 dargestellten fiktiven Beispiel würde das WBS eine

maximale Hohlraumweite von 9 Metern empfehlen.

Die derzeitigen Möglichkeiten, die im Rahmen des vorliegenden WBS verwendet wurden, reichen nicht aus, um die maximale Öffnungsweite eines bergmännischen Hohlraumes in einem unbekannten Marmorlager zu beurteilen und vor allem konkrete, notwendige Sicherheitsanforderungen zu beschreiben. Die realen Gegebenheiten und Umstände Vorort und die daraus abzuleitenden sicherheitstechnisch notwendigen Voraussetzungen, sind nicht im WBS abzuschätzen. Die beteiligten Industriepartner fahren in den untertägigen Hohlräumen größere Spannweiten auf, als das WBS empfehlen kann.

Tabelle 9: Bewertung der Eingabe ins WBS anhand des Ratings und der ermittelten Werte (Auswahl) für die untertägigen Pilot-Abbaue

Bewertung	Beispiel*	DMCO	LASA	CCLL	MAX	MIN
Geomorphologische Situation	24	19	10	10	30	0
Strukturgeologische Situation	77	53	80	87	91	30
RQD	13	8	8	13	14	-5
Trennflächen	25	23	18	22	32	0
Hauptkomponenten	10	10	10	10	10	0
RMR und GSI	23	14	11	16	25	0
Q-System	11	-	-	-	-	-
RMR aus Q	66	-	-	-	-	-
Max. Hohlraumweite ermittelt aus Q-System [m]	9	-	-	-	-	-
* = Fiktives Beispiel einer Marmorlagerstätte zum Vergleich						

6 Spezifische Geowissenschaftliche Parameter für die untertägige Gewinnung von Marmor

Die geowissenschaftlichen Planungsgrundlagen für eine untertägige Gewinnung von Marmor beziehen sich maßgeblich auf die Lagerungsverhältnisse, strukturgeologische Elemente wie Störungs- und Trennflächensysteme und Verkarstungsphänomene.

Nach der allgemeinen Erörterung der geowissenschaftlichen Einflussgrößen im Zusammenhang mit der Struktur des WBS (Kap. 5) sollen im Folgenden die wichtigsten Gesichtspunkte am Beispiel der drei untersuchten Experimental-Marmorbergwerke erörtert werden.

6.1 Lagerungsverhältnisse und Qualitätsverteilung im Untergrund

Eine Abbaukammer in einem Marmorlager mit einem Kontakt zu überdeckendem Schiefer, der eine flache Lagerung aufweist, kann unproblematischer geplant werden als in einfallenden oder stark gefalteten geologischen Konstellationen. Am folgenden Beispiel (DMCO) soll dies dargestellt werden. Der Blick in den Tagebau zeigt die beiden wichtigen geologischen Einheiten (Abb. 98). Im Hangenden überdeckt ein mächtiger Schieferhorizont den abbauwürdigen Marmor. In das Marmorlager wurde der untertägige Vortrieb vom Rand des Steinbruches aus durchgeführt.

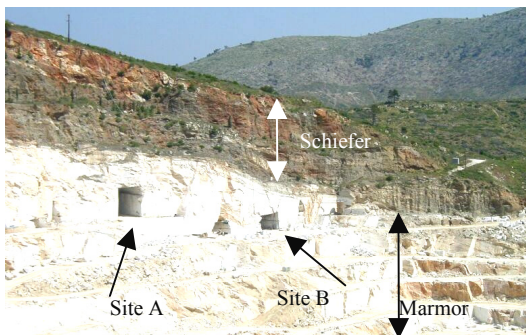


Abb. 98 Tagebau von DMCO mit den Eingängen zu Site A und Site B.

Der Kontakt des Marmors zum hangenden Schiefer ist relativ scharf begrenzt mit Einschaltungen von Schieferlinsen und quarzreichen Schichten im Marmor. Die Schichtgrenze zwischen Marmor und Schiefer hat ein leichtes Einfallen in den Hang von 5 bis 10 Grad Richtung NW. Der Kontaktbereich vom Marmor zum Schiefer ist eine potenzielle Schwächezone, die kein ausreichend sicheres Dach für eine darunter zu öffnende Hohlraumkammer bieten würde. Ohne aufwändige Sicherungsmaßnahme wäre mit einem erheblichen Stein- bzw. Blockfall aus der Firste zu rechnen. Um dies zu vermeiden, muss ein Sicherheitsabstand von mindestens 5 Metern zu diesem Kontaktbereich gewahrt werden.

Die Hohlräume sind auf zwei unterschiedlichen Ebenen (ca. 2 Meter von der Firste von Site B bis zur Sohle von Site A) in dem flach einfallenden Marmorlager angeordnet (Abb. 99). Sie liegen dicht beieinander. Sie überschneiden sich und sind mittlerweile auch miteinander verbunden. Die möglichen Erweiterungen sind in Abbildung 99 b dargestellt. Der Kontakt zum Schiefer ist im Steinbruch abgewandten Teil des Grubengebäudes sehr nah bei ca. 5 Metern. Erweiterungen des derzeitigen Abbaus in diese Richtung würde den Kontakt zum Schiefer erreichen.

Je näher die Auffahrung im Marmor sich dem Schiefer nähert, desto schlechter wird die Gesteinsqualität hinsichtlich der zu beobachtenden Trennflächen. Die Trennflächendichte nimmt zu und das Gebirge wird instabiler. Sicherungsmaßnahmen müssen gewährleisten, dass sich keine Blöcke aus der Firste lösen.

Diese Sicherungsmaßnahmen verursachen erhebliche Kosten und müssen in einem zeitlich eng gesteckten Rahmen sorgfältig durchgeführt werden. Wird nach der Auffahrung der ersten Ebene weiter abgebaut, ist es mit einfachen technischen Mitteln nicht mehr möglich, an der Firste Ankerungen durchzuführen. In den Berg hinein ist eine weitere

tieferer Auffahrung wegen des Kontaktes zum Schiefer nicht möglich.

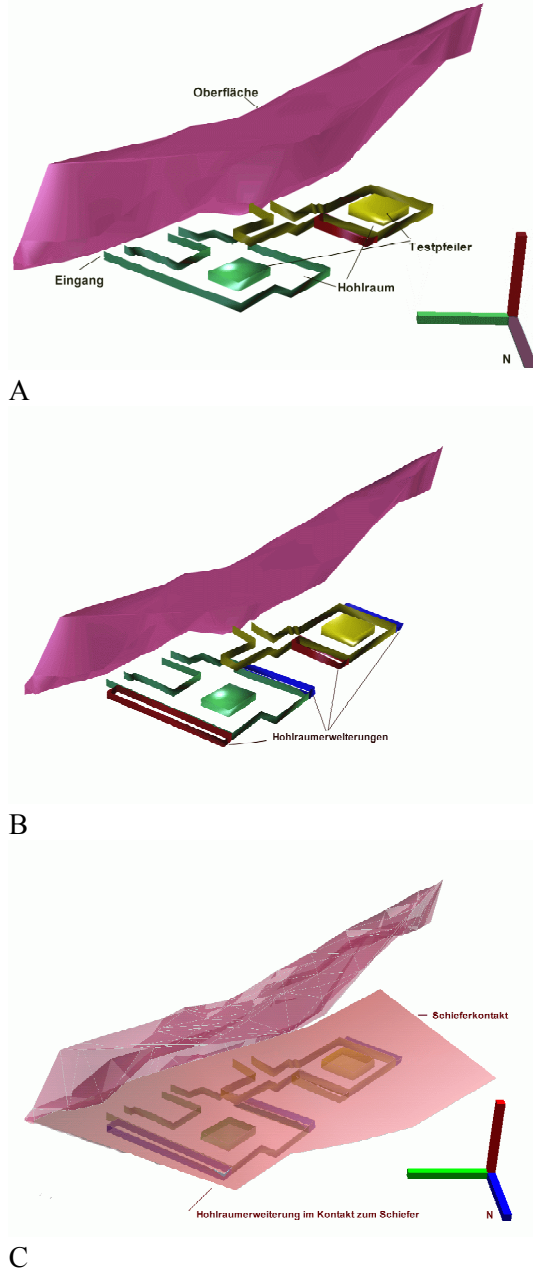


Abb. 99 a-c 3D-Darstellung des untertägigen Hohlraumes von DMCÖ (A) mit möglichen Erweiterungen (B) und dem Kontakt zum Schiefer (C). Die geologische und geotechnische Situation wurde in *Surpac2000* modelliert.

Zusammenfassend kann als Grundsatz für das WBS festgestellt werden:

- die Geometrie eines untertägigen Hohlraumes muss den Gegebenheiten bezüglich der lithologischen Hangend-Kontakte angepasst werden.
- Die Auffahrung muss ein möglichst großes Volumen des abbauwürdigen Vorkommens erschließen.

Beim Industriepartner CCLL waren durch die Erfahrungen aus den vorauslaufenden Steinbruchbetrieben ausreichende Erkenntnisse über die Qualitätsverteilung im produktiven Marmorhorizont vorhanden.

Bei der Planung der untertägigen Pilot-Gewinnungsanlagen war von einer kammerartigen Bauweise mit einer zentralen Feste (Pfeiler) auszugehen. Ein Hereingewinnen der Marmorblöcke findet immer vom Hangenden zum Liegenden statt. Im Sinne eines möglichst hohen Ausbringens folgte daraus aber auch, das Hangendes und Liegendes der Lagerstätte auch Firste und Sohle des Abbauräumen bilden mussten. Bereiche oberhalb der Firste können nicht mehr im Nachhinein über diesen Zugang zu den untertägigen Hohlräumen erschlossen werden. Eine Möglichkeit besteht dann nur darin, über einen höher gelegenen Zugang die Marmorlagerstätte oberhalb der schon aufgefahrenen Bereiche zu erschließen.

Ansatzpunkt und Zugang zu einem Marmorvorkommen sind also Schlüssel zu einem qualitativ hohen Ausbringen an Rohblöcken. Sind die primäre Qualitätsverteilung und die Form des Marmorvorkommens bekannt, kann unter Berücksichtigung der Geomorphologie der Ansatzpunkt für eine Gewinnung festgelegt werden. Der Ansatzpunkt der Auffahrung muss unter den Gesichtspunkten des technisch Machbaren und den Aspekten der geologischen Situation ausgewählt werden.

Im folgenden Beispiel wird die Qualitätsverteilung am Beispiel der Lagerstätte von CCLL gezeigt (Abb. 100). Die Abbildung zeigt das Oberflächenrelief des Abbaubereiches mit dem Zugang zu den untertägigen

Lagerstättenbereichen. Der gesamte dargestellte Bereich besteht aus Marmor. In hellgrüner Farbe ist der aktive Abbau dargestellt. Die in rot eingezeichneten Flächen stellen die Abgrenzungen von unterschiedlichen Qualitäten des Marmors bezüglich der Verteilung von unterschiedlichen Gesteinsmustern dar.

Eine Kartierung der unterschiedlichen Muster im Marmor hat eine Unterteilung in vier Bereiche unterschiedlicher Qualität ergeben. Die Begrenzungen dieser unterschiedlichen Qualitäten lassen sich als Schichtflächen identifizieren.

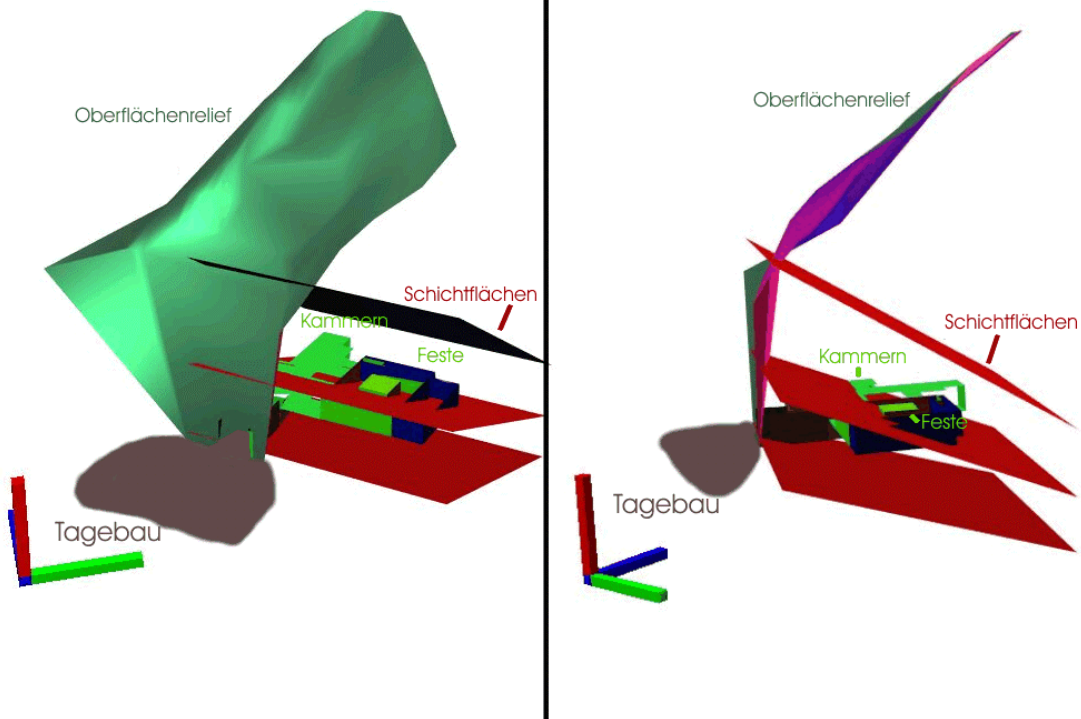


Abb. 100 Schematische 3D-Darstellung des untertägigen Versuchs-Abbaus im Steinbruch von CCLL (grüne Achse N).

Die beste Qualität des Marmors und damit die bauwürdigste Zone des Steinbruchs befindet sich zwischen den beiden unteren auskartierten Flächen. Um diesen Bereich zu erschließen, muss auch im qualitativ schlechteren hangenden Bereich ein Hohlraum aufgeföhren werden, da sonst der qualitativ hochwertigere, im liegenden Bereich anstehende Marmor nicht vollständig abgebaut werden kann. In blauer Farbe sind die möglichen Erweiterungen des untertägigen Abbaus dar-

gestellt, die sich aus der Analyse der Konstellation von Lithologie, Qualität des Marmors und der geotechnisch möglichen Erweiterung des Hohlraumes anbieten.

6.2 Störungszonen, Trennflächen und Schieferung

Nicht nur im Kontakt zu anderen lithologischen Einheiten treten Trennflächen im Marmor vermehrt auf. Während der Untersuchungen in den Steinbrüchen und der Betrachtung der Rohblockverteilung wurde bestätigt, dass auch in Störungsnähe vermehrt Trennflächen auftreten.

6.2.1 Störungszonen

Besonders deutlich wurde dies bei der Marmorlagerstätte von DMCO, wo durch eine detaillierte geologische Kartierung (Abb. 101) auch eine Störung erfasst wurde. Es handelt sich um eine Region, die von Falteninterferenzen geprägt ist. Falteninterferenzen entstehen durch Faltung quer zu älteren Faltenachsen und sind damit Hinweis auf mehrere Faltungsphasen.

Auch Untertage zeigte sich, dass mit Annäherung an diese Störungszone die Qualität der Primärblöcke drastisch zurückging. Die Primärblöcke werden im Durchschnitt kleiner und sind stärker alteriert. Gegenüber einem sonstigen Untertage-Ausbringen von 5 bis 7 Prozent konnten in diesem Bereich keine verwertbaren Rohblöcke gewonnen werden. Bei der Planung eines untertägigen Hohlraumes ist also darauf zu achten, dass der Abbau ausreichenden Abstand zu Störungszonen hält.

Durch eine strukturgeologische Kartierung von Steinbrüchen und Oberflächenaufschlüssen kann solchen Störungssystemen ausgewichen werden. In Ausnahmefällen kann es nötig sein, durch eine Störungszone hindurch abbauen zu müssen, um bessere Qualitäten zu erschließen. Dabei muss jedoch eine Kosten-Nutzen-Abschätzung durchgeführt werden. Das WBS schlussfolgert dem entsprechend:

- Störungszonen reduzieren die Rohblockgröße und sonstige Qualitätsmerkmale und sind daher bei der Abbauplanung zu meiden.

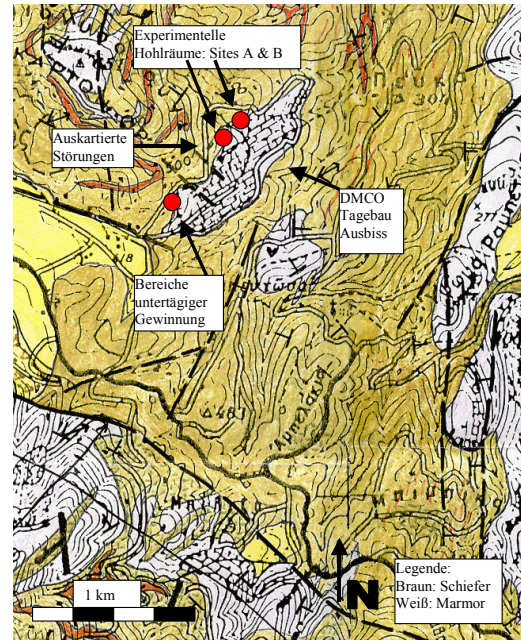


Abb. 101 Geologische Detailkarte des Steinbruchs von DMCO. Zwei Störungen sind auskartiert, die den Tagebau in zwei Bereiche unterteilen.

6.2.2 Trennflächen

Trennflächen haben hinsichtlich zweier Aspekte einen maßgeblichen Einfluss auf die Gewinnung von Marmor: Zum einen limitieren sie die Größe des Primärblockes. Zum anderen reduzieren Trennflächen die Stabilität von untertägigen Hohlräumen.

Für die Beurteilung der Trennflächenverteilung bezüglich ihrer Auswirkungen auf die Rohblockgröße ist eine detaillierte strukturgeologische Kartierung notwendig. Je größer die Fläche ist, über die eine Aufnahme der Trennflächen durchgeführt wird, desto sicherer kann auch die Vorhersage über ihren weiteren Verlauf im nicht aufgeschlossenen Bereich sein. Verwitterung und Verkarstung von Marmorvorkommen an der Oberfläche können die Messung erschweren und die Messergebnisse der Trennflächen verfälschen. Eine repräsentative Aufnahme ist in der Regel in Steinbrüchen oder in untertägigen Hohlräumen möglich. Die Möglichkeit eine Trennflächenaufnahme an Bohrkernen durchzuführen,

ist prinzipiell gegeben. Es bedarf jedoch einiger Erfahrung, um die natürlichen Trennflächen des Gesteins von den durch die bohrtechnisch bedingten zu unterscheiden. Beim Bohren können die Bohrkern aufgrund der besonders starken mechanischen Beanspruchung entsprechend ihrem geomechanischen Verhalten brechen. So sind die im Projekt verfügbaren RQD-Werte, die manche Steinbruchbetreiber in ihren Tagebauen ermittelt haben, bei einer späteren Gewinnung von Rohblöcken aus diesem untersuchten Bereich nicht bestätigt worden. Die RQD-Werte waren in der Regel ungünstiger als die tatsächlich aufgetretenen Trennflächen.

Ein erster Schritt der Auswertung erfolgt mit in einer Software zur Trennflächenanalyse. Im folgenden Bild (Abb. 102) ist die Auswertung der Trennflächen von CCLL zu sehen. Es fallen zwei Scharen (Familien) von Trennflächen auf, die nahezu in einem Winkel von 90° zueinander streichen.

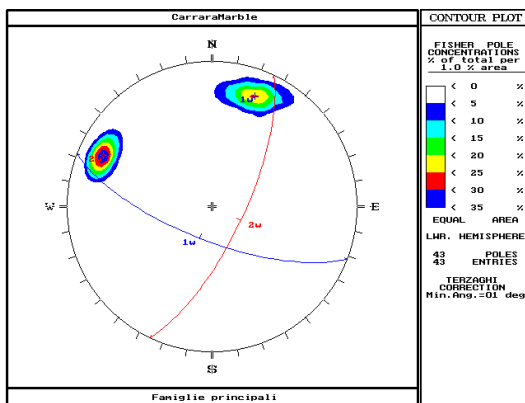


Abb. 102 Trennflächenanalyse im Bereich on CCLL mit zwei Trennflächenfamilien (Quelle CNR).

Wird der Abbau parallel zu einer der Streichrichtungen der Trennflächen orientiert, wird die zweite Trennflächenschar die Primärblöcke in einem Winkel von ca. 90° Grad begrenzen, was für die Gewinnung von orthogonalen Rohblöcken vorteilhaft ist. Das WBS stellt folgerichtig fest:

- Streichen Trennflächenfamilien im rechten Winkel zueinander, ist dies vorteilhaft

für die Gewinnung von orthogonalen Rohblöcken

Bei der vergleichenden Trennflächenanalyse der drei beteiligten Betriebe ergaben sich jeweils eine unterschiedliche Anzahl von Trennflächenfamilien. Die Spanne reichte von nur zwei Trennflächenfamilien bei CCLL bis hin zu 5 Trennflächenfamilien bei DMCO in Site A & B.

Für die Stabilität der untertägigen bergmännischen Hohlräume sind nicht nur die Zahl der Abstände der Trennflächen sowie ihr Streichen entscheidend, sondern auch das Einfallen. IANNACCHIONE (1999) hat durch Untersuchungen an Pfeilern und Festen in der untertägigen Gewinnung von Kalksteinen eine starke Korrelation zwischen den Trennflächen mit Winkeln von $45^\circ + \phi_d/2$ (ϕ = innerer Reibungswinkels des Gesteins) innerhalb einer Feste und der Verringerung deren Standfestigkeit nachgewiesen. Bei den untersuchten Marmoren im Projekt CAD-PUMA wurde ein durchschnittlicher innerer Reibungswinkel von 36° bis 42° gemessen. Daraus lässt sich ableiten, dass eine Feste, die von einer Trennfläche mit einem Winkel von etwa 64° Einfallen durchtrennt wird, besonders instabil ist (Abb 103). Bei der Auffahrung eines Hohlraumes sollte diesem Umstand Rechnung getragen werden und solche Konstellationen sollten vermieden werden.

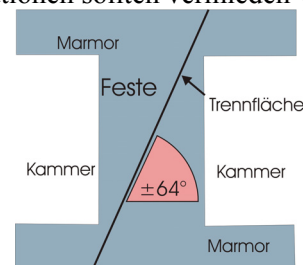


Abb. 103 Kritischer Winkel von Trennflächen in Marmorfesten.

Das WBS weist bei der Eingabe der Einfallswinkel der Trennflächenfamilien auf diese Problematik hin, wenn die Einfallswinkel in einem Toleranzbereich von $64^\circ \pm 5^\circ$ liegen.

- Kritisch sind Trennflächen die mit einem Einfallen von $\pm 64^\circ$ eine Feste durchtrennen.

Bei allen am CAD-PUMA Projekt beteiligten Industriepartnern wurde von einem erfolgreichen Steinbruch auf Marmor der untertägige Hohlraum aufgefahren. Die Informationen über den Marmor untertage hat man aus den Informationen aus der übertägigen Gewinnung bezogen.



Abb. 104 Durch Entspannung entstandene oberflächennahe Trennflächen im Zugangsbereich von DMCO.

Bei DMCO am Penteli sind frische Trennflächen im Bereich des Mundlochs, des Zugangs zur Abbaukammer, gut aufgeschlossen (Abb. 104).

Diese Trennflächen entstehen während der Marmorgewinnung durch Druckentlastung. Das durchschnittliche Einfallen dieser Trennflächen ist oberflächenparallel mit einem Winkel ca. 45 Grad. Durch die Druckentlastung bei der Gewinnung ist das Gestein bestrebt, sich senkrecht zur freien Oberfläche

auszudehnen. Die Entspannung führt in homogenen Bereichen, auch ohne tektonisch angelegte Trennflächen in diesem Winkel, zum Bruch. In Abbildung 105 wird dieser Vorgang illustriert. Die Hauptspannung Sigma 1 (s_1) und Sigma 3 (s_3) sind im Spannungselipsoid dargestellt. Zum Hang hin nimmt Sigma 1 im Verhältnis zu und Sigma 3 nimmt dazu verhältnismäßig ab.

Hierdurch entstehen oberflächenparallele Trennflächen, die neue Primärblöcke im Hangbereich reduzieren. Diese Trennflächen-Neubildungen im Hang und in den Oberflächenbereichen von Steinbrüchen sind für die Gewinnung von Rohblöcken andererseits aber auch wirtschaftlich nützlich, weil die Kosten für das aufwendige Herauslösen der Blöcke reduziert werden. Jedoch entstehen durch die notwendigen zusätzlichen Sicherungsmaßnahmen in diesen Hangbereichen beim Durchhörern höhere Kosten. In solchen Bereichen des durch die jungen Trennflächen relativ instabilen Hangbereiches muss in jedem Fall der Zugang zu den untertägigen Hohlräumen aufgefahren werden. Die Möglichkeit, dass sich Keile aus dem Festgesteinsverband lösen können, ist hier recht groß. Bereits durch eine grobe Erfassung des Trennflächengefüges kann man Rohblöcke, die sich lösen können, erkennen. Verläuft das in das WBS eingegebene Streichen von Trennflächenfamilien in etwa parallel zum Hang, dann weist das System auf diese potenzielle Gefahr hin. Eine eingehende Untersuchung der Trennflächen sollte dann durchgeführt werden. *RESOBLOK* bietet hierzu die Möglichkeit einer sehr detaillierten Betrachtung der Trennflächen (BAROUHDI, 1990).

Ist der ursprüngliche Tagebau größer dimensioniert, ist eine vergleichende Analyse des Hangneigungswinkels und der Trennflächen in unterschiedlichen Bereichen des Vorkommens zu empfehlen (KHALOKAKAI, 2000).

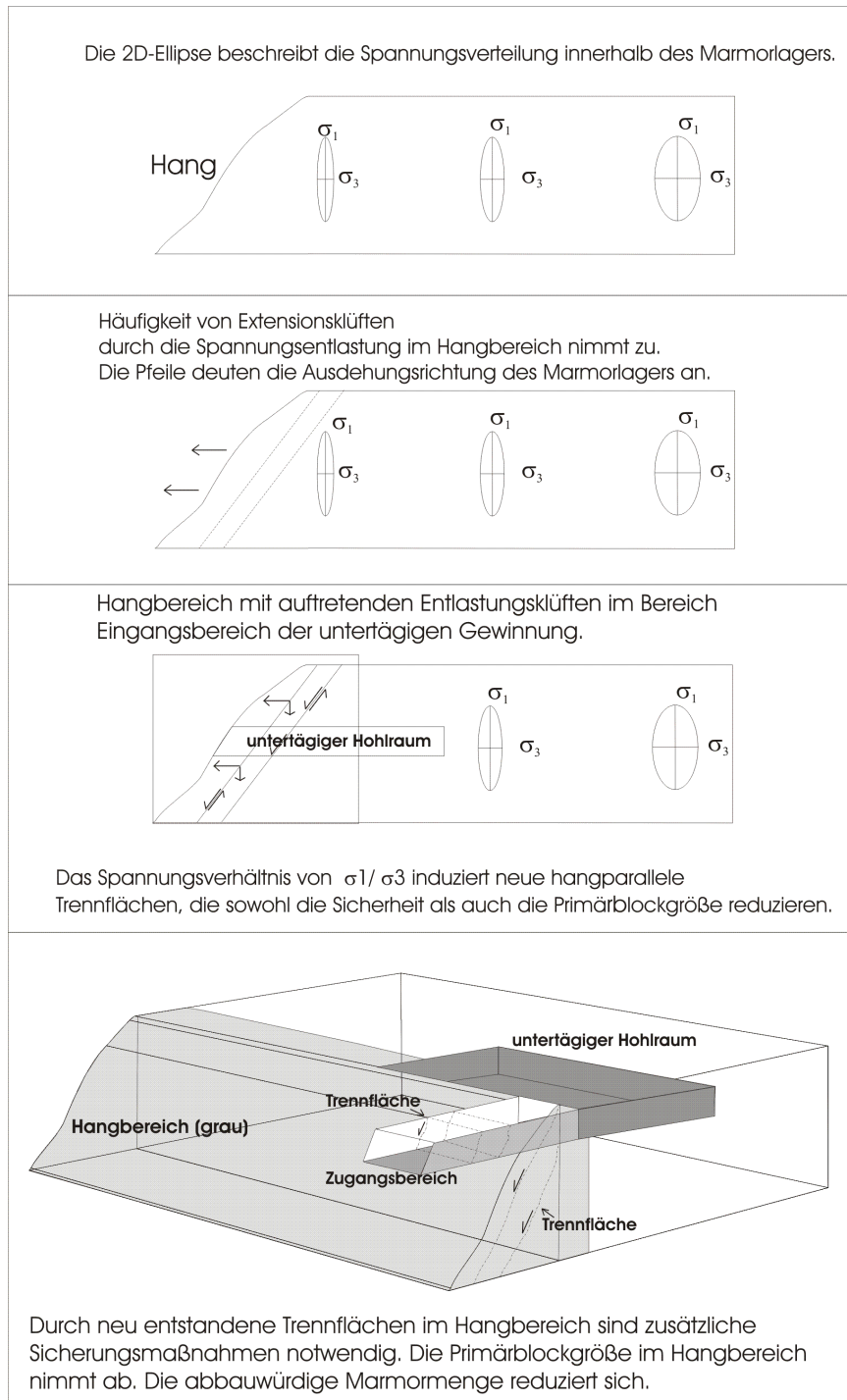


Abb. 105 Trennflächenentstehung im Randbereich eines Steinbruches und die Auswirkungen auf einen untertägigen Hohlraum.

Schon bei der Anlage des Steinbruches muss ein besonderes Augenmerk auf die Hangneigung gerichtet werden. Ist die räumliche Konstellation der Trennflächen ungünstig, kann es zum Herauslösen und zu Rutschun-

gen von Blöcken kommen. Stehen nur kleine Primärblockgrößen in Hang an, so erhöht sich das Risiko einer Rutschung. Schließlich sind aber auch die Ausbildung der Trennflächen bezüglich ihrer Öffnungsweite und ihrer Fül-

lungen, aber auch die sich daraus ergebende Wasserwegsamkeit zu berücksichtigen (HOEK & BRAY, 1981; KHALOKAKAIE et al., 2000). Das WBS weist auf die potenzielle Gefahr von Hangrutschungen aufgrund der räumlichen Lage der Trennflächen hin:

- ▶ Der aufzufahrende Hohlraum sollte genügend Abstand zu Hangflächen des Vorkommens aufweisen.
- ▶ Die Trennflächen im Zugangsbereich eines untertägigen Hohlraumes sollten besonders beachtet werden. Mögliche Rutschungen müssen erkannt und gegebenenfalls durch Auskartierung untersucht und durch geeignete Sicherungsmaßnahmen vermieden werden.

6.2.3 Schieferung

Bei den Untersuchungen in den Steinbrüchen fiel auf, dass die Schieferung für die Abbauplanung weitestgehend unberücksichtigt blieb. Bei der Gewinnung von Rohblöcken ist es durchaus nützlich, die Blöcke orientiert nach der Schieferung zu gewinnen. Eine Orientierung parallel zur Schieferung ist bei der Blockformatierung besonders günstig. Der Energieaufwand ist beim Lösen parallel zur Schieferungsfläche geringer.

Die Schieferung im Marmor verläuft in der Regel im spitzen bis stumpfen Winkel zur Schichtung. Die Teilbarkeit des Gesteins ist parallel zu den Schieferungsflächen in der Regel sehr gut. Die Steinbruchbetreiber haben aber bisher die Gewinnung und Verarbeitung der Rohblöcke häufig ohne Berücksichtigung der Schieferung durchgeführt (Abb. 106).

Die Schieferung ist auch unter Stabilitäts Gesichtspunkten ein zu berücksichtigender Faktor. Beim Auffahren der Hohlräume war besonders bei DMCO zu beobachten, dass sich das entspannende Gestein parallel der Schieferung aufspaltete. Marmorbruchstücke aus der Firste zeigten zumeist eine Bruchfläche parallel der Schieferung. Die Schieferungsflächen sind im Marmor durchdringend

(penetrativ) bis auf die Korngrenze und stellen so Sollbruchstellen dar. Das WBS verweist deshalb mit Nachdruck auf die Berücksichtigung der Schieferung:

- ▶ Die Aufnahme der Schieferungsrichtung und deren Einfallen sollte in jedem Fall erfolgen und in Entscheidungen über die Prozesse der Weiterverarbeitung einfließen.



Abb. 106 Formatieren eines Rohblockes untertage mit einem hydraulischen Bohrhammer.

6.3 Verkarstung

Ein Störungssystem kann neben der Dezimierung der Primärblockgrößen auch zur verstärkten Verkarstung des Marmorvorkommens führen. Ist die Trennflächendichte durch die strukturellen Einflussgrößen, wie Störungen und starke Verfaltung, auf das Marmorlager hoch, kann die Kalklösung im Untergrund besser angreifen und schneller ablaufen.

Eine erhöhte Trennflächendichte verringert den RMR bzw. den Q-Faktor. Die Verkarstung setzt zudem die Reibungskraft auf den

Trennflächen durch Einlagerung von tonigen Komponenten entweder von der Oberfläche oder durch Verwitterung von silikatischen und karbonatischen Komponenten in den hangenden Schichten herab. Die Kalklösung und Verkarstung durch CO_2 -reiche Grundwässer bzw. Niederschlag beginnt erst auf Klüften und Trennflächen und setzt sich dann zunehmend organisiert durch größere Hohlräume fort. Die transportierten Wassermengen nehmen zu und damit erhöht sich wiederum die Geschwindigkeit der Verkarstung. Der so angelegte Kluftwasserleiter im Gestein korrespondiert schneller mit den niederschlagsbedingt anfallenden Wassermengen. Durch den größeren Wassertransport werden wiederum größere Mengen an Sedimenten in das System eingetragen. Hohlraumneubildung und -verbrauch durch Verkarstung kann die Neubildung von Trennflächen hervorrufen. Abb. 107 zeigt den Ablauf und Einfluss von regionalem Störungssystemen und gleichzeitig angreifender Verkarstung.

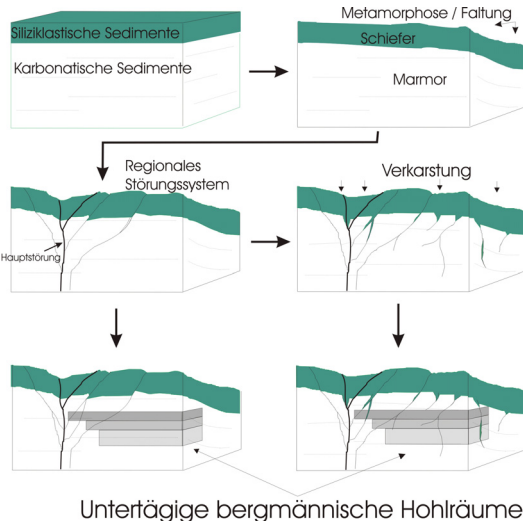


Abb. 107 Auswirkung von Störungssystemen und Verkarstung auf die Dimensionierung untertägiger Hohlräume.

Während an der Oberfläche die Verkarstung flächenhaft das gesamte Marmorlager erfasst, sind die Einflüsse der Verkarstung zu Teufe hin mehr auf die vorhandenen Trennflächen und den daran angrenzenden Marmor be-

schränkt. Ob aber die Einflüsse der Verkarstung im untersuchten Marmorvorkommen in größeren Tiefen weniger werden oder gar nicht mehr vorhanden sind, können nur Bohrungen belegen. Problematisch bei der Verkarstung in Zusammenhang mit dem Anlegen von bergmännischen Hohlräumen ist das mögliche Anfahren großer Höhlensysteme, welche die gebirgsmechanischen Eigenschaften und die Primärblockgrößen drastisch verändern (Abb. 108).

Weiterführende regionalgeologische Informationen oder Informationen aus z.B. Tunnelbauprojekten über die Verkarstungsintensität kann hilfreich bei der Einschätzung des geomechanischen Zustandes des Marmorvorkommens sein (DRYSDALE, 2001, TUGRUL, 1998).

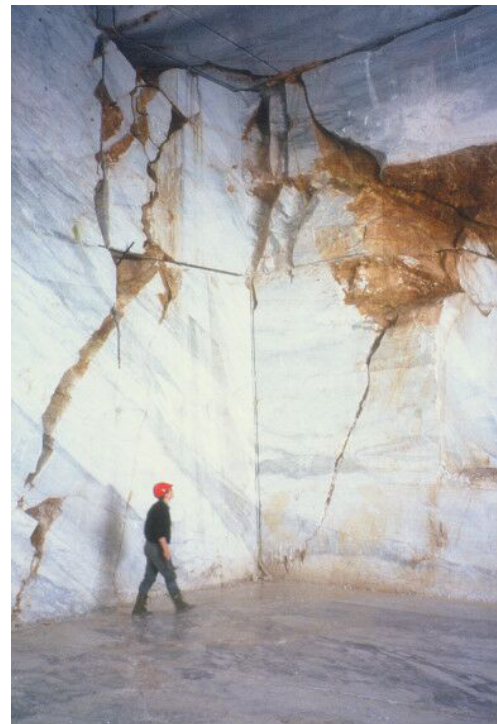


Abb. 108 Abbaukammern mit verkarsteten Trennflächen und Karsthöhlen im untertägigen Abbau von CCLL.

Problematisch ist in einem verkarsteten Vorkommen, das abgebaut werden soll, die Verbindung mit einem Karst-Grundwasserleiter. Abfallstoffe, wie Öle und Fette an den Ma-

schinen und in Spülungen können leicht über die offenen Trennflächen in Grundwasserleiter eintreten. Folgen der Natursteingewinnung im Karst sind von LANGER (2001) in einer Literaturübersicht systematisch erfasst worden.

Die erhöhte Wasserwegsamkeit in verkarsteten Marmorvorkommen führt auch zu gewinnungstechnischen Problemen. Der Wasserverbrauch beim Sägen ist hier wesentlich höher. Beim Sägen verkannten die Primärblöcke leichter.

Schlussfolgerungen für das WBS sind:

- ▶ Verkarstung ist generell qualitätsmindernd und reduziert die Stabilität des Gebirges.
- ▶ Eine erhöhte Gefahr der Umweltbeeinflussung durch Grundwasserkontaminationen ist gegeben.
- ▶ Verkarstete Marmorvorkommen verursachen höhere Gewinnungskosten.

6.4 Planung und Einrichtung der „experimental mines“

Für die beteiligten industriellen Partner waren unterschiedliche Anforderungen zum Auffahren der „experimental mines“ zu erfüllen.

6.4.1 DMCO

Für DMCO waren die Lagerungsverhältnisse im aufgeschlossenen Steinbruch ausschlaggebend für die Auffahrung der experimentellen Abbaukammern. Der Schichtkontakt zwischen Marmor und Schiefer, der in mehreren Bohrungen untersucht wurde, diente als obere Begrenzung der Abbaukammern. Im Falle von Site B stellte sich während der Projektlaufzeit heraus, dass der Abstand zum hangenden Schiefer für eine Erweiterung der Hohlräume zu gering war (Abb. 99c). Die aufzufahrenden Abbaukammern sollten in

ihrer Höhe auf den ersten 24 Meter mächtigen Marmorhorizont beschränkt sein. Die geplante unterste Sohle wurde im Zeitrahmen des Projektes nicht erreicht. Aus sicherheitstechnischen Gründen musste ein zweiter Zugang zu der Abbaukammer Site A aufgeföhren werden. Im Laufe des Projektes wurden Site A und B soweit erweitert, dass beide Abbaukammern miteinander über einen Stollen verbunden waren.

6.4.2 LASA

Die untertägigen Abbaukammern des Weißwasserbruches erstrecken sich über mehrere 100 Meter (Abb. 109). Der experimentelle Hohlraum musste von den existierenden Gruben aus erschlossen werden. Die Möglichkeiten, einen untertägigen Bereich mit den nötigen Abmessungen zu erschließen, waren begrenzt. Die experimentelle Abbaukammer musste mit zwei Zugängen erreichbar sein und in das existierende Grubenlayout eingepplant werden. In der vertikalen Ausdehnung sind im Weißwasserbruch zwei 10 Meter mächtige Marmorhorizonte abbauwürdig (Kap. 3.3.4). Die Planung der experimentellen Abbaukammern richtete sich in der horizontalen Ausdehnung zum einen nach dem existierenden Grubenlayout und zum andern in der vertikalen Ausdehnung nach der Mächtigkeit des abbauwürdigen Marmorhorizontes. Die Häufigkeitsverteilung von Trennflächen entschied im Verlauf der Abbautätigkeiten über die möglichen Erweiterungen des Hohlraumes. Der Steinbruchbetreiber konnte, basierend auf seinen Erfahrungen mit der Trennflächendichte, in einigen Bereichen den Hohlraum um die Feste nicht wie ursprünglich gefordert erweitern.

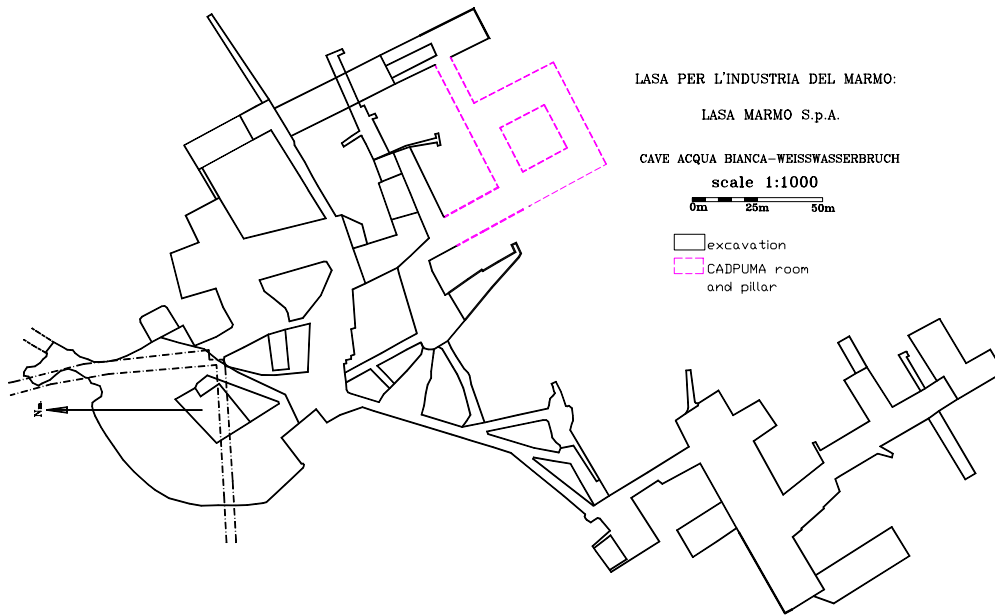


Abb. 109 Grubenriss des Weißwasserbruches mit der experimentellen Abbaukammer (mod. Grubenriss von LASA Marmo S.p.A.).

6.4.3 CCLL

Eine detaillierte Kartierung des Marmorvorkommens von CCLL war Grundlage für die Planung und Aufführung der experimentellen Abbaukammern (siehe auch Kap. 6.1). Die Umfahrung einer Feste wurde dabei ebenfalls in die Planung einbezogen. Der Versuch, einen größtmöglichen Teil des qualitativ hochwertigen Marmors im Abbauplan zu erfassen, setzte voraus, einen Bereich mit minderer Qualität in die Gewinnung mit einzubeziehen. Die Kenntnis über den Verlauf der Qualitätsverteilung des Marmors war Entscheidungskriterium für das Auffahren des Hohlraumes mit der Testfeste. Der Steinbruchbetreiber ist im Gegensatz zu den anderen Industriepartnern auf große Rohblöcke guter Qualität angewiesen, da er selber keine weiterverarbeitenden Betriebe unterhält. Die Abbauplanung sieht deshalb vor, nach Auffahren der ersten Sohle möglichst zügig Rohblöcke zu gewinnen. Nach Auffahren der ersten Sohle wird ein Radlader und eine Schrämmaschine auf der oberen Sohle I be-

lassen und anschließend sofort eine tiefere Sohle II im qualitativ hochwertigeren Marmor abgebaut (Abb.110). Diese Abbaureihenfolge setzt zusätzliches Equipment voraus, um an mehreren Stellen gleichzeitig Rohblöcke zu gewinnen.

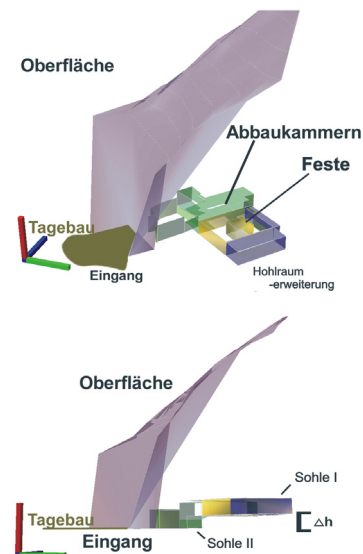


Abb. 110 Abbaukammern von CCLL. Die Höhendifferenz zwischen Sohle I und II (Δh) beträgt ca. 6 Meter.

7 Quantitative Beiträge zur Planung der untertägigen Hohlräume

7.1 Numerische Simulation der Primär- und Rohblockverteilung bzw. -größe

Die räumliche Verteilung der Primärblöcke und damit der möglichen gewinnbaren Rohblöcke ist ein Qualitätsmerkmal der untersuchten Lagerstätten. Die numerische Simulation der Primär- und Rohblockverteilungen, -form und der -größen, vorgestellt in diesem Kapitel, soll der Optimierung von Lage und Geometrie eines möglichen untertägigen Hohlraumes dienen. Sind genügend Informationen über die Verteilung und Größe der Primärblöcke in einem geplanten Abbau durch die Aufnahme der Trennflächen in den benachbarten Oberflächenbereichen und einer auf dieser Basis möglichen Simulation und Extrapolationen bekannt, kann ein zukünftiger Hohlraum diesen Bedingungen entsprechend aufgeföhren werden.

Die numerische Simulation der Primärblockverteilung basiert also auf der Aufnahme und Auswertung gemessener Trennflächen.

Die Raumlage der Trennflächen, das Streichen, Einfallen und die Trennflächenabstände werden erfaßt und mit statistischen Methoden Kluftfamilien bzw. Trennflächenscharen und die Trennflächendichte ermittelt.

7.1.1 Methoden der Abschätzung von Rohblockgrößen

Alle hier vorgestellten Methoden dienen der Abschätzung der Primärblockgrößen nach einfachen Algorithmen. Für eine erste Einschätzung sind sie durchaus ausreichend, für eine weitergehende intensive Beurteilung und Planung eines untertägigen Hohlraumes jedoch ungenügend.

Die ermittelte durchschnittliche Primärblockgröße gibt erste Anhaltspunkte über die zu erwartende Qualität eines Marmorvorkommens bezüglich des Ausbringens verwertbaren Materials. Es existieren verschiedene

Methoden zur Ermittlung der durchschnittlichen Primärblockgrößenverteilung.

Unter sehr guten Aufschlussverhältnissen lassen sich die Blockgrößen direkt ausmessen. Oft sind aber Extrapolations- und Berechnungsmethoden nötig, die unterschiedliche Ergebnisse liefern.

Die Basisdaten für die aufgeführten Methoden basieren immer auf Beobachtungen und Messungen am aufgeschlossenen Gesteinskörper, die sowohl von der Beurteilungsfähigkeit des Anwenders als auch von den Möglichkeiten der Erfassung der Trennflächen beschränkt sind. Methoden, basierend auf geophysikalischen Messungen, die eine genaue Bestimmung des in-situ-Trennflächengefüges möglich machen, und damit eine genaue Darstellung des Primärblockgefüges geben, sind derzeit noch nicht in befriedigendem Maße möglich.

PALMSTRÖM (2000) schlägt einen Block-Volumenparameter (V_b) vor, der aus der Messung der Trennflächenabstände und der Winkel zwischen den Trennflächen ermittelt wird. Diese Daten sind im Aufschluss eines Marmorlagers mit einfachen Mitteln zu erheben.

$$V_b = S_1 \times S_2 \times S_3 \times (\sin \alpha \times \sin \beta \times \sin \gamma),$$
 mit S_1 , S_2 , S_3 als mittlere Trennflächenabstände für jede Familie und α , β und γ den Winkeln zwischen den Trennflächenfamilien. Aufgrund der großen Ungenauigkeit dieser Methode wird eine Beurteilung im WBS jedoch nicht vorgenommen.

Auf Untersuchungen an den Kernen einer Bohrung basiert der RQD-Index (*Rock Quality Designation Index*) (siehe auch Kap. 5.1.2.6), erstmals von DEERE et al. (1967 in DEERE & DEERE 1988) entwickelt. Er stellt die prozentualen intakten Bohrkernstücke länger als 10 cm bezogen auf die Gesamtlänge des Bohrkerns dar. Der RQD gibt einen qualitativen Eindruck von der Intensität der Zerklüftung. Er kann bedingt zur Abschätzung der Rohblockgröße herangezogen werden. Abhängig vom Verlauf der Trennflächen

zur Bohrungsrichtung kann es jedoch zu unterschiedlichen Ergebnissen kommen (siehe Abb. 111). Der RQD-Wert ist für eine Beurteilung hinsichtlich der Primärblockgröße eines Naturwerksteinvorkommens daher nur bedingt anwendbar. Das WBS bewertet RQD Werte kleiner 6 als schlecht und Werte größer 12 als sehr gut.

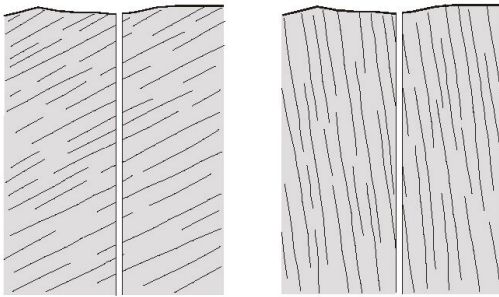


Abb. 111 Der Winkel zwischen Bohrung und Trennflächen beeinflusst den RQD-Wert (PALMSTRÖM, 1995).

Basierend auf dem RQD-Index hat SINGEWALD (1992) eine Methode entwickelt, aus der Aufnahme von Trennflächen eine durchschnittliche Blockgröße zu ermitteln (vgl. 5.1.2.7). SINGEWALD verwendet in seinen Arbeiten den Begriff „Block“ für die durch das natürliche Trennflächengefüge in-situ vorgegebenen Primärblocke. In der vorliegenden Arbeit wird der in-situ Block als Primärblock bezeichnet, der formatierte und gewonnene Block ist der Rohblock. Die Trennflächenabstände werden in allen drei Raumlagen, Richtung x, y und z ermittelt. Entlang eines Profils durch den Steinbruch werden Trennflächenabstände größer 0,1 m gemessen. Es wird ein mittlerer Trennflächenabstand ermittelt, der aus den Faktoren x, y und z dann den Durchschnittsblock ergibt. Im Gegensatz zum RQD berücksichtigt die Methode nach SINGEWALD alle Raumvektoren.

Basierend auf der SINGEWALD Methode haben WEBER et al. (2001) ein praxisorientiertes Verfahren vorgestellt, mit dem die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Naturstein-

lagerstätten über die Bestimmung des Primärblockvolumen mithilfe der SINGEWALD-Methode möglich ist. Dieses Verfahren eignet sich für Natursteinvorkommen mit vorwiegend orthogonalem Trennflächensystem. Die Parameter für die Ermittlung der durchschnittlichen Primärblockvolumen basieren auf den ermittelten durchschnittlichen Trennflächenabständen. Bei der Methode wird für die Vorhersage von nutzbaren Primärblocken davon ausgegangen, dass Blockkantenlängen kleiner 0,4 m nicht verwendet werden können, da diese sich aufgrund mangelnder Kippsicherheit nicht in Gattersägen weiterverarbeiten lassen. SINGEWALD setzt ein Rohblock- (Primärblock) Mindestvolumen von 0,5 m³ voraus. Die Dimension eines Rohblocks muss nach SINGEWALD eine Mindest-Länge von 1 m, Mindest-Breite von 1 m und eine Mindest-Dicke von 0,4 m erreichen. Das Rohblockmindestvolumen nach SINGEWALD ergibt sich danach als:

$$\geq 0,4m \cdot \geq 1m \cdot \geq 1m \xrightarrow{\text{lim}} 0,5m^3$$

Entscheidend für die Genauigkeit der Ergebnisse dieser Methode sind die Aufschlussverhältnisse und die sich daraus ergebenden Aufnahmeprofile. Ein dichtes Netz an Profilen, gleichmäßig über ein Vorkommen verteilt, bietet die sichersten Resultate.

Für die drei Steinbrüche wurde mithilfe der SINGEWALD-Methode ein durchschnittliches Primärblockvolumen errechnet. Die Profile zur Ermittlung der durchschnittlichen Trennflächenweiten sind im Aufschlussbereich der untertägigen Auffahrungen aufgenommen worden. Die Trennflächen wurden dabei von den Steinbruchbetreibern in digitalen Karten protokolliert.

Basierend auf diesen Aufnahmen wurden folgende Rohblockvolumina nach SINGEWALD bestimmt: Die durchschnittliche Rohblockgröße ermittelt für LASA beträgt demnach knapp 2 m³, bei DMCO 25 m³ und bei

Primärblockgröße der untersuchten Steinbrüche nach der Singewald Methode

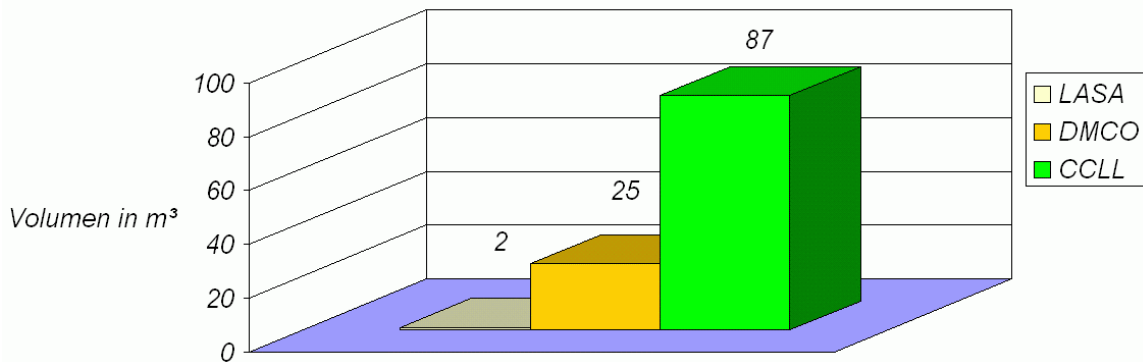


Abb. 112 Primärblockgröße ermittelt nach der SINGEWALD Methode.

CCLL fast 90 m³ (Abb. 112). Diese Daten korrelieren jedoch nicht sehr gut mit den in der numerischen *RESOBLOK*-Analyse festgestellten Blockgrößen (siehe Tab. 12). Es lässt sich nur feststellen, dass beide Methoden für LASA die kleinste, DMCO die mittlere und für CCLL die größte Primärblockgröße ermitteln.

Diese Diskrepanz ist zum einen auf den betrachteten, nur begrenzt aufgeschlossenen untertägigen Teilbereich der Abbaukammern zurückzuführen, der für Ermittlung der Primärblockgrößen mit der Methode nach SINGEWALD genutzt wurde. Zum anderen ist die Aufnahme der Trennflächen und die Digitalisierung durch die Steinbruchbetreiber in unterschiedlicher Qualität durchgeführt worden (Abb. 113).

Die in der Trennflächenanalyse für die numerische Modellierung mit *RESOBLOK* verwendeten Daten wurde aus einem größerem Teilbereich der Gruben ermittelt. Es gingen für die Analyse der Trennflächen mithilfe von *RESOBLOK* alle aufgeschlossenen und messbaren Trennflächen in eine statistische Auswertung mit ein. In einigen Fällen konnte die Raumlage der an der Firste aufgeschlossenen Trennflächen nicht ermittelt werden.

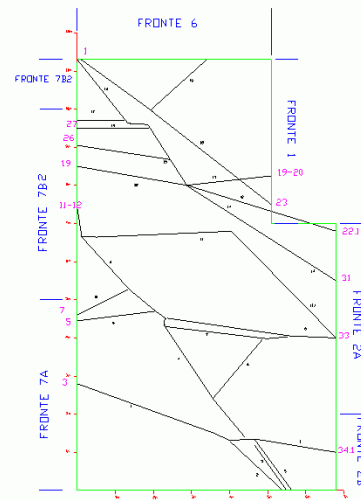


Abb. 113 Beispiel einer für die Ermittlung der mittleren Primärblockgröße nach der SINGEWALD-Methode verwendeten Teilaufnahme der Firste in LASA.

Die Primärblockgrößen der untersuchten Steinbrüche unterscheiden sich aus folgenden Gründen so stark. Zum einen ist das initiale Trennflächengefüge in den drei verschiedenartigen geologischen Situationen unterschiedlich, zum anderen ist die unterschiedliche Teufenlage der drei Lagerstätten maßgebend, da es durch die oberflächennahe Entspannung zur Öffnung zusätzlicher Trennflächen kommen kann.

Des weiteren sind sämtliche Trennflächen während der Auffahrung der untertägigen Hohlräume in Bereichen gemessen worden, in denen sich abbautechnisch Entspannungsklüfte neu bilden können. Die für die SINGE-WALD-Methode verwendeten Messwerte sind daher nicht als ungestörte in-situ-Messwerte der Trennflächenparameter der Lagerstätten zu betrachten. Es ist generell davon auszugehen, dass die mittleren in-situ-Primärblockgrößen vor der Gewinnung immer größer sind als die tatsächlich gewinnbaren Primärblöcke (HADJIGEORGIOU et al., 1998).

7.1.2 Primär- und Rohblockanalyse - Berechnungen mit *RESOBLOK* und *Surpac2000*

Mithilfe der in dieser Arbeit verwendeten und neu entwickelten Tools und Schnittstellen soll eine möglichst präzise Bestimmung der in-situ-Primär- und Rohblock-Verteilung sichergestellt werden.

Dazu wurde eine Schnittstelle von *RESOBLOK* (vgl. Kap. 4.4.2.1), dem Trennflächen- und Blockgenerator unter Linux, zu *Surpac2000* (vgl. Kap. 4.4.1.6) unter Windows entwickelt, die es zusätzlich ermöglicht, Attribute der in der Simulation erzeugten in-situ-Blöcke zu filtern (vgl. Abb. 38). Die Möglichkeiten der Rohblockanalyse unter *RESOBLOK* sind zwar umfangreich, für die Fragestellung jedoch nicht ausreichend.

In *RESOBLOK* können keine statistischen Methoden zur Bestimmung einer richtungsabhängigen Trennflächen- und Blockverteilung angewendet werden. Mithilfe der neu entwickelten Schnittstelle in *RESOBLOK* und einer Filterung der Daten in *Elements Environment*, z. B. nach dem Volumen der Primärblöcke, konnten die aufgearbeiteten Daten in *Surpac2000* dargestellt werden.

Das tatsächliche Trennflächengefüge musste für die Darstellung in einem mathematischen Modell in *RESOBLOK* vereinfacht werden. Das reale Trennflächensystem einer Marmor-

lagerstätte oder auch anderer Natursteinvorkommen lässt sich nicht immer detailgetreu in einem Modell abbilden. Schwierig ist es, gebogene Trennflächen zu beschreiben. Deshalb wird bei der Aufnahme das Trennflächensystem vereinfacht. Trennflächen werden schon bei der Aufnahme zusammengefasst, wenn sie einer bestimmten Trennflächenfamilie zugeordnet werden konnten. Abbildung 114 zeigt das Prinzip der Aufnahme.

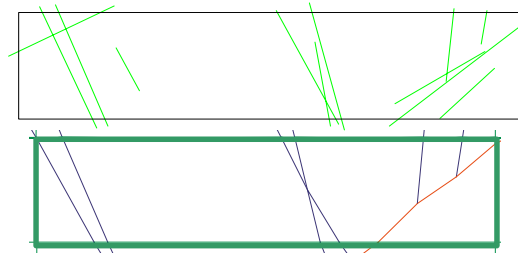


Abb. 114 Oben: Trennflächen-Aufnahme im Aufschluss. Unten: In *RESOBLOK* erfasstes und dargestelltes Trennflächenmodell.

Die bei der Analyse der Trennflächen erfassten Daten werden für *RESOBLOK* statistisch aufbereitet. Dazu werden die Trennflächen in einem Kluftstatistikprogramm (*DIPS*⁸) aufgearbeitet. Die Ergebnisse werden in den Konfigurationsdateien für *RESOBLOK* dann weiter verarbeitet.

Zunächst wird in *RESOBLOK* der darzustellende Bereich definiert. Tabelle 10 zeigt das Beispiel einer Konfigurationsdatei für *RESOBLOK*. Dieser Bereich sollte nicht größer gewählt sein als der Ausschnitt, über den Basisinformationen des Trennflächengefüges existieren. In den vorgestellten Beispielen wurden die Bereiche so gewählt, dass in der Regel 60 x 4 x 21 Meter große Hohlräume betrachtet wurden (*zone of interest* [ZOI]). Die Orientierung dieses Bereiches wird definiert durch ein Einfallen (*Dip*) und eine Richtung (Azimut) (*FO*). Eine weitere Variable (*SO*) kann ein Verkippen oder eine Schräglage des Hohlraumes innerhalb des darzustellenden Bereiches beschreiben. Diese Funkti-

⁸ <http://www.rocsience.com/products/Dips.asp>

on wird aber in den gezeigten Beispielen nicht verwendet. Die Beschreibung der Trennflächenfamilien beginnt im Abschnitt *sequence*, ergänzt um ein Farbattribut für die graphische Darstellung.

Tabelle 10: Beispiel einer Konfigurationsdatei für *RESOBLOK*

```

zone_of_interest
(
  X = -20, 40;
  Y = -20, 20;
  Z = -6, 15;
  FO = {0, 36};
)
sequence bleu_RED
(
  pole = 1 : {69, 210} (800);
  ignor_spacing = 1 : 12 (2);
  extent = block ;
)
sequence vert_MAGENTA
(
  pole = 1 : {83, 150} (6000);
  ignor_spacing = 1 : 16 (2);
  extent = block ;
)
sequence rouge_BLUE
(
  pole = 1 : {61, 149} (600);
  ignor_spacing = 1 : 16 (2);
  extent = set ;
)
sequence jaune_YELLOW
(
  pole = 1 : {41, 90} (800);
  ignor_spacing = 1 : 16 (2);
  extent = block ;
)

```

Die zu beschreibenden Trennflächen werden als *[extent =] Set* (Trennfläche) oder als *Block* (eingeschlossener Block) definiert. Beide Variablen benötigen eine Richtungsangabe, die in einem Flächenpol (*pole*) und einem Kluftflächenabstand {Persistence, hinter dem Wert für *pole*} beschrieben wird. Die Kluftflächenabstände werden um ein Verhältnismaß (*ignor_spacing*) ergänzt, das die Ausdehnung der Trennfläche, bzw. des Blockes beschreibt. Die Trennflächenfamilien können als *extent = set* oder als *block* definiert sein, wodurch die räumliche Konfiguration als durchhaltende Trennfläche (*set*) oder als begrenzendes einschließendes Element (*block*) beschrieben wird.

Das Ergebnis der Analyse stellt der Blockgenerator von *RESOBLOK* in einem Blockmuster dar, das Blöcke mithilfe von Polygonen beschreibt. Die Blöcke können alle oder einzeln dargestellt werden (Abb. 115 a). Die unterschiedlichen Farben in der Darstellung aller Blöcke dient ausschließlich der visuellen Differenzierung und zeigt keinerlei Abhängigkeiten der Blöcke (Abb. 115 b).

Das in Abb. 115 a & 115 b dargestellte Beispiel zeigt eine *RESOBLOK*-Simulation des Kluftmusters, das bei DMCO Site A erfasst wurde. Es basiert auf dem Quelltext aus Tabelle 10. Der dargestellte Körper (ZOI) hat eine Kantenlänge von 60 m in x-, 40 m in y- und 21 m in z-Richtung.

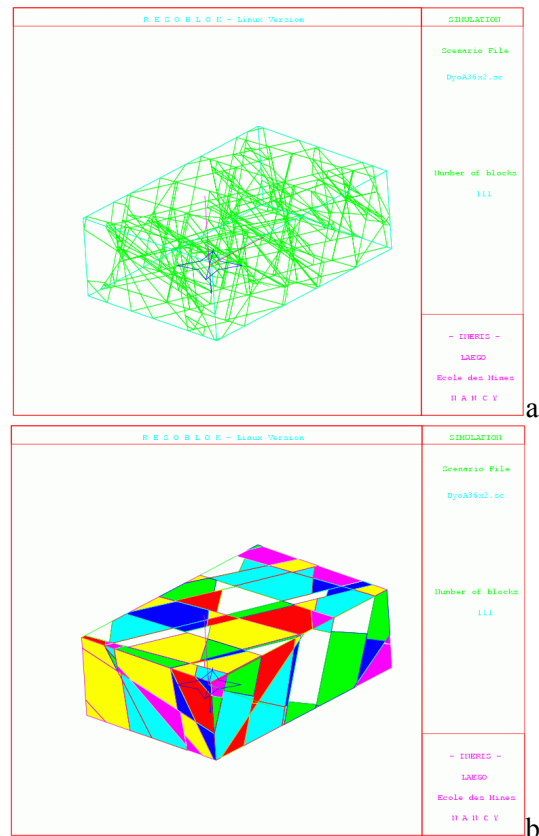


Abb. 115a und b *RESOBLOK* Modell DMCO Site A. Blockmodell nach Richtung 36° N gedreht.

Um die durch eine mögliche Schnittfolge entstehenden Rohblöcke darzustellen, werden

in die *RESOBLOK*-Simulationen künstliche Hohlräume mit virtuellen Schnittflächen eingefügt. Dadurch werden die Volumina der betrachteten Primärblöcke reduziert. Die durch die künstlichen Hohlräume und Schnittflächen modellierten Blöcke der Simulation zeigen dann in dem geschnittenen Bereich die zu gewinnende Rohblöcke und die veränderten Primärblöcke in einer ZOI. Aus *RESOBLOK* werden die Blockdaten mit einem Wert des gravimetrischen Schwerpunktes jedes Blockes und dem ermittelten Blockvolumen exportiert (vgl. Beispiel in Tabelle A3 im Anhang). Die in *RESOBLOK* generierten Primär- und Rohblockdaten wurden durch *Elements Environment* nach Volumen gefiltert (vgl. Abb. 38).

Eine einfache und aufschlussreiche Betrachtungsweise bietet die Möglichkeit, nach Blöcken zu filtern, die von geringem gewinnungstechnischem Interesse sind. In Abbildung 116 und 117 sind Volumina von Primärblöcke $\leq 50\text{m}^3$ dargestellt. Es ist hier in den folgenden Modellierungen von einem Volumen von 50m^3 für Primärblöcke ausgegangen worden, weil nach den Erfahrungen nur bei Primärblöcken größer 50m^3 , Rohblöcke mit optimalen Abmessungen relativ unbeeinflusst vom Trennflächengefüge geschnitten werden können. Es ist davon auszugehen, dass aus Primärblöcken kleiner $\leq 50\text{m}^3$ in der Regel selten Rohblöcke mit einem optimalen Format geschnitten werden können.

Es ist nicht möglich, alle Primärblöcke zu visualisieren, da die minderwertigen kleineren Primärblöcke dann nicht dargestellt werden können. Die kleinen Primärblöcke würden in der Darstellung durch die großen Primärblöcke verdeckt.

In den untersuchten Marmorlagerstätten haben die Primärblöcke überwiegend eine ausreichende Größe. Das Ziel der Primärblockanalyse ist also die Darstellung von kleinen und damit minderwertigen Primärblöcken. In den folgenden Blockmodell-Darstellungen

wird für den Raum aus der *RESOBLOK*-Simulation eine Abschätzung der Verteilung kleiner Blöcke mithilfe der „Nearest-Neighbour“-Methode vorgenommen. Andere Extrapolationsverfahren und auch geostatistische Methoden im engeren Sinne, wie das „Kriging“, erwiesen sich als weniger gut geeignet.

Die Darstellung ist somit eine erweiterte 1:1-Wiedergabe des *RESOBLOK*-Modells. Es wurden keine räumlichen Daten verändert sondern nur in ihrer Darstellung zusammengefasst.

Diese Darstellung des Trennflächensystems und der daraus resultierenden Primärblockverteilung erlaubt eine Optimierung eines möglichen Hohlraumes in der modellierten Trennflächenumgebung.

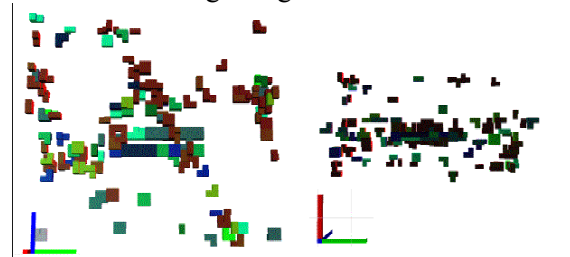


Abb. 116 Auf- und Seitenansicht eines modellierten Trennflächensystems und der daraus abgeleiteten Primär- und Rohblöcke $\leq 50\text{m}^3$.

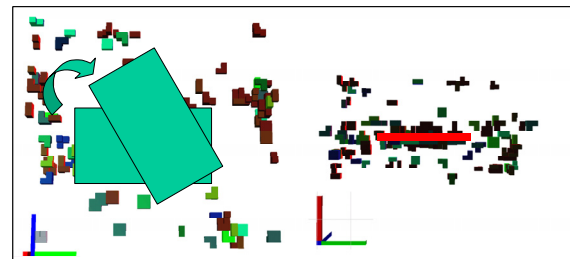


Abb. 117 Wie Abb. 116, aber mit Orientierungen des simulierten Hohlraumes und möglicher Rotation, um eine bessere Ausnutzung des Primärblockgefüges zu erhalten. Rechts (in rot) die Teufenlage des Hohlraums und das zu erwartende Blockgefüge beim Auffahren liegender Bereiche des Grubengebäudes in der Seitenansicht.

Eine Rotation der Hohlraumausrichtung entsprechend dem Trennflächengefüge bietet

dem Nutzer des Systems Möglichkeiten, seinen untertägigen Hohlraum optimaler an die bruchtektonischen Gegebenheiten anzupassen.

Die folgenden Beispiele in den Kapiteln 7.1.2.1 bis 7.1.2.4 zeigen die vier im Projekt CAD-PUMA untersuchten bergmännischen Hohlräume. Die Trennflächenaufnahme fand während der Auffahrung statt. Die Trennflächen wurden fast vor jedem Schnitt von neuen Rohblöcken an der Ortsbrust aufgenommen und anschließend ausgewertet.

Die Orientierung der bergmännischen Hohlräume war zu Beginn des Projektes vorgegeben. Eine mögliche Rotation der experimentellen Abbaukammern während der Auffahrung war nicht möglich.

Die angeführten Beispiele zeigen jedoch die Optimierungsmöglichkeiten auf, die durch eine Rotation des Hohlraumes bezüglich des Primärblockgefüges möglich gewesen wären.

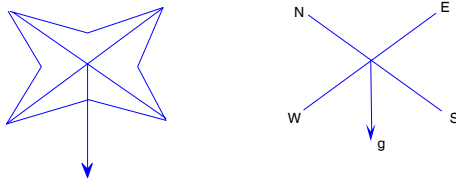


Abb. 118 Richtungsrose in den *RESOBLOK*-Simulationen mit Himmelsrichtungen und Z-Achse (ground=g).

Die in den Beispielen verwendeten Orientierungen der modellierten Trennflächenkörper wurde auf Basis der möglichen Abbaurichtungen ermittelt.

Da eine Orientierung parallel zu einer der Haupttrennflächenrichtungen eine Optimierung des Abbaus bedeutet und das Ausbringen erhöhen könnte, wurden diese mit in die Modellberechnung einbezogen. Somit stellen sich die möglichen Hohlräume bezüglich ihrer Orientierungen wie in Tabelle 11 dar.

Eine weitere Analysemethode der Primärblockdaten bzw. der errechneten Rohblockdaten in *SPSS* (vgl. Kap. 4.4.1.5) soll Aufschluss über die Verteilung von Blockvolumina in den Modellen geben. In den Untersuchungen wurde eine Zone of Interest (ZOI) definiert, die von dem folgenden *RESOBLOK*-Modellen leicht abweicht, da die z-Werte etwas kleiner gewählt sind. Grundsätzlich ist bei der *RESOBLOK*-Analyse darauf zu achten, dass die ZOI nicht zu groß gewählt wird, weil die Vorhersagbarkeit der Trennflächenverläufe sonst zu schwierig ist.

Eine räumliche Orientierung wird in den *RESOBLOK*-Modellen in Form einer Richtungsrose gegeben (Abb. 118).

Tabelle 11: Orientierungen möglicher untertägiger Hohlräume in der Trennflächensimulation von *RESOBLOK*.

Orientierung: Lokalität	Orientierung der Trennflächen				Untersuchte Erweiterungen Hohlraumes	optionale des Hohlraumes	Weitere optionale Richtungen
	F1	F2	F3	F4			
DMCO A	240°	240°	300°	180°	306°	36°	330°
DMCO B	110°	250°	212°	160°	306°	36°	
LASA	105°	246°	135°		62°	332°	
LEVI	291°	205°			40°	310°	

RESOBLOK-Modelle basieren auf einem deterministischen System, das durch Messungen definiert ist. Eine Erweiterung des Modellhohlraumes und Trennflächenannahmen für diese Bereiche kann nicht uneingeschränkt vorgenommen werden. Das Gesamtvolumen der ZOI ist 50400 m³ groß (Tabelle 12). In Abhängigkeit von der Anzahl der Blöcke ergibt sich durch Rundungsfehler eine kleineres Gesamtvolumen.

In folgender Tabelle 12 wird die Anzahl der Blöcke nach dem Schneiden eines virtuellen Hohlraumes für unterschiedliche Orientierungen dargestellt. Dabei werden mehrere mög-

liche Abbaurichtungen verglichen. Die ermittelten Daten zeigen durchschnittliche Blockverteilungen. Anhand der statistischen Analyse ist zu erkennen, dass DMCO Site A und B wie auch Levigliani (CCLL) im Durchschnitt ähnlich große Blöcke aufweisen. In LASA sind die Blöcke im Durchschnitt signifikant kleiner und damit erhöht sich auch ihre Anzahl. Die maximale Blockgröße kann bei unterschiedlichen Abbaurichtungen sehr differieren. So sind die Primärblöcke in Levigliani in Abhängigkeit von der Abbaurichtung um bis zu 500 m³ größer (Levi205X2).

Tabelle 12: Tabellarische Aufstellung einer statistischen Auswertung der in *RESOBLOK* modellierten Blockverteilung.

Lokali- tät/Richtung/ X2	Anzahl an Blö- cken	Minimum [m ³]	Maximum [m ³]	Gesamtvolumen der Blöcke [m ³]	Durchschnittliche Blockgröße [m ³]
DyoA300X2	333	0,55	1617,53	50395,51	151,34
DyoA36X2	309	0,54	1594,06	50395,67	163,09
DyoB36X2	352	0,56	1230,12	50396,83	143,17
DyoB212X2	367	0,52	1298,22	50394,53	137,31
Lasa62X2	899	0,51	978,93	50368,91	56,03
Lasa105X2	838	0,51	1802,93	50370,27	60,11
Levi205X2	324	0,54	1841,66	50395,25	155,54
Levi40X2	321	0,67	1340,81	50396,22	156,99

Für eine Bestimmung der Häufigkeitsverteilung der Primärblockvolumen wurde auf Verteilungs- „Gesetzmäßigkeiten“ zurückgegriffen, die bei der mechanischen Zerkleinerung von Stoffen gefunden worden sind. Die Analyse der Verteilung von Kornvolumen- bzw. -größensummen bei der Zerkleinerung von Stoffen geht auf ROSIN et. al. (1933) zurück. Dabei beschreibt das entwickelte „Exponentialgesetz der Zerkleinerung“ die Verteilung von Siebrückhalt und Korngrößen eines Haufwerkes Kohlestaubes. Basierend hierauf und auf den Untersuchungen von BENNETT (1936) wurde die DIN 66145 (ehemals DIN 4190) entworfen und die darin definierten RSRB-Netze (ROSIN, SPERLING, RAMMLER und BENNETT) werden zur Interpretation von spezifischen Oberflächen des untersuchten

Materials genutzt. Diese Methode wurde weiterentwickelt und auch auf die Interpretation an Korngrößenverteilungskurven in der Sedimentologie (z. B. BRAUN, 1975 und SCHLEYER, 1986) etwa zur Identifizierung von Liefergebieten oder auch zur Charakterisierung von Ablagerungsräumen angewendet. Die natürliche Zerkleinerung eines Festgesteinskörpers scheint ebenfalls diesen Gesetzmäßigkeiten zu folgen (IBBEKEN & SCHLEYER, 1991).

Die in *RESOBLOK* errechneten Modelle der Primärblockvoluminaverteilung sind in Abbildung A1 im Anhang als Histogramme der logarithmierten Primärblockvolumen in einheitlichen Klassenbreiten (n=18) zum Zwecke der Vergleichbarkeit dargestellt. Vergleichsweise ist auch eine Normalvertei-

lungskurve der Werte dargestellt. Die Häufigkeitsverteilungen der logarithmierten Blockvolumina sind recht unterschiedlich. Es zeigt sich, bis auf DMCO A 300 mit einer symmetrischen Verteilung der Werte, fast immer eine signifikante Schiefe der Verteilungskurve. Für die Modelle LASA sind die Bereiche der kleinen Primärblockvolumina abgeschnitten. Die Modelle LEVI könnten als zwei Populationen interpretiert werden, wobei sich eine Gruppe an kleineren Primärblocken aus der Verteilungskurve abhebt.

Um die Primärblockvolumenverteilungen der Marmorlagerstätten untereinander zu vergleichen bietet sich eine Summenkurvendarstellung an.

Deutlich erkennbar ist die Gesamtzahl der Primärblöcke in Lasa am größten. Der Anteil an kleinen Blöcken ist im errechneten Modell Levigliani 205 und DMCO A 36 am geringsten. Das Verhältnis von Blockvolumen zur Anzahl steigt in den Bereichen der kleinen Blöcke langsamer. Das durchschnittliche Verhältnis von Primärblockvolumen und Blockanzahl ist jedoch bei allen errechneten Modellen gleichmäßig. Auffallende Abweichungen sind nicht erkennbar.

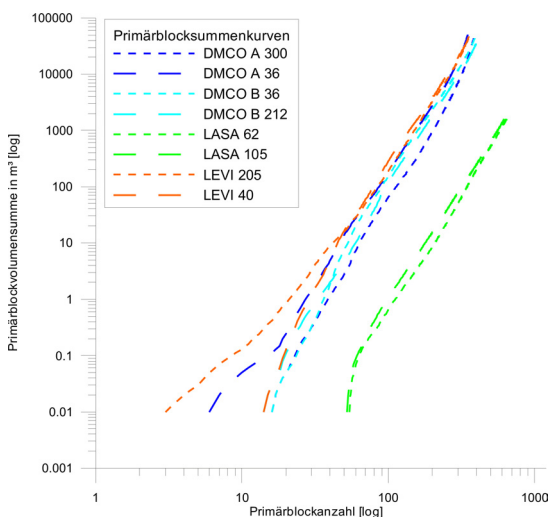


Abb. 119 Summenhäufigkeitsverteilung des Primärblockvolumen im Vergleich.

Inwieweit die Summenkurven der Primärblockvolumina von einzelnen Faktoren wie den gesteinsphysikalischen Eigenschaften der Marmore, oder der Nähe von Störungssystemen abhängig ist, wurde bisher nicht weiter untersucht. Um hierzu eine signifikante Aussage machen zu können, wären weitere Untersuchungen an einer größeren Anzahl vergleichbarer Marmorvorkommen nötig.

7.1.2.1 DMCO Site A

Für die pentelischen Lokalitäten DMCO A & B wurden die Trennflächenmodelle in Richtungen ermittelt, die abbautechnisch eine Erweiterungsmöglichkeit des untertägigen Hohlraumes darstellen (Tab. 11). Es hat sich

aufgrund der Untersuchungen und der Anwendung des WBS ergeben, dass zwei Richtungen für die aufgefahrenen Testfesten und deren umgebenden Hohlraum Alternativen für die weitere Abbaureihenfolge wären:

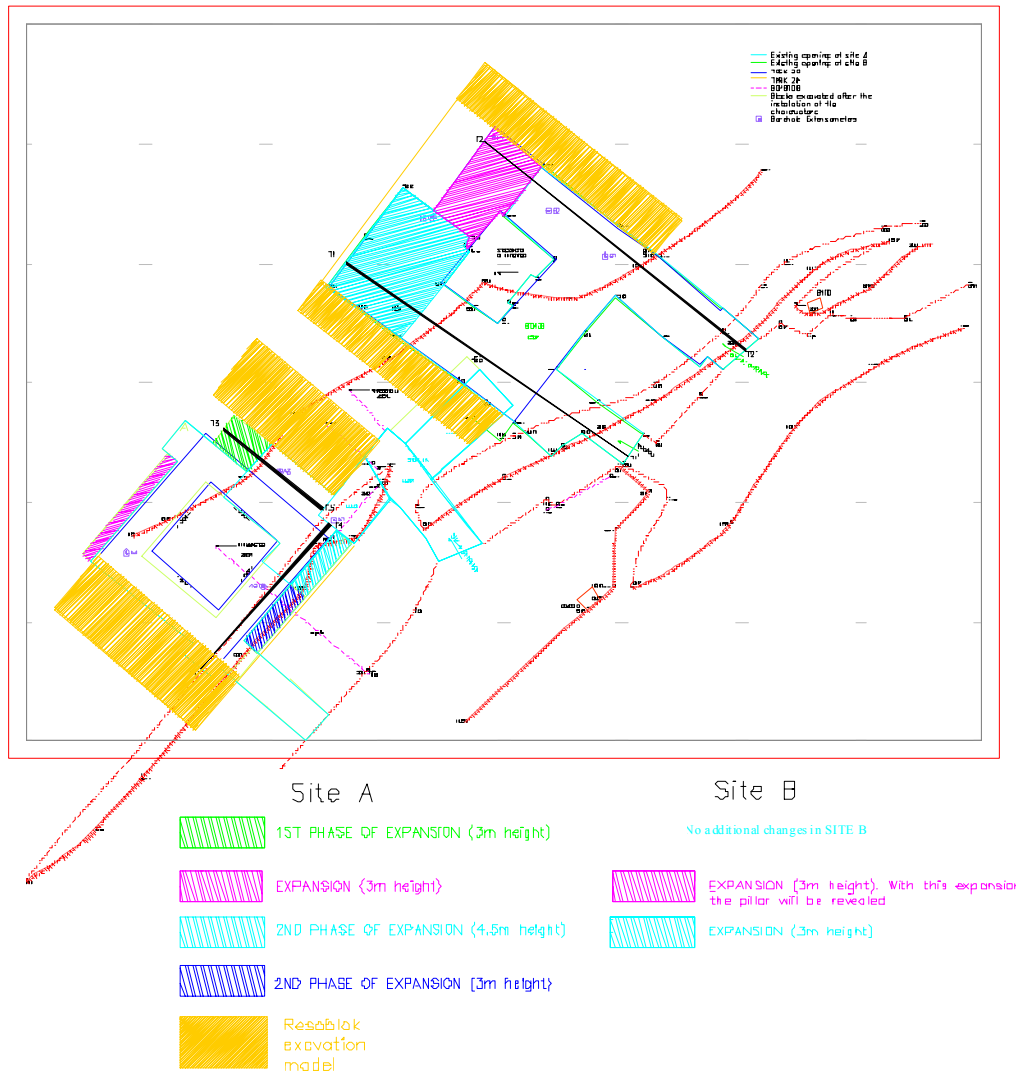


Abb. 120 Grubenriss der aufgefahrenen untertägigen Hohlräume DMCO Site A & B mit Festen und Kammern. Gelb sind die möglichen Erweiterungen der Hohlräume gekennzeichnet (Quelle DMCO).

Diese Richtungen streichen 306° und 36° und entsprechen der Orientierung von Hohlraum DMCO B aufgrund der geologisch identischen Situation (Abb. 120). Eine Erweiterung des Abbaus nach NE, d. h. in Richtung auf die den Steinbruch begrenzende Kuppe, bietet

sich aufgrund des Einfallens des Schiefers nicht an (siehe Kap. 6.1).

Für DMCO Site A stellen sich das errechnete Modell der Trennflächen und die Auswirkungen auf die Primärblockverteilung wie folgt dar (Abb. 121).

Zwei Trennflächenfamilien sind maßgeblich an der Primärblockbildung beteiligt. Die Trennflächendichte ist im Verhältnis zu den anderen hier untersuchten Marmorvorkommen im mittleren Bereich angesiedelt. Andere Vorkommen zeigen weitaus kleinere oder größere Trennflächenabstände. Das *RESOBLOK*-Modell gibt die Trennflächenverteilung und die daraus resultierende Blockverteilung und -anordnung für eine Abbauorientierung in Richtung 306° N mit 121 Blöcken an, bei einer Rotation auf 36° N mit 111 (Abb. 121); das bedeutet, dass im letzteren Fall die größeren Blöcke in der ZOI zu finden sind.

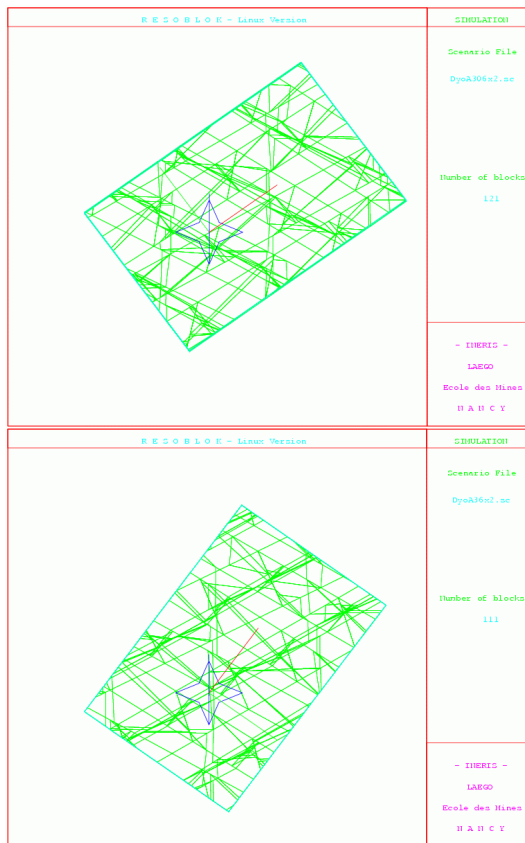


Abb. 121 Blockmodell der Richtungen 306° (Ansicht von oben) und 36° (Ansicht von unten) N DMCO Site A.

Im nächsten Schritt der *RESOBLOK*-Simulation werden aufgrund des virtuellen Auffahrens eines Hohlraumes und des Zer-

schneidens durch neue künstliche Trennflächen in den Primärblöcken Rohblöcke hinzu modelliert. Die Gesamtanzahl der Blöcke, die Summe der Primär- und der neu erzeugten Rohblöcke, erhöht sich. Die in das Blockmodell virtuell hineingeschnittenen Hohlräume sind zum Zwecke der statistischen Vergleichbarkeit alle gleich groß dimensioniert.

Die in der Simulation verwendeten Hohlräume, die einen Abbau in dieser Trennflächenkonstellation darstellen sollen, sind 12 Meter lang und 4,5 Meter hoch. Durch die zusätzlich in das Trennflächensystem eingerechneten Trennflächen für einen Abbau steigt die Trennflächendichte und die Anzahl der Blöcke im ZOI.

Durch die neu geschnittenen Trennflächen zur Herstellung von gewinnbaren Rohblöcken wird in dem angeführten Beispiel die Anzahl an Blöcken auf 349 mehr als verdoppelt (Abb. 122).

Rotiert man das Modell für DMCO Site A nach 306° N (Abb. 123) und fügt dort die neu entstehenden Trennflächen in das System ein, erhöht sich dort die Anzahl der Blöcke auf 386.

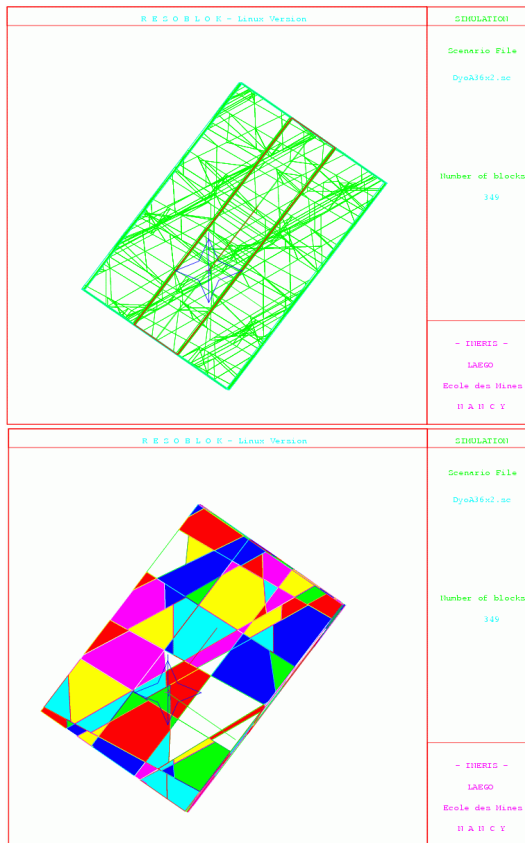


Abb. 122 Blockmodell mit einer Orientierung des Hohlraumes in Richtung 36° N für DMCO Site A mit zusätzlichen Trennflächen durch die Auffahrung des simulierten Hohlraumes.

Prinzipiell ist eine geringere Zahl an Blöcken pro Volumen wünschenswert, da damit eine Zunahme der mittleren Blockgrößen verbunden ist. Anhand der *RESOBLOK*-Modelle lässt sich nur schwer ablesen, in welchen Bereichen konkret die Blockvolumenveränderungen stattfinden. Da *RESOBLOK* nicht die grafischen und auch statistischen Möglichkeiten hat, die Rohblockdaten entsprechend zu visualisieren, wurden die Daten aus den *RESOBLOK*-Simulationen in *Elements Environment* weiterverarbeitet und mithilfe von *EE2Surpac* (vgl. Kap. 4.4.1.6) nach *Surpac2000* exportiert.

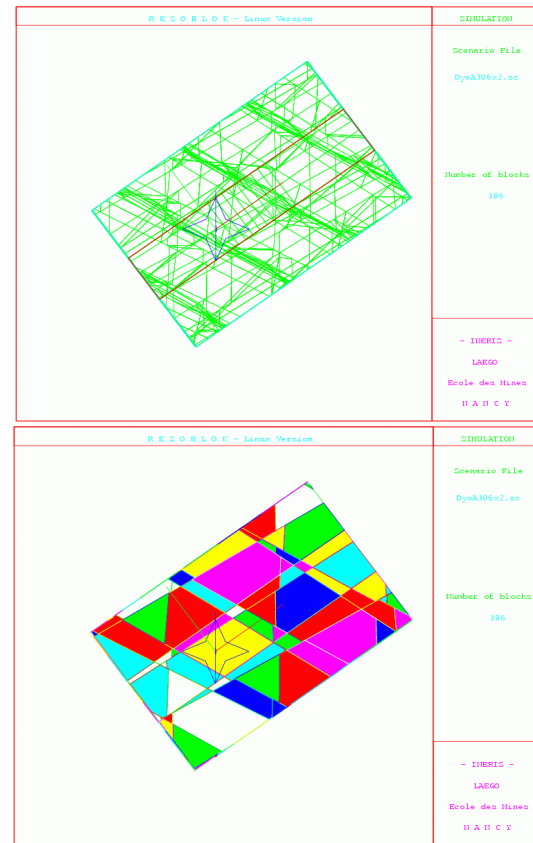


Abb. 123 Blockmodell mit einer Orientierung des Hohlraumes nach 306° N für DMCO Site A mit zusätzlichen Trennflächen durch die Auffahrung des simulierten Hohlraumes.

Werden die Daten für den modellierten Hohlraum in den tatsächlich vorhandenen untertägigen Abbau projiziert, kann dargestellt werden, in welchen Bereichen mit Problemen bei der Auffahrung der untertägigen Hohlräume gerechnet werden muss.

In den Abbildungen 124 wird die Blockverteilung der *RESOBLOK*-Simulation in der realen Hohlraumsituation dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass es in einigen Bereichen zu stärkeren Beeinträchtigungen kommt. Ursache sind die in diesem Bereich parallel verlaufenden Trennflächen. Die Gewinnung in diesen Bereichen würde überwiegend kleine Blöcke ergeben.

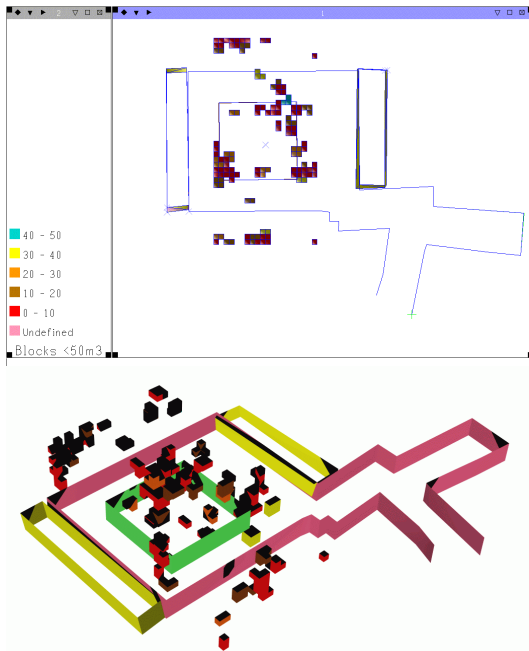


Abb. 124 Blockmodell mit Blöcken kleiner 50 m³ für DMCO A (Richtung 36°). dargestellt in der realen Abbausituation Oben: *Surpac2000* Darstellung des untertägigen Hohlraumes; Unten: 3D Modell derselben Situation als Seitenansicht in VRML.

Eine Auffahrung parallel zu dieser Zone würde bessere Ergebnisse erzielen, weil die Schnitte zur Rohblockgewinnung im ungestörten Marmor durchgeführt werden könnten. Eine optimale Gewinnung von Rohblöcken ergibt sich immer aus einem von wenigen oder keinen Trennflächen durchzogenen Material.

Die Einflüsse von einigen wichtigen geologischen Rahmenbedingungen, wie der Kontakt zum hangenden Schiefer oder Auswirkungen der in Richtung 330° verlaufenden Störung, können in den Modellen nicht festgestellt werden. Dafür sind die aufgenommenen Trennflächenmodelle von zu geringer bzw. zu grober Auflösung, bzw. es ist fraglich, ob diese Einflüsse im Modell messbar wären. Deshalb wurde ein zusätzliches Modell für die Richtung 330° entwickelt, bei dem der virtuelle Hohlraum senkrecht zum Streichen der Störung steht.

Die *RESOBLOK*-Simulation zeigt in dieser Richtung 117 Blöcke auf. Schneidet man den virtuellen Hohlraum in das Trennflächengefüge, erhöht sich die Anzahl der Blöcke auf 374 (Abb. 125).

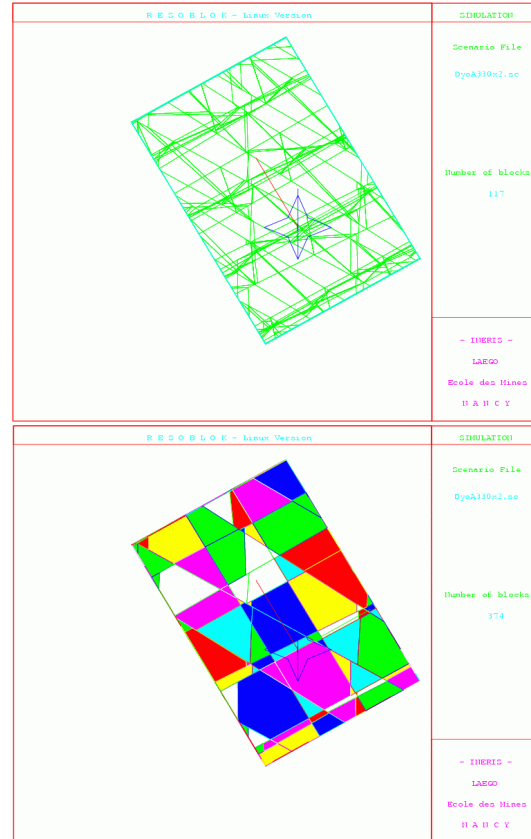


Abb. 125 Blockmodell für DMCO Site A mit Orientierung des Modells nach 330° in Richtung des Störungssystems.

Im Modell in 330° Richtung ist der Schnitt des virtuellen Hohlraumes senkrecht zu einer der Trennflächen, die parallel zur Störung verlaufen. Obwohl dies für die Schnittfolge bezüglich der möglichst kubischen Rohblöcke optimal zu sein scheint, ist jedoch die Anzahl der ermittelten Blöcke hier am größten. Die Richtung 330° ist für das Auffahren eines Hohlraumes also nicht zu empfehlen. Die zwei anderen Haupttrennflächenrichtungen schneiden diesen virtuellen Hohlraum diagonal im spitzen Winkel an, was zu einer Vielzahl rhombischer Rohblöcke führen würde.

Wird ein virtueller Hohlraum in das Trennflächenmodell eingerechnet und orientiert sich dieser Hohlraum parallel zu den Trennflächensystemen für DMCO Site A, stehen verschiedene Optionen zur Verfügung. Parallel der Richtungen 240° mit zwei Trennflächenfamilien unterschiedlichen Einfallens wäre ein Hohlraum möglich. In Richtung 300° verläuft eine weitere Trennflächenfamilie. Des Weiteren existiert eine sehr ähnliche parallel zur derzeit vorgegebenen Orientierung 306° . Zum Schluss steht die Richtung 180° als ermittelte Trennflächenorientierung zur Diskussion.

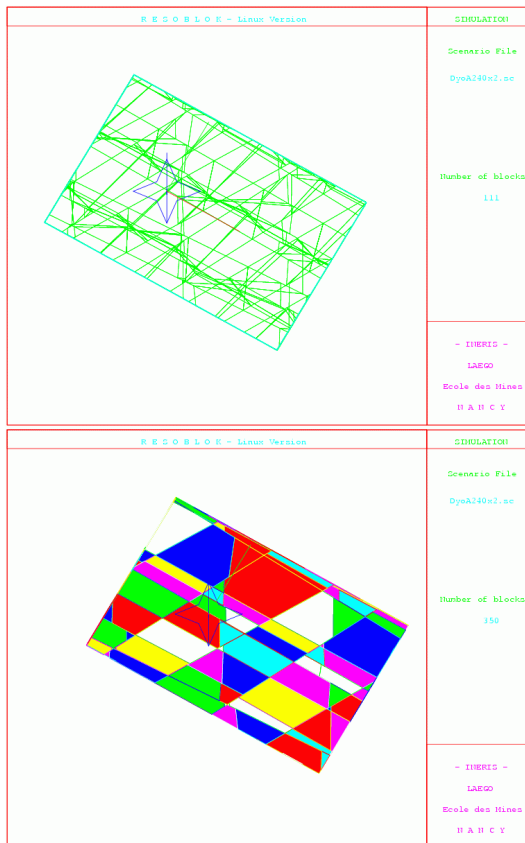


Abb. 126 Blockmodell mit der Orientierung 240° DMCO Site A ohne modellierten Hohlraum (oben) und mit modelliertem Hohlraum (unten).

Aus der Modellierung für die angegebenen Trennflächenrichtungen lassen sich folgende Beobachtungen ableiten. Sowohl in Richtung 240° (Abb. 126) als auch in Richtung 180°

(Abb. 127) sind die Blockgrößen für das modellierte Trennflächensystem am günstigsten. In Richtung 240° ergeben die errechneten Modelle für die Blockanzahl in dem gesamten Areal 111 Blöcke. Nach dem Schneiden des virtuellen Hohlraumes erhöht sich die Blockanzahl in diesem Fall auf nur 350. Aus der Abbildung 126 wird deutlich, wie sich die Trennflächen 240° parallel zu dem Hohlraum im virtuellen Raum erstrecken. Zu schneidende Blöcke werden durch im kleinen Winkel zum Hohlraum verlaufende Trennflächen gekreuzt.

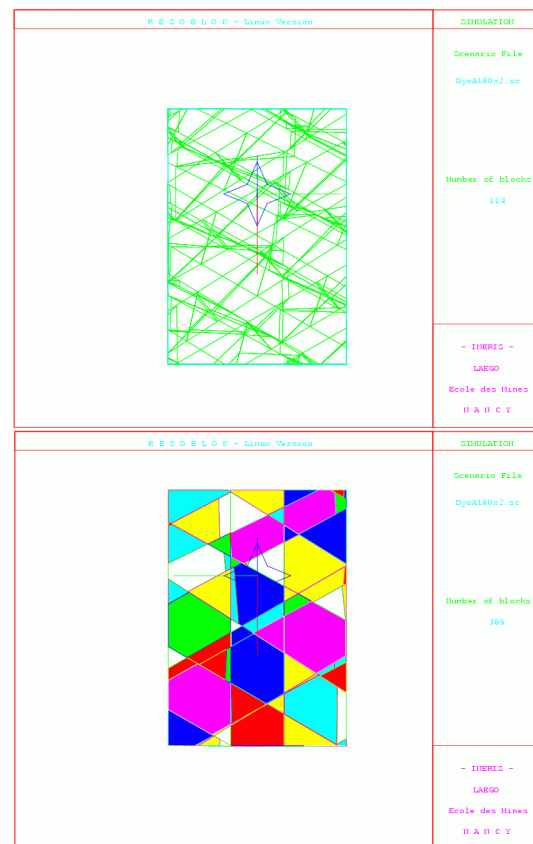


Abb. 127 Blockmodell mit der Orientierung 180° DMCO Site A. Oben ohne, unten mit virtuellem Hohlraum.

In Richtung 180° modelliert, ist das Blockvolumenverhältnis nicht sehr viel schlechter. Die Gesamtzahl der Primärblöcke beläuft sich auf gute 114, aber nach dem Schneiden des virtuellen Hohlraumes errechnet RESOBLOK bereits 389 Rohblöcke. Betrachtet man das

Trennflächenmuster in Abbildung 127, fällt auf, dass eine Trennflächenfamilie senkrecht zur Orientierung des Hohlraum verläuft und zwei weitere beeinflussende Trennflächenfamilien im kleinen Winkel dazu streichen.

Aus der Trennflächenanalyse für DMCO Site A ist damit festzustellen, dass eine Orientierung des Hohlraumes parallel der Haupttrennflächen die optimale Richtung für das Auffahren eines untertägigen Hohlraumes ist. Die Richtung 240° ist von beiden die zu bevorzugende Richtung für eine weitere Abbauplanung unter Berücksichtigung des Trennflächensystems mit dem maximalen Abbau an großen Rohblöcken.

7.1.2.2 DMCO Site B

DMCO Site B liegt in ähnlicher geologischer Situation wie DMCO A, nur der Kontakt zum überdeckenden Schiefer ist näher und die Entfernung zur Störung ist größer, denn der Hohlraum ist ca. 100 Meter vom Störungssystem, das den Tagebau kreuzt, entfernt. Wie auch das übrige Umfeld, z. B. die räumliche Konstellation der Lithologie, sind auch die Trennflächensysteme ähnlich wie bei DMCO Site A angeordnet.

Die beiden optionalen und untersuchten Abbaurichtungen, die zur Betrachtung herangezogen wurden, sind identisch mit DMCO Site A. Die Trennflächenanalyse hat ebenfalls vier Trennflächenfamilien ermittelt.

Zu den beiden optionalen Abbaurichtungen 306° und 36° : Die Abbaurichtung 36° ist im Bereich der Firste sehr nahe am Kontakt zum Schiefer. Ein möglicher Abbau in diese Richtung würde zwangsläufig den Kontakt freilegen. Das wäre, wie schon erwähnt, sehr ungünstig für die Sicherheit des Grubengebäudes. Das ermittelte Trennflächensystem und die Modellierung in diese Richtung zeigen einen sehr guten Wert mit nur 99 Primärblöcken (Abb. 128). Somit wäre diese Richtung prädestiniert für einen weiteren Abbaufortschritt. Nach dem Schneiden der Rohblöcke ergeben sich 395 Blöcke. Insgesamt stellt

dieses Ergebnis die beste Situation für DMCO Site B dar.

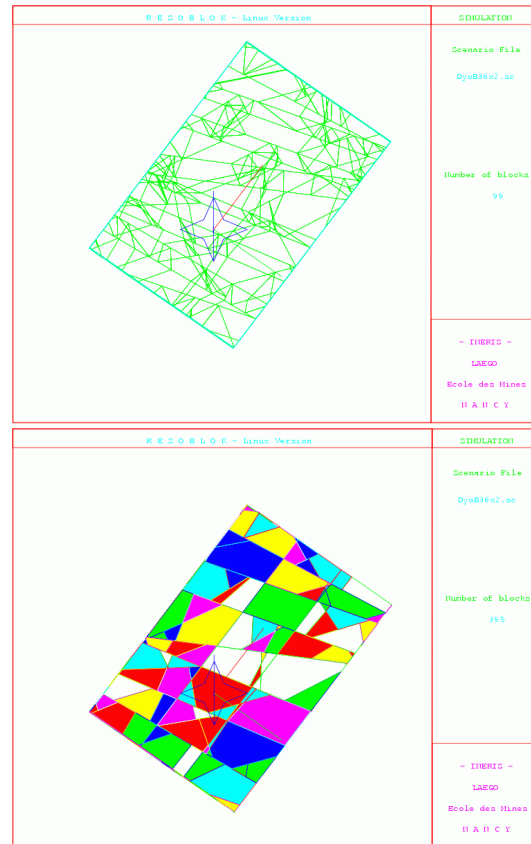


Abb. 128 Blockmodell mit der Orientierung 36° DMCO Site B. Oben ohne, unten mit virtuellem Hohlraum.

Das Trennflächenmodell für die Richtung 36° zeigt eine Trennflächenfamilie in Richtung 110° , die fast senkrecht auf dem virtuellen Hohlraum steht. Eine weitere durchgehende Trennfläche existiert nicht, sondern mehrere kleine nicht aushaltende Trennflächenfamilien verlaufen senkrecht bzw. im spitzen Winkel zur Haupttrennfläche. Damit werden die gewinnbaren Rohblöcke fast alle orthogonal geschnitten, was zu einem hohen Ausbringen beiträgt.

Die Trennflächenanalyse zeigt vier Hauptrichtungen, die von DMCO Site A leicht divergieren. Es war aufgrund der Aufschlussverhältnisse sehr gut möglich, die Trennflächenaufnahme durchzuführen, da die Testfeste früh umfahren worden ist. Die anstehenden

Marmore konnten so recht präzise untersucht waren. Tendenziell lassen sich einige Übereinstimmungen mit der Analyse von DMCO Site A feststellen.

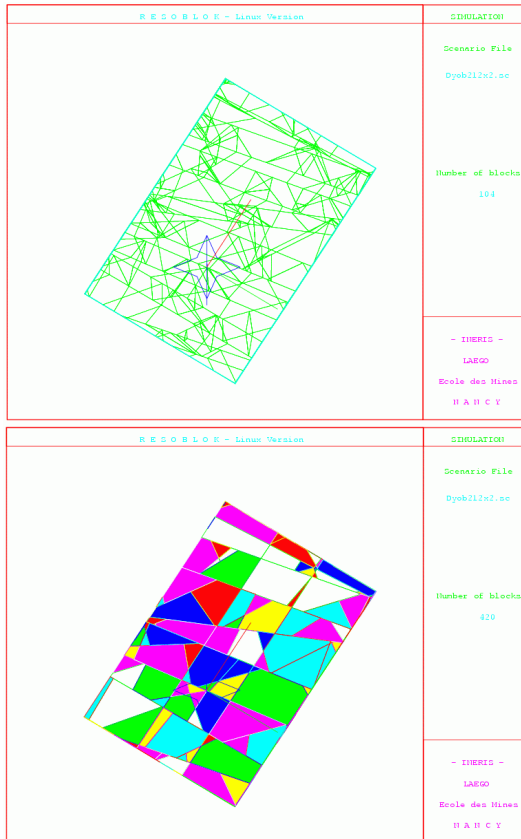


Abb. 129 Blockmodell mit der Orientierung 212° für DMCO Site B. Oben ohne, unten mit virtuellem Hohlraum.

Die Richtung 240° stellt ein Trennflächensystem dar, das parallel zu jener Störung verläuft, die auch im Tagebau gut zu sehen ist. Bei der Streichrichtung der zweiten Trennflächefamilie von DMCO B von 250°, bei DMCO A wurde die zweite Trennflächefamilie mit 240° ermittelt, dürfte es sich mit aller Wahrscheinlichkeit nach um dieselbe Trennflächefamilie handeln.

Das Ergebnis für das Modell in Richtung 250° ist jedoch nicht am günstigsten. Bei DMCO Site B werden hier zwar nur 104 Primärblöcke berechnet, nach einem Schnitt des virtuellen Hohlraumes kommen jedoch 433 Rohblöcke aus dem Modell. Das beste Block-

volumenverhältnis für die Beurteilung der Trennflächenfamilien lässt sich in Richtung 212° (Abb. 129) ermitteln. Hier sind ebenfalls 104 Primärblöcke errechnet, nach virtuellen Schnitten von Rohblöcken sind jedoch nur 420 Blöcke frei. Eine Orientierung eines möglichen Hohlraumes in Richtung 36°, mit der derzeitigen Abbaurichtung, wäre also vorzuziehen.

Auch in Richtung 212° steht der modellierte Hohlraum fast senkrecht zu einem Teil der Trennflächen. Eine Hohlraumauffahrung senkrecht zum Streichen von Trennflächen bietet prinzipiell gute Voraussetzungen.

Grundsätzlich lässt sich bei dem Vergleich von DMCO Site A und B feststellen, dass im Letzteren die Primärblockanzahl feststellbar geringer ist. Die Nähe zur Störung ist in diesem Falle sicherlich ausschlaggebend für die geringe Anzahl an Blöcken.

Die Darstellung des Blockverteilungsmusters in *Surpac2000* (Abb. 130) zeigt Positionen der geringvolumigen Rohblöcke. Die Verteilung dieser Rohblöcke ist in Nähe der Firste zum Kontakt Schiefer-Marmor nicht signifikant dichter.

Betrachtet man die aufgenommenen Trennflächen vorort, ist auch dort festzustellen, dass keine der Trennflächen ursächlich mit dem Kontakt zum Schiefer im Zusammenhang steht. Auf einigen Trennflächen ist ein Eintrag von tonigem Material von dem an der Oberfläche anstehenden verwitterten Schiefer zu finden. Einschaltungen von Schiefer sind im Marmor jedoch nicht zu beobachten. Die Trennflächenanalyse lässt in diesem Fall keine Interpretation bezüglich der Kontaktzone zu.

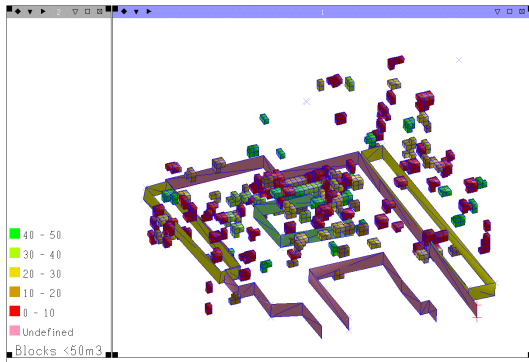


Abb. 130 Blockverteilung DMCO Site B. Richtung 212° stellt das weitständige Trennflächensystem mit den relativ wenigen geringvolumigen Rohblöcken dar (in *Surpac2000*).

7.1.2.3 LASA

Aus der statistischen Analyse der Blockhäufigkeitsverteilung der *RESOBLOK*-Simulationen in SPSS (vgl. Tabelle 12) ist ersichtlich, dass die Anzahl der Blöcke in Lasa viel höher ist als bei den anderen untersuchten Marmorlagerstätten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die tektonische Beanspruchung des Marmors dort höher ist. Das rezente in-situ-Spannungsfeld ist verglichen mit den anderen Steinbrüchen des Projektes in LASA durch eine sehr mächtige Überdeckung geprägt. Im Laufe des Abbaus entstanden ständig neue offene Entlastungsklüfte entlang von Schwächezonen wie Schichtflächen oder früh angelegten und dann reaktiven Trennflächensystemen.

Auch in Lasa sind zwei Richtungen zur Analyse der weiteren Abbaureihenfolge untersucht worden (Abb. 131).

LASA PER L'INDUSTRIA DEL MARMO:

LASA MARMO S.p.A.

CAVE ACQUA BIANCA-WEISSWASSERBRUCH

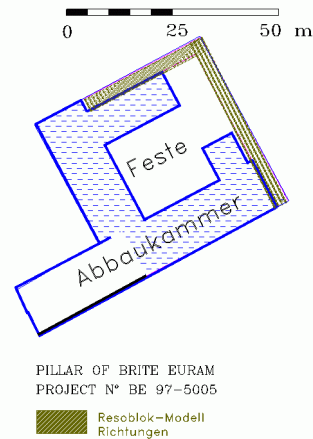


Abb. 131 Grubenriss von LASA, Ausschnitt mit Testfeste und Abbaukammern mit den optionalen Abbaurichtungen (schraffiert).

Zur weiteren Abbauplanung standen die trennflächenbedingten Richtungen 62° und 332° zur Verfügung. In Richtung 332° wäre jedoch nach wenigen Metern eine weitere Abbaukammer erreicht worden. In diese Richtung NNE wurde ein notwendiger Sicherheitsstollen als Durchgang zum anderen Grubenteil aufgeföhren.

Die Abbaurichtung 332° hat in der *RESOBLOK*-Analyse ein ungünstiges Blockvolumenverhältnis und wird damit nicht einer weiteren Analyse unterzogen. Für Lasa sind die trennflächenbedingten Richtungen 105° und 62° untersucht worden. In Richtung 105° verläuft eine der Haupttrennflächen. Das Schneiden der Rohblöcke würde in dem Modell für Lasa fast zu einer Verdreifachung der Blockanzahl in der *RESOBLOK*-Simulation führen. Die meisten Trennflächen stehen in Richtung 105° senkrecht auf der Schnittfolge (Abb. 132).

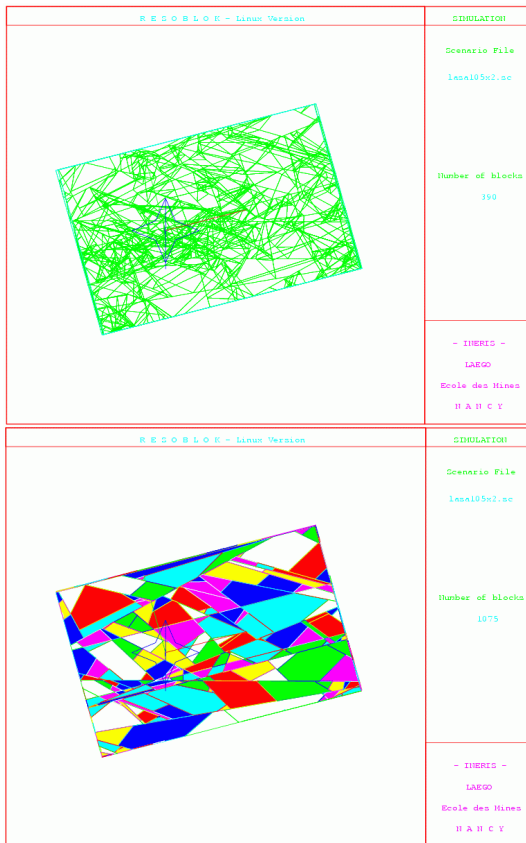


Abb. 132 Blockmodell Richtung 105° für Lasa oben ohne, unten mit Schnittfolgen für den virtuellen Hohlraum.

In Richtung 62° stehen die vorgegebenen Trennflächen spitzer auf dem virtuell zu schneidenden Modell (Abb. 133). Die gewinnbaren Rohblöcke zeichnen sich demgemäss durch spitze Winkel aus, was für eine Weiterverarbeitung ungünstig wäre.

An den Modellen von Lasa kann auch aufgezeigt werden, dass die Methode, einen Hohlraum in ein stark zergliedertes Gestein virtuell zu schneiden, nur dann sinnvolle Interpretationen erlaubt, wenn die zu schneidende Gesteinsmasse ein möglichst kleines Block-Volumen-Verhältnis hat. Im Falle von Lasa ist eine Schnittfolge, wie sie das Modell zeigt, nicht sinnvoll, da die wenigen Rohblöcke, die eine annehmbare Größe haben, zerschnitten werden.

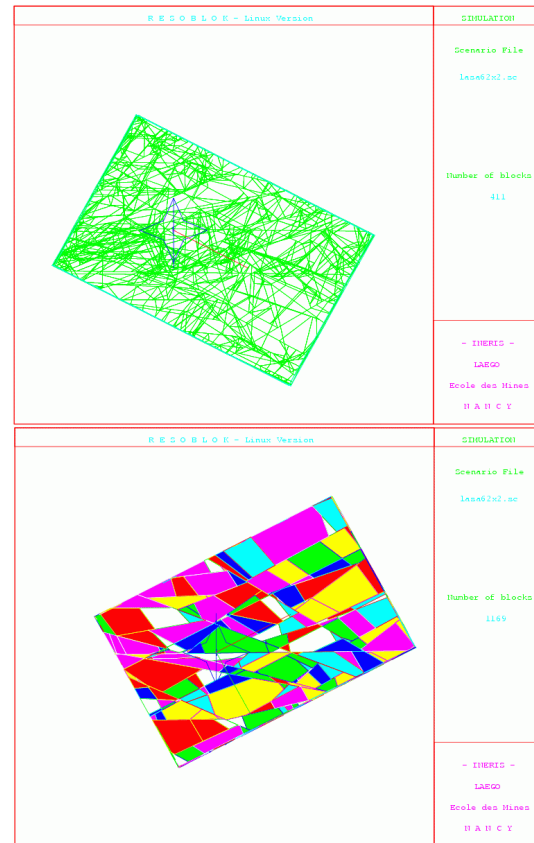


Abb. 133 Blockmodell Richtung 62° für Lasa, oben ohne, unten mit Schnittfolgen für den virtuellen Hohlraum.

Im Modell von Lasa ist die Anzahl der Rohblöcke in Richtung 105° ein wenig geringer als in Richtung 62°. Damit wäre die bevorzugte Richtung 105°.

Wie sich die Verteilung der Primärblöcke und Rohblöcke in der konkreten Situation darstellt, wird in der folgenden Abbildungen 134 und 135 ersichtlich. Hierbei wird klar, wie dicht die Verteilung kleiner Blöcke in dem System ist. Das Beispiel zeigt aber auch, dass trotz des hohen Anteils kleiner Blöcke in LASA die Marmorproduktion wirtschaftlich erfolgen kann. Dafür ist neben einer optimalen angepassten Gewinnungs- und Verarbeitungstechnik in diesem Fall auch die hohe Gesteinsqualität verantwortlich.

Diese Möglichkeit der Darstellung in *Surpac2000* kann für die Planung der weiteren Abbaureihenfolge verwendet werden (Abb.

134 & 135). Die Projektion des virtuell errechneten Trennflächenmodells kann in dem tatsächlichen Layout der Grube visualisiert werden. Daraus lässt sich das Verhalten des Gesteinskörpers mit den gemessenen Trennflächen vorort simulieren.

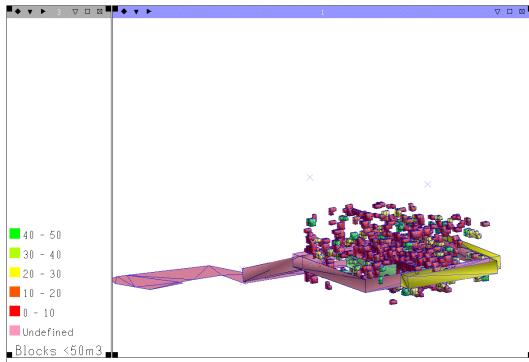


Abb. 134 Blockmodell Lasa in der Seitenansicht. Der virtuelle Hohlraum ist in die reale Grubenkonstellation projiziert. Die aufgespannte Fläche ist die untere Ebene des Hohlraumes, von dem aus über die eingezeichnete Rampe die Abbaukammern erreicht werden (*Surpac2000*, Seitenansicht).

Alle bisher dargestellten *RESOBLOK*-Blockmodelle zeigen aufgrund der Vergleichbarkeit dieselbe ZOI. In den Abbildungen 134 & 135 ist die ZOI der Größe der tatsächlichen Abbaukammer angepasst. Die ZOI ist für die Darstellung in diesem Modell quadratisch gewählt worden und ist dem realen Grubenlayout angepasst. Der in der Grube Lasa aufgefahrene Hohlraum mit Feste ist in der Abbildung 135 zu sehen. Es ist in den beiden Richtungen 62° und 105° eine Verdichtung der Blöcke kleiner 50m^3 in Bereichen zu erkennen, in denen der Hohlraum geschnitten werden könnte.

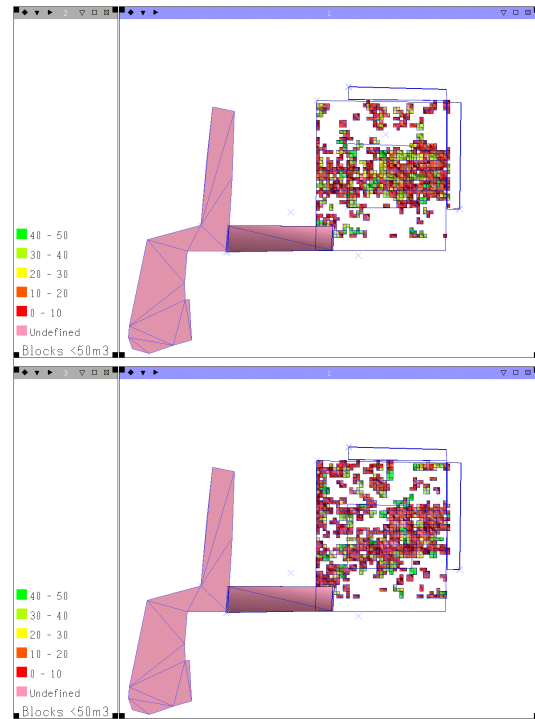


Abb. 135 Blockmodelle Lasa mit Blöcken kleiner als 50m^3 , oben Orientierung in Richtung 105° , unten Orientierung in Richtung 62° . Ebene des Hohlraumes, von dem aus über die eingezeichnete Rampe die Abbaukammern erreicht werden (*Surpac2000*, Seitenansicht).

Die Abbildung zeigt, dass in Richtung 105° die Verteilung der Blöcke kleiner 50m^3 kompakter ist. Die kleinen Blöcke konzentrieren sich entlang einer Zone. Richtung 62° hingegen ist die Struktur aufgelöster und die Verteilung der Blöcke nicht auf einen Bereich konzentriert. Die Verteilung der Rohblöcke in Richtung 62° ist optimaler für eine Gewinnung als in Richtung 105° . Dieses Ergebnis spiegelt sich auch in der Analyse der Gesamtblockverteilung wieder (Abb. 140).

7.1.2.4 CCLL

In dem untertägigen Abbau in Levigliani (öfter in Abkürzungen als LEVI bezeichnet) sind zwei Erweiterungsrichtungen sinnvoll, die im *RESOBLOK*-Modell untersucht wurden. Aus der Analyse der Trennflächen sind zwei unterschiedliche Klufrichtungen abzuleiten. Somit ergeben sich folgende vier Orientierungen, die im *RESOBLOK*-Modell untersucht wurden: Mögliche weitere Abbaureihenfolge in 40° und 310°-Richtung (Abb. 136) und in die Trennflächen Richtungen 291° und 205°.

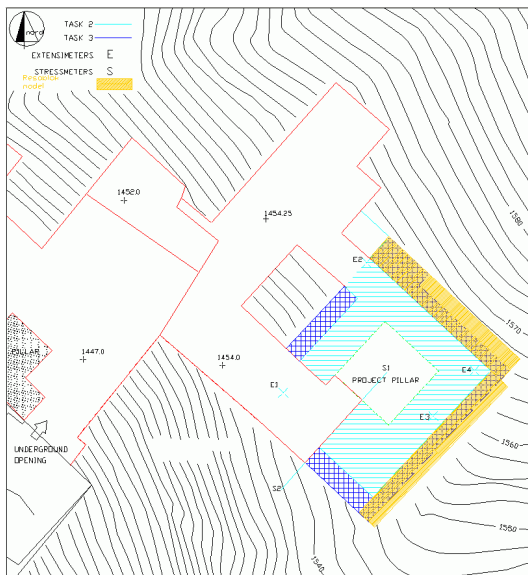


Abb. 136 Grubenriss der Grube von CCLL mit Testfeste und Hohlräumen. Gelb die möglichen Erweiterungen.

Sowohl in der SPSS-Analyse des Blockvolumenverhältnisses als auch in der *RESOBLOK*-Simulation ist ersichtlich, dass die Volumina der Blöcke in Levigliani die größten in den drei untersuchten Marmorlagern sind. Die Anzahl der Primärblöcke in der *RESOBLOK*-Simulation ist mit 73 bis 81 in der ZOI dementsprechend am geringsten.

Nach dem Schneiden des virtuellen Hohlraumes steigt die Anzahl der Rohblöcke auf 330 bis 360 an.

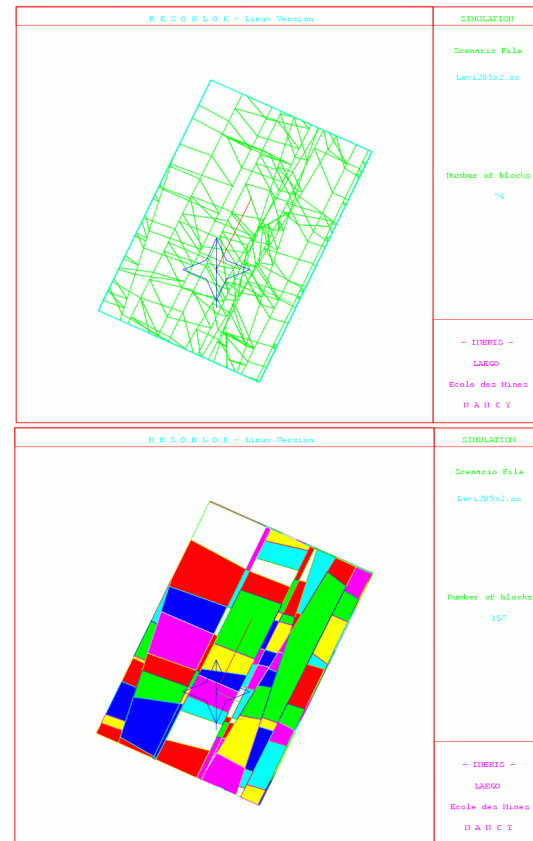


Abb. 137 Blockmodell für CCLL Richtung 205° mit virtuellem Hohlraum.

Bei der Analyse der Rohblockverteilung stellt sich die Richtung 205° (Abb. 137) parallel einer Trennfläche als optimal heraus. Die Trennflächenfamilien stehen im optimalen Winkel zum virtuell geschnittenen Hohlraum. Damit ist die Orientierung der Trennflächen und des Hohlraums in orthogonaler Anordnung zueinander für die Gewinnung von Rohblöcken optimal. Im Modell Abbildung 138 lässt sich erkennen, dass die Trennflächen parallel zum Hohlraum in den Randbereichen eine Vielzahl kleinvolumiger Rohblöcke produziert. Dieser Effekt ist simulationsbedingt, denn in der *RESOBLOK*-Simulation sind die Randbereiche eines Modells ebenfalls Trennflächen. Blöcke, die in Randbereichen mit direkten Seitenflächen zum ZOI liegen, müssen bei der Beurteilung der Modelle also unberücksichtigt bleiben.

Um eine Übersicht der Verteilung der Blöcke im Modell von CCLL zu erhalten, wurde ein *RESOBLOK* Modell in das reale Grubenlayout projiziert. In der Abbildung 139 ist das *RESOBLOK*-Modell für die Richtung 40° in das reale Grubenlayout mit Hilfe von *Surpac2000* modelliert.

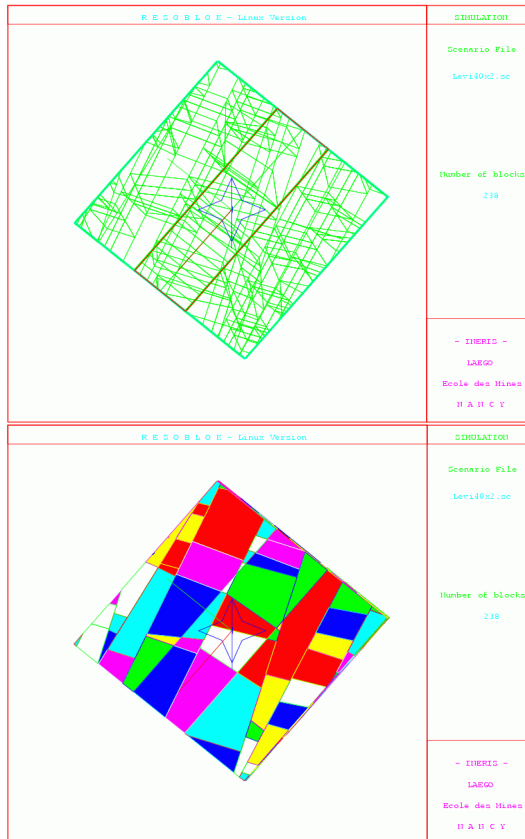


Abb. 138 Blockmodell Richtung 40° für Levigliani. Das Modell ist in der Dimension der realen Abbaukammer angepasst.

Die Blöcke kleiner als 50 m³ verteilen sich entlang einer Zone, die in Bereichen höherer Trennflächendichte liegt. Die in der Abbildung 139 dargestellten Bereiche vornehmlich am Rand des Modells entstehen durch die künstlich eingebrachten Trennflächen der Modellierung. Erst die in der Mitte des Modells dargestellte Blöcke (in der gelben Zone) sind tatsächlich als zu berücksichtigende Blöcke für eine Bewertung zu betrachten.

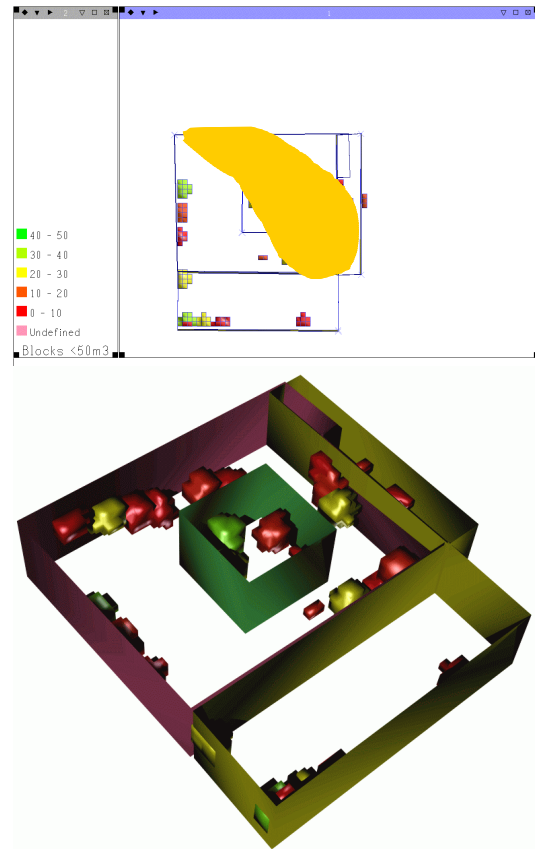


Abb. 139 Blockmodell mit Blöcken kleiner als 50 m³ im Modell Levigliani. Oben dargestellt die Aufsicht in *Surpac2000* mit eingezeichneter Zone der Häufung von Blöcken kleiner als 50m³, unten das entsprechende 3D-Modell in VRML.

Für das Trennflächensystem in Levigliani ergibt sich eine optimale Primärblock-Anordnung und -Größe für eine effiziente Nutzung des zu gewinnenden Marmors. Eine detaillierte Analyse der Trennflächen bringt bei der Größe der Primärböcke keine neuen Informationen, die zu einer Veränderung des bestehenden Abbaukonzeptes führen würde. Die zu schneidenden Rohblöcke bieten in den meisten Fällen ideale Voraussetzungen für eine Nutzung.

7.1.3 Zusammenfassung der Primär- und Rohblockanalyse

Zusammenfassend geben die Abbildung 140 und Tabelle 13 eine Übersicht über die Ergebnisse der Modellierung der Trennflächensysteme in *RESOBLOK*. Die Reihenfolge der Orientierungen des virtuellen Hohlraumes pro Versuchsabbau wurden nach der Anzahl der verwertbaren Rohblöcke mit Größen zwischen 32-53 m³ innerhalb des virtuellen Hohlraumes sortiert. Je höher dieser Anteil an diesen geschnittenen Rohblöcken ist, desto größer ist das Ausbringen an verwertbarem Marmor. Dabei muss selbstverständlich vorausgesetzt werden, dass die Gesteinsqualität

nach Farbe und Muster optimal ist und verkarstungsbedingten Veränderungen/Verfärbungen etc. fehlen. Für die untersuchten Abbaue repräsentiert der letzte aufgeführte Wert auf der Abszisse die errechnete optimale Richtung für das Modell.

Für das Modell Lasa ist die Anzahl der entstehenden Blöcke nach dem Schneiden des virtuellen Hohlraumes so groß, dass die Werte außerhalb der gewählten Skalierung liegen, es wurde hier auf eine vollständige Darstellung verzichtet.

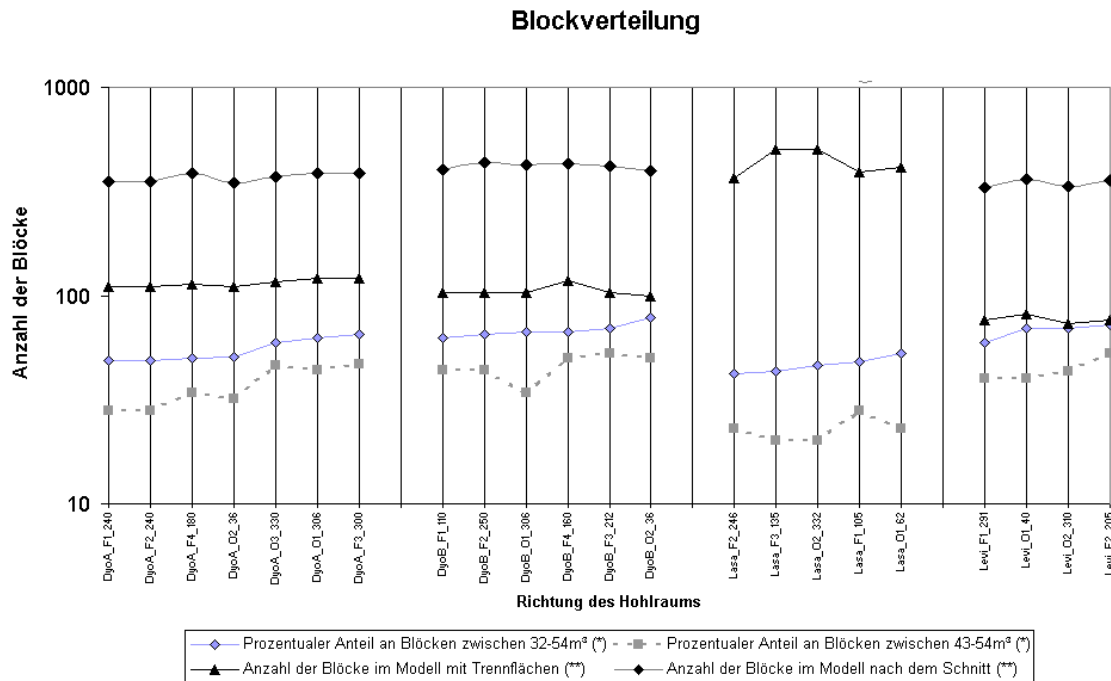


Abb. 140 Blockverteilung in Abhängigkeit von der Orientierung eines möglichen untertägigen bergmännischen Hohlraumes
 (* von 100%, ** Nach Schnitt des virtuellen Hohlraumes eines Abbaus)

Tabelle 13: Ermittelte Blockverteilung in Abhängigkeit von der Orientierung eines möglichen untertägigen bergmännischen Hohlraumes.

Trennflächen	Richtung	Orientierung in Grad	% Anteil an Blöcken zwischen 32-54m³	% Anteil an Blöcken zwischen 43-54m³	Anzahl der Blöcke im <i>RESOBLOK</i> - Modell	Anzahl der Blöcke im <i>RESOBLOK</i> -Modell mit Schnitten des virtuellen Hohlraums eines Abbau- es
DyoA_F1_240		240	49	28	111	351
DyoA_F2_240		240	49	28	111	351
DyoA_F4_180		180	50	34	114	389
DyoA_O2_36		36	51	32	111	349
DyoA_O3_330		330	59	46	117	374
DyoA_O1_306		306	63	44	121	386
DyoA_F3_300		300	65	47	121	388
DyoB_F1_110		110	63	44	104	400
DyoB_F2_250		250	65	44	104	433
DyoB_O1_306		306	67	34	104	426
DyoB_F4_160		160	67	50	118	432
DyoB_F3_212		212	70	53	104	420
DyoB_O2_36		36	78	50	99	396
Lasa_F3_135		135	43	20	503	1339
Lasa_O2_332		332	46	20	501	1432
Lasa_F1_105		105	48	28	390	1075
Lasa_O1_62		62	53	23	411	1169
Levi_F1_291		291	59	40	76	329
Levi_O1_40		40	70	40	81	360
Levi_O2_310		310	70	43	73	334
Levi_F2_205		205	72	53	76	358

Besonders geeignet ist die vorgestellte Methode in den Fällen mittlerer Primärblockgrößen wie bei DMCO. Hier lohnt eine detaillierte Aufnahme und Weiterverarbeitung der Trennflächendaten, um daraus sowohl eine bevorzugte Abbaurichtung als auch eine Abbaureihenfolge planerisch zu ermitteln. Sind die Blöcke kleiner als in Lasa, ist eine Vorhersage zwar möglich, erscheint aber wenig aussagekräftig, weil die Primärblocke zu klein für eine wirtschaftlichere Gewinnung sind. In Levigliani wiederum ist aufgrund der ausreichenden Größe der Primärblocke die optimale Abbaurichtung nach anderen Kriterien zu bestimmen. Eine Optimierung hinsichtlich der Trennflächen ist hier überflüssig,

da in allen Richtungen ausreichend große Rohblöcke geschnitten werden können.

Die hier vorgestellten Modelle zeigen, dass eine genaue statistische Analyse der Trennflächen für eine Abbaureihenfolge äußerst nützlich sein kann.

7.2 Geomechanische Einschätzung der Marmorasse

Die diskutierten Eigenschaften von Marmor und die als Basis der Entwicklung des WBS dienenden Untersuchungen an Lagerstätten (Tabelle 8) grenzen die Möglichkeiten ein, untertägige Hohlräume im Marmor aufzufahren. Bezüglich der generellen geomechanischen Bewertung ist Marmor im allgemeinen ein gut geeignetes Gestein um untertägige Hohlräume für die Werksteingewinnung aufzufahren. Eine wirtschaftliche und sichere Gewinnung ist bei ausreichender Mächtigkeit und Qualität des Marmorlagers möglich.

Für die Abschätzung der geomechanischen Eigenschaften einer Marmorlagerstätte ist darüber hinaus auch die Kenntnis über die Entwicklung der Kontakte und Übergänge zu Begleitgesteinen notwendig.

Geomechanische Untersuchungen an Marmor und dessen Veränderungen durch Druck und Temperatur finden sich unter anderem bei FERRERO & MARINI (2001) und RUTTER (1998). Wie sich die geomechanischen Eigenschaften durch Einflüsse der Verwitterung ändern, haben CHABAS & JEANNETTE (2001) untersucht.

Die geomechanischen Eigenschaften können in Abhängigkeit von Ablagerungsbedingungen, Verfaltung des Marmorlagers, sprödetektonischer Überprägung und Verwitterungsintensität in der räumlichen Ausdehnung sehr stark variieren. In jedem Falle muss eine geomechanische Untersuchung der Marmore stattfinden. Besonders die Labormessung der Druck- und Zuspaltung für die Ermittlung von Standfestigkeiten ist wichtig. Die Kohäsion und der innere Reibungswinkel als bestimmende Einflussgrößen auf das Bruchverhalten des Gesteins sind zu bestimmen. Die Marmore der untersuchten Steinbrüche zeigen hier im Verhältnis zu andern Marmoren durchschnittliche Werte (vgl. Tabelle 8, Abb. 13 bis 16).

Um das Vorkommen bzw. die Lagerstätte bezüglich ihrer geomechanischen Eigenschaften richtig einschätzen zu können, ist eine detaillierte Untersuchung mit Hilfe von Detailkartierungen verbunden mit Probennahme und Bohrungen nötig.

Um die Standfestigkeiten von Festen zu beurteilen, können existierende Klassifizierungssysteme (Tab. 15) herangezogen werden. Die Klassifizierungssysteme sind den Anforderungen des jeweiligen Einsatzgebietes angepasst worden. Das RMR-System (BIENIAWSKI, 1998) wurde dabei jeweils modifiziert und einzelne Faktoren wurden auf die verwendete Abbau- oder Vortriebstechnik angepasst. Das Q-System beschreibt die Trennflächen präziser und bringt den SRF (stress reduction factor) mit ein. Speziell für die richtungsorientierte Tunnelvortriebstechnik wurde das Q-System zum N-System weiterentwickelt.

PALMSTRÖM (1995) propagiert einen RMI (Rock Mass Index), der auf den RQD verzichtet, aber die Trennflächenweite stark bewertet. Schließlich wird der MRMR/DRMS (Modified Rock Mass Rating, Design Rock Mass Strength) von LAUBSCHER (1984, 1994), LAUBSCHER & TAYLOR (1990) verwendet, der das in-situ-Verhalten und Bruchverhalten bei Sprengungen berücksichtigt.

Für die Beurteilung der Standfestigkeiten auf Basis der geomechanischen Eckdaten des Marmors und der verwendeten Abbautechnik sind vor allem der RMR-Wert respektive das Q-System ein geeignetes Instrument, eine Abschätzung für die Gewinnung von Marmor untertage vorzunehmen. Die Beurteilung des Einfallens von Trennflächen wird in den anderen Klassifikationssystemen nicht ausreichend bewertet bzw. nicht den hier gestellten Ansprüchen entsprechend Rechnung getragen, als das darauf zurückgegriffen werden sollte.

Tabelle 15: Übersicht ausgewählter Klassifizierungssysteme für geomechanische Eigenschaften von Hartgesteinen.

	<i>CSIR / RMR Geomechanical Classification System (BIENAWSKI)</i>	<i>Q-System Q-Index (BARTON)</i>	<i>N – System Based on Q-System and Q'-System (modified by MATHEWS)</i>	<i>RMi (PALMSTRÖM)</i>	<i>MRMR /DRMS (LAUBSCHER)</i>
<i>Uniaxial compressive strength</i>	•	•		•	•
<i>Rock quality index (RQD)</i>	•		•		•
<i>Discontinuities spacing</i>	•			•	•
<i>Discontinuities conditions</i>	•		•	•	•
<i>Groundwater conditions</i>	•	•	•		•
<i>Orientation of discontinuities</i>	•		•		•
<i>Number of joint sets</i>		•	•		
<i>Roughness of discontinuities</i>		•		•	
<i>Alteration of discontinuities</i>		•	•	•	
<i>Stress reduction factor</i>		•	•		
<i>In-situ and induced stress</i>					•
<i>Blasting and weathering</i>					•

7.3 Dimensionierung von untertägigen Hohlräumen in Marmor

Die Planung und Schaffung von Hohlräumen zur untertägigen Gewinnung von Marmor setzt nicht nur eine gute Kenntnis der zu erwartenden Gesteinsqualität und des Trennflächeninventars voraus, sondern erfordert auch eine sehr sorgfältige Prognose der Standfestigkeiten des Gesteinskörpers. Anordnungen und Dimensionierungen der Abbaukammern und der tragenden Festen (Pfeiler) sind von entscheidender Bedeutung für die Sicherheit der Untertagegewinnung des Naturwerksteins. Die Adaption von Techniken, wie sie in anderen Bereichen des Bergbaus oder auch des Tunnelbaus praktiziert werden, ist nur mit Einschränkungen möglich.

In das WBS konnten als Entscheidungshilfen für die Planung des untertägigen Marmorabbaus nur stark vereinfachte gebirgsmechanische „Faust“-Regeln implementiert werden, die jeweils vor allem von den herrschenden Trennflächenverhältnissen ausgehen.

Um die Standfestigkeit einer Feste zu ermitteln, muss das Gestein, in dem die Feste aufgefahen wird, geotechnisch detailliert untersucht werden. Um das geotechnische in-situ Stressverhalten von Marmor zu bestimmen, wurden im Rahmen des Projektes CAD-

PUMA von CNR Messungen (Tabelle 8) und von POLITO und INERIS Modellierungen durchgeführt. Basierend auf den in den Untersuchungsbergwerken gemessenen Daten konnten von diesen Arbeitsgruppen Modelle über die Festen- und die Blockstabilität entwickelt werden. Mithilfe der Grenzelementmethode (Boundary Element Method, BEM) wurden in einem Netz aus Trennflächen- bzw. Blockdaten mit Informationen über das gesteinsphysikalische Verhalten des Marmors und damit mögliche Stabilitäten von Hohlräumen und Festen ermittelt. Das zu untersuchende geomechanische System eines Hohlraumes mit einer Feste in einem Gebirgskörper wird in ein Netzwerk von Polygonen zerlegt, die verschiedene Eigenschaften haben und an ihren Grenzflächen in Wechselwirkung treten. Mit Hilfe von 2D und 3D BEM (Boundary Element Method) Analyse ist es möglich, die Einflüsse auf den Flächen (Polygone) in verschiedenen Konfigurationen zu simulieren.

Trennflächen in einer Feste sind prinzipiell unerwünscht, da sie die Standfestigkeit durch Reduzierung der Tragfähigkeit herabsetzen. Dabei ist jedoch die Qualität, die Raumlage

und die Anzahl der Trennflächen entscheidend.

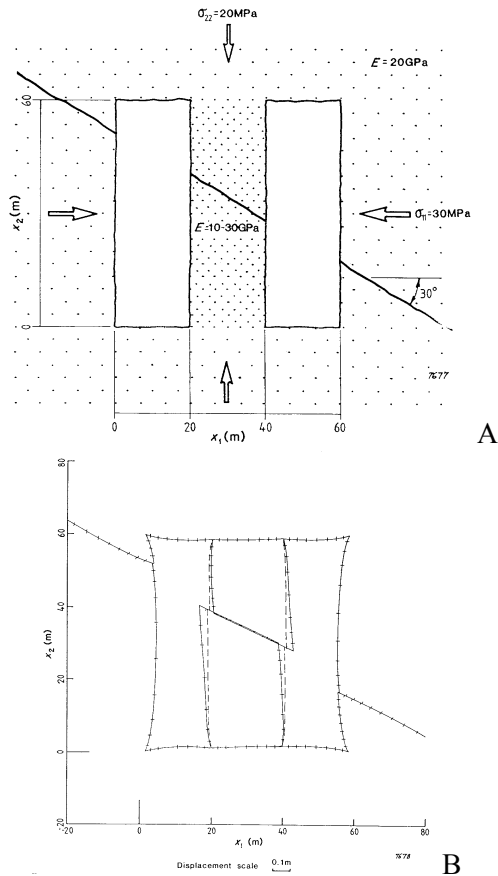


Abb. 141 Hohlraum in einem homogenen Gesteinskörper (A) der von einer Störung durchzogen wird und die daraus entstehenden Deformationen an einer darin aufgefahrenen Feste (B) (PANDE et al. 1990).

PANDE et al. (1990) z. B. beschreibt die folgende Situation in einem Raum, der durch eine Störung in zwei Bereiche getrennt wird (siehe Abb. 141). Eine Trennfläche durchschneidet die Feste. Durch die Spannungsverteilung im Gebirgskörper kommt es an der Trennfläche in der Feste zur Deformation und zum Versatz. In dem dargestellten Beispiel handelt es sich um ein stark vereinfachtes Modell.

In einem nur eingeschränkt homogenen Gesteinspaket mit vielen Trennflächen wie einem Marmorvorkommen wird die Modellierung komplexer. Die detailgenaue Aufnahme

aller Trennflächen, samt ihrer Eigenschaften und Anordnung, spielt für die gebirgsmechanische Modellierung eine entscheidende Rolle. Trennflächen haben unterschiedliche Raumlagen, Formen, Abstandsweiten, Füllungen, Oberflächen, die zusammengenommen für die Reibungsverhältnisse entscheidend sind (Abb. 142). Eine standardisierte Ansprache dieser Eigenschaften bei der Aufnahme ist daher sehr wichtig.

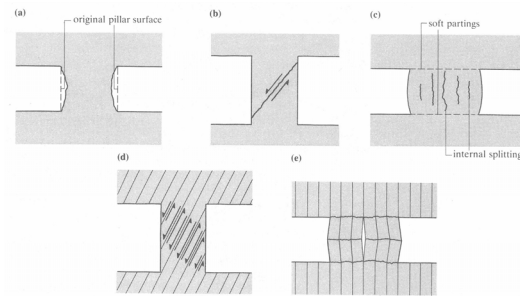


Abb. 142 Einfluss der unterschiedlichen Raumlage von Trennflächen auf eine Feste (PANDE 1990).

An den Festen können zwei verschiedene Phänomene beobachtet werden:

- Verschiebung entlang vorhandener Trennflächen
- Entstehung neuer Trennflächen unter einem Winkel zur Festenachse, der dem Winkel der Inneren Reibung entspricht.

Festen, die eine lange Standzeit haben und aufgrund ihrer Teufenlage dem Druck einer mächtigen Überdeckung ausgesetzt sind, zeigen Veränderungen an den Festenkanten. Die Form der Festen passt sich den Druckverhältnissen an. Dabei lösen sich Marmorbruchstücke in den Randbereichen, besonders an den Ecken ab (Abb. 142 a). Es entsteht der typische „Sanduhr“-Querschnitt.

Treten wenige Trennflächen auf, die die Feste durchkreuzen, ist besonders der Einfallswinkel der Trennflächen zu beachten. Besonders kritisch sind in diesen Fällen Winkel um $65^\circ \pm 10^\circ$, die eine Festenstandfestigkeit dramatisch herabsetzen (IANNACCHIONE 1999) (siehe auch Kap. 6.2.2).

In den untersuchten Steinbrüchen wird derzeit nur in einer Ebene/Sohle abgebaut. Sollten

Abbaukammern übereinander in unterschiedlichen Teufenlagen aufgefahen werden, muss die Konstellation der Festen diesen erhöhten Anforderungen entsprechen. Um Stand-sicherheiten der Abbaukammern in dieser Anordnung zu beurteilen, liegen derzeit für die Marmorfesten keine ausreichenden Informationen vor.

Bei der Anordnung der Festen wird ein orthogonales System bevorzugt, aufgrund der zu gewinnenden rechtwinkligen Rohblöcke. Kammern und Festen sollten sich mit einer äquidistanten Anordnung und einer errechneten optimalen Spannweite der Hohlräume durch das Marmorlager erstrecken. Unter Berücksichtigung von den nahe einer freien Oberfläche entstehenden entspannungsbedingten Trennflächen (siehe Kap. 6.2.2), ist direkt im Hang meist eine breite Feste zu empfehlen bzw. der Zugang zu einem untertägigen Hohlraum klein dimensioniert zu halten.

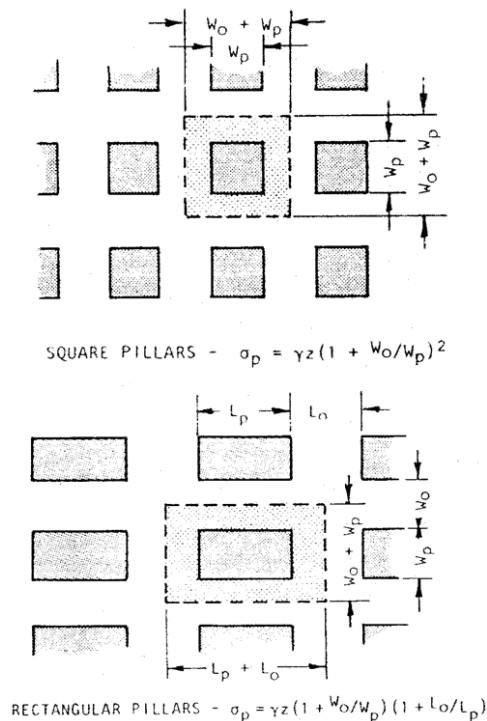


Abb. 143 Bei unterschiedlicher Festengeometrie wird die durchschnittliche Festigkeit (Standfestigkeit (σ_p)) unterschiedlich berechnet (Hoek & Brown, 1980).

Die Standfestigkeiten (Abb. 143) der Festen/Pfeiler müssen in erster Linie die Anforderungen an einen sicheren untertägigen Hohlraum erfüllen. Der dabei zu erreichende Sicherheitsfaktor F ist wie folgt definiert:

$$F = \frac{\text{Festen-Tragfähigkeit}}{\text{Festenbelastung}}$$

Ist $F > 1$, ist die Sicherheit gewährleistet.

Die Standfestigkeit kann bei der untertägigen Gewinnung von Marmor und den dort auftretenden großformatigen Primärblöcken jedoch nicht nur vom Querschnitt der Festen und der Dimensionierung der Spannweiten zwischen den Festen beurteilt werden. Der Durchtrennungsgrad der Festen im Marmor ist in der Regel sehr gering. Problematisch sind oft nur einzelne Trennflächen, die das geomechanische Verhalten entscheidend beeinflussen. Die Untersuchungen der Gruppe POLITO im Projekt CAD-PUMA nutzten die *RESOBLOK*-Modelle zur geomechanischen Analyse in 3DEC (Abb. 144).

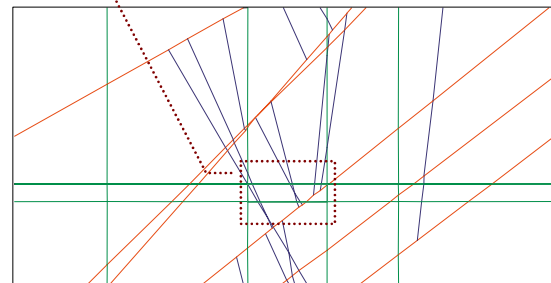


Abb. 144 In 3DEC modelliertes Trennflächenmodell eines untertägigen Hohlräume basierend auf dem *RESOBLOK*-Modell zur Ermittlung instabiler Blöcke.

Die in den experimentellen Festen aufgenommenen Trennflächen wurden in 3DEC modelliert. Als Basisdaten für die geomechanischen Eigenschaften wurden die Untersuchungen der Gruppe CNR zu Grunde gelegt. Somit konnte ein sehr realistisches Modell der gegebenen Situation erstellt werden. Die Modellierung und Simulation sollte die in Folge der Auffahrungen eintretenden Druck-

veränderungen und Freilegung von Blöcken und deren Einflüsse auf die Festen und Abbaukammern untersuchen. Der bei der Auffahrung entstehende Versatz der Primärblöcke aufgrund der veränderten Spannungsverhältnisse und das Lösen von Blöcken aus den Gesteinsverband durch die Auffahrung sollte durch die Simulation ermittelt werden. Als Ergebnis der Analyse entstand eine Darstellung der instabilen Blöcke im Kontakt zum untertägigen Hohlraum (Abb. 144).

Das Ergebnis der Simulation (Abb. 145) sollte zeigen, ob die im Rahmen des Projektes geforderten Abbaukammernhöhen von 23 m ohne Sicherheitseinbußen erreicht werden können. Die Simulation ergab, dass diese Höhen der Festen und Kammern keine generelle Bruchgefahr verursachen können.

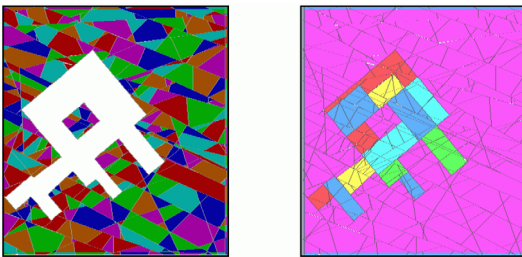


Abb. 145 Modellierter Abbaufortschritt in *RESOBLOK*-Modell (rechts). Ausgangspunkt der 3DEC Simulation mit Abbaufortschritt links (DMCO Site B, modelliert von POLITO 2002).

Durch die Freilegung einiger Primärblöcke in den Festen entstehen allerdings nur schwer zu kalkulierende Instabilitäten. Ebenso verhält es sich bei der Vergrößerung der Hohlraumweite. Hierbei werden ebenfalls Blöcke freigelegt, die den Abbau erheblich gefährden können, wenn vorher keine Sicherung angebracht wird (Abb. 146).

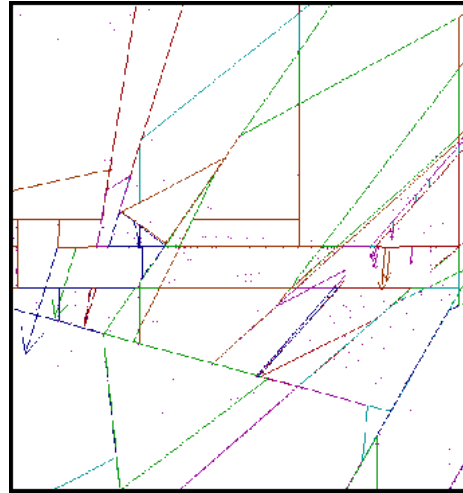


Abb. 146 Profildarstellung des Hohlraumes (Höhe 4,3 m, Breite 43 m) und von DMCO Site B mit instabilen Blöcken in der Firste. Mögliche Fallrichtungen der Blöcke sind mit einem Pfeil gekennzeichnet (modelliert von POLITO, 2002).

Entscheidend für die Einschätzung der Stabilität eines Hohlraumes im Marmor ist nach den Ergebnissen der Untersuchungen von POLITO die detaillierte Aufnahme der Trennflächen bezüglich ihrer Raumlage sowie die Bestimmung der instabilen Blöcke in der Firste und in den Festen.

Prinzipiell gilt in dieser Hinsicht als Regel für die Beurteilung der Marmorlagerstätte: Je geringer die Anzahl von Trennflächen ist, desto günstiger wirkt sich dies auf die Abbauplanung aus. Die Auffahrung der Festen und der Hohlräume kann dann bis zu einer Höhe von etwa 23 m problemlos durchgeführt werden. Sollten größere Abbaukammernhöhen erreicht werden, sind im Falle der untersuchten Steinbrüche weitere Simulationen notwendig.

Entscheidend ist die Anzahl der Trennflächen. Sie ist maßgebender Faktor der Bewertung des RMR eines Gesteins. Die hier erzielten Ergebnisse sind z.B. auch von WANG et al. (2002) bei der statistischen Untersuchung von Öffnungsweiten bestätigt worden.

Um eine Aussage über die möglichen Abhängigkeiten zwischen Festendimensionierung und zu erwartender abbaubarer Marmor-

ge zu treffen, bietet sich das Extraktions-Verhältnis e (Extraction Ratio) an (IANNACCHIONE, 1999). Es kann aus den Dimensionierungen eines möglichen Hohlraumes ermittelt werden:

$$e = \frac{(w + r) * (l + r) - w * l}{(w + r) * (l + r)}$$

mit e = Extraction Ratio, w =Festenbreite, l =Festlänge und r =Hohlraumweite.

Für die errechneten Festen-Dimensionierungen kann der zu erwartende durch-

schnittliche Druck auf die Feste nach IANNACCHIONE (1999) ermittelt werden mit:

$$\sigma_a = \sigma_1 * \frac{(r + w) * (r + l)}{w * l}$$

σ_a = durchschnittlicher Druck auf die Feste nach dem Abbau, σ_1 = Druck (in-situ) auf das Gebirge vor dem Abbau, w =Festenbreite, l =Festlänge und r =Hohlraumweite.

Für die im Projekt aufgefahrenen Festen sind die Ergebnisse dieser Auswertung in folgender Tabelle 14 dargestellt.

Tabelle 14: Festendimensionierung und Extraktionsverhältnis Ratio der Festen im Projekt CAD-PUMA.

Steinbruch:	Höhe der Feste am Beginn der Testphase [m]	Höhe der Feste am Ende der Testphase [m]	Breite / Länge der Feste [m]	Öffnungsweite des Hohlraumes [m]	sigma_1 auf die Tiefe bezogen [Mpa]	Durchschnittlicher Druck auf die Feste [Mpa]	Mächtigkeit der Überdeckung in Metern [m]	Breiten / Höhen Verhältniss der Feste zu Beginn [m]	Breiten / Höhen Verhältniss der Feste am Ende des Projektes [m]	Extraction Ratio / Extraktionsverhältnis am Ende der Testphase
DMCO A	3	12	15	10	1,59	4,41	60	5,00	1,25	0,64
DMCO B	3	12	14,5	6	1,06	2,12	40	4,83	1,21	0,50
CCLL	4	23	15	8	2,91	6,85	110	3,75	0,65	0,57
Lasa	3,5	23	20	12	5,56	14,23	210	5,71	0,87	0,61

Die ermittelten Werte sind in der folgenden Abbildung 147, modifiziert nach IANNACCHIONE (1999), eingetragen. Demnach ergibt sich ein niedriges Extraktions-Verhältnis (Extraction Ratio) bei der im Projekt angesetzten Konstellation von Festendimensionierung und umgebenden Hohlraum. Der durchschnittliche Druck σ_a liegt aber für die Festen nach IANNACCHIONE (1999) noch relativ weit im unteren, bzw. sicheren Bereich. Eine Aufweitung des Hohlraumes ist auch nach diesen Berechnungen durchaus noch möglich. Diese Methode kann nur eine grobe Abschätzung sein und ist als Richtschnur im WBS integriert. Festendimensionierungen bzw. Hohlraumweiten werden im WBS nur für Vorkommen ohne bereits existierenden untertägigen Abbau empfohlen. Dabei werden sie aus dem RMR bzw. Q-System abgeleitet.

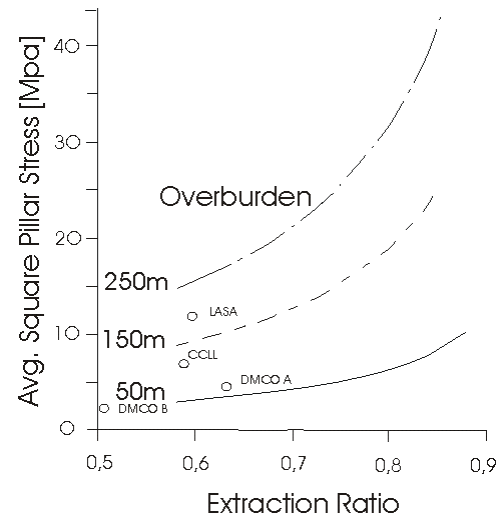


Abb. 147 Einfluss des durchschnittlichen Druckes auf die Festen (für eine Feste mit 13,5 m Seitenlänge); als Linien eingezeichnet jeweilige Überdeckung (Overburden) in m auf das Extraktions-Verhältnis (Extraction Ratio) e . Die Werte für die Festen des CAD-PUMA Projektes sind jeweils eingetragen.

Die so ermittelten Werte für die möglichen Hohlraumweiten liegen in der Regel 30 % unter denen der im Projekt untersuchten bzw. aufgefahrenen Hohlräume.

Eine Analyse der existierenden Hohlraumweiten im Marmor wurde auf Basis der vorliegenden Grubenrisse erstellt. Stellt man die Mächtigkeit des überdeckenden Gebirges zu den Hohlraumweiten wie in Abbildung 148 in Beziehung, können keine eindeutigen Abhängigkeiten abgeleitet werden. Bei größeren Hohlraumbreiten ist die Mächtigkeit der Überdeckungen etwas geringer. Ein signifikantes Ergebnis kann aufgrund der geringen Daten jedoch nicht geliefert werden. Offenbar ist die erzielbare Weite der Kammern auch vom Trennflächeninventar und den jeweils getroffenen Sicherungsmaßnahmen abhängig.

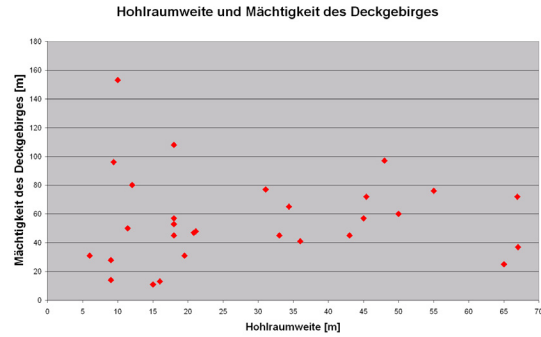


Abb. 148 Hohlraumweite und Mächtigkeit des Deckgebirges in den Abbaukammern der beteiligten Industriepartner

Bei bereits existierenden untertägigen Aufahrungen ist eine detaillierte Beurteilung direkt durch die Begutachtung der bestehenden bergmännischen Hohlräume möglich. Eine Einschätzung durch das WBS ist bezüglich der Festendimensionierung bei existierenden Hohlräumen dann überflüssig und deshalb im System auch nicht realisiert.

Um einen Eindruck von den Dimensionen zu vermitteln zeigt die folgende Abbildung 149 die Situation im Steinbruch Lasa mit den Entfernungen des Schiefers von der Firste des abgebauten Bereiches und der Mächtigkeit des Schiefers über den Testfesten.

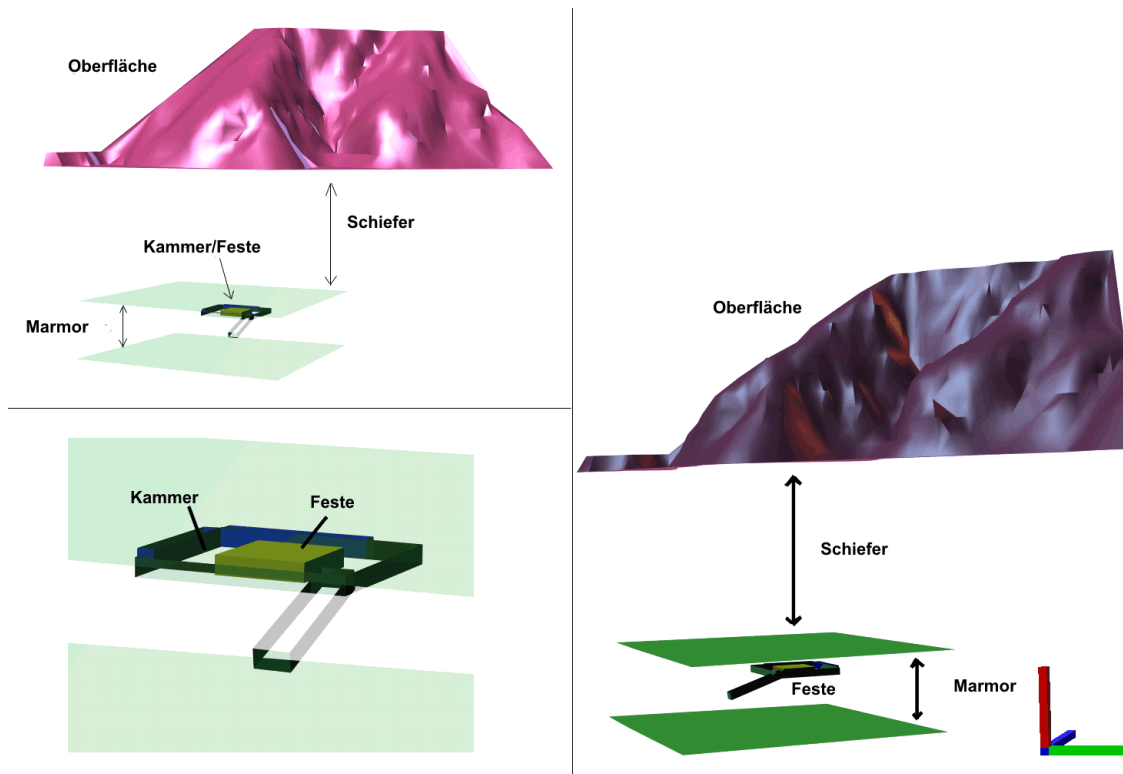


Abb. 149 3D-Modell des experimentellen Abbaus in Lasa, Kammer und Feste im Marmor mit mächtiger Überdeckung durch Schiefer (Festenbreite in Lasa 20x20m).

8 Schlussfolgerungen

8.1 *Einschätzung des mit einem wissensbasierten Entscheidungshilfe-System erreichbaren Optimierungserfolgs*

Der Aufbau des hier vorgelegten wissensbasierten Entscheidungshilfe-Systems und die Systematik seiner Struktur stellen die grundlegenden Informationen bereit, die für eine untertägige Gewinnung von Marmor notwendig sind. Damit ist das WBS bei der Planung und Optimierung der untertägigen Gewinnung von Marmor in der Lage, dem Anwender die notwendigen Daten und Funktionen zur Beurteilung einer Marmorlagerstätte bereitzustellen. Mit der verwendeten Software (MS Access, Elements Expert, Banxia Decision System jeweils unter Windows und RESOBLOK unter Linux) und dem im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Quellcode steht ein umfangreiches und vielseitiges Instrumentarium zur Bewertung einer Marmorlagerstätte und der Option auf ihre untertägige Gewinnung zur Verfügung.

Das WBS und die verwendete Softwareperipherie ermöglichen dem Anwender bei der Planung der untertägigen Gewinnung von Marmor in erster Linie die systematische Berücksichtigung relevanter **geowissenschaftlicher Einflussgrößen** und geben ihm auch Hinweise auf Lücken in der Erfassung der geowissenschaftlichen Rahmenbedingungen. Die Analyse des Systems zur Gewinnung von Marmor untertage zieht alle wichtigen geologischen Einflussgrößen in Betracht und unterzieht sie einer Bewertung in Hinblick auf das Planungsvorhaben. Dabei stellt das WBS dem Anwender auch das notwendige Methodeninventar zur Verbesserung des Kenntnisstandes zur Verfügung. So kann der Anwender etwa Verfahren und Daten zur Bewertung der Qualität des Marmors und seiner geotechnischen Eigenschaften aus dem System beziehen und eine entsprechende Beurteilung der für die Marmorlagerstätte verfügbaren Informationen erhalten.

Zu den geowissenschaftlichen Faktoren, die die maximal gewinnbare Marmor Menge einer Lagerstätte entscheidend beeinflussen, gehören die Ausbildung des **Trennflächeninventars** und die **supergene Alteration** des Marmors. Die Erfassung von Art und Ausmaß der durch verwitterungsbedingte Einflüsse (Verkarstung) bewirkten Alteration der Marmor masse ist sowohl für die Einschätzung der zu erwartenden Qualitätsverteilung als auch für die Beurteilung der Stabilitätsverhältnisse untertägiger Hohlräume von großer Bedeutung.

Bei der Optimierung eines zukünftigen oder existierenden Grubenlayouts sind gute Ergebnisse nur unter Berücksichtigung der räumlichen Verteilung von Trennflächen und gesteintechnischen sowie ästhetischen Gesichtspunkten zu erwarten. Das WBS eröffnet dem Anwender hierzu die Möglichkeiten der quantitativen Erfassung des Trennflächeninventars zur Einschätzung des Rohblockausbringens und gibt Hinweise auf die Stabilität untertägiger Abbaukammern. Die räumliche Erfassung und Prognose der **Rohblockverteilung** bieten in die Praxis umsetzbare Möglichkeiten zur Optimierung des Layouts eines untertägigen Hohlraumes nach Größe, Form und besonders der Orientierung. Auf dieser Grundlage ergeben sich auch Konsequenzen für die **bergtechnische Sicherheit** und Auslegung von Abbaukammern. Vom System wird darauf verwiesen und Empfehlungen für mögliche Öffnungsweiten der Hohlräume werden gegeben.

Durch die Befolgung der vom System ausgegebenen Empfehlungen zur optimalen Gewinnungsstrategie kann der Anwender die **Wirtschaftlichkeit** der Nutzung der in der Lagerstätte verfügbaren Marmorressourcen verbessern bzw. eine Kostenminimierung anstreben.

Durch die Nutzung des WBS wird der Anwender also insgesamt in die Lage versetzt, Entscheidungen über die untertägige Gewinnung von Marmor unter Qualitäts-,

Quantitäts-, Sicherheits- und - zumindest ansatzweise – auch Kostenaspekten zu treffen.

8.2 Unabdingbare Voraussetzungen

Grundsätzlich notwendige Informationen für die Nutzung des WBS sind detaillierte Kenntnisse über die geologische Situation insbesondere bezüglich der Lagerungsverhältnisse und der geomechanischen Eigenschaften des Marmors. Ohne diese Eckdaten ist eine Beurteilung der Eignung eines Marmorvorkommens für die untertägige Gewinnung auch mit Hilfe des WBS nicht möglich. Das Ergebnis der Beurteilung des Marmorvorkommens hängt dabei direkt von Umfang und Qualität der Eingaben in das System ab. Je mehr Informationen in das System fließen, um so höher ist der resultierende Aussagewert. Um den Verantwortlichen für Planung und Auffahrung eines untertägigen Hohlraumes genügend Anhaltspunkte zu liefern, müssen mindestens geologische Kartierungen und Detailaufnahmen des Trennflächeninventars von Geländeaufschlüssen vorhanden sein. Eine räumliche Darstellung der geologischen Strukturen bietet eine optimale Voraussetzung für eine Beurteilung eines Vorkommens bzw. einer Lagerstätte.

8.3 Zusätzlicher Informationsbedarf – Mögliche Weiterentwicklung – Ausblick

Im Hinblick auf zukünftige Möglichkeiten der Nutzung und Weiterentwicklung eines verbesserten Wissensbasierten Systems ist umfangreicher zusätzlicher Informationsbedarf gegeben. Besonders hilfreich wären geostatistische Untersuchungen zur räumlichen Verteilung von Qualitätsmerkmalen des Marmors, wie sie für einige Naturwerksteinlagerstätten bereits vorgelegt worden sind (siehe etwa Albuquerque et al. 1999, Taboada et al. 1997 und 1999). Notwendig wäre hierfür eine systematische Erfassung ortsabhängiger Eigenschaften wie Rohblockdimension und qualitätsbestimmender ästhetischer Merkmale

in Marmorsteinbrüchen. Ein Bewertungsschlüssel, der auch aus dem WBS abgeleitet werden kann, könnte als Attribut an eine Rohblockdatenbank gekoppelt werden.

Sehr hilfreich wäre eine systematische Kontrolle und Verifizierung der Empfehlungen des WBS in einem neu anzulegenden Tiefbau auf Marmor, da bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen jeweils von Betrieben mit bereits existierender untertägiger Gewinnung ausgegangen werden musste bzw. konnte. Dies würde eine weitere Möglichkeit der Kalibrierung des Systems bedeuten, mit der die Aussagegenauigkeit wesentlich verbessert werden könnte. Dieser Schritt sollte auch mit einer systematischen vergleichenden Kostenerfassung für die untertägige Marmorgewinnung verknüpft werden.

Für die Planung und Bewertung der ober- und untertägigen Werksteingewinnung wäre auch die Entwicklung von Lagerstättenmodellen bzw. eines Klassifikationssystems für Naturwerkstein- und insbesondere Marmorlagerstätten nützlich. Eine derartige Lagerstättensystematik könnte beim Aufschluss des Vorkommens und auch bei der Untersuchung und Bewertung existierender Abbaustrategien hilfreich sein.

Für eine künftige weitere Verlagerung der Naturwerksteingewinnung nach Untertage wären auch zusätzliche detaillierte Untersuchungen zur gesteins- und strukturabhängigen Dimensionierung von Festen und Hohlräumen im Marmor anzustreben.

In einem in der Praxis einzusetzenden Endprodukt des WBS sollten die Beurteilungsmechanismen des Regelwerkes und die grafische Auswertung der räumlichen Parameter im Zusammenhang dargestellt werden können. Dazu wäre die Portierung der verschiedenen Programme, die in der vorliegenden Untersuchung entwickelt und verwendet wurden, auf ein einheitliches Betriebssystem erforderlich.

9 Literatur

- Al Homou, A. S. & Tahtamoni, W. W., 2000. SARETL: an expert system for probabilistic displacement-based dynamic 3-d slope stability analysis and remediation of earthquake triggered landslides. *Environmental geology* v. 39 (8), p. 849-874.
- Albuquerque, T., Sousa, J. & Pereira, H., 1999. Kriging with external drift and soft kriging in the characterization of a marble region. In: *APCOM '99, 28th Intern. Symp. on Computer Application in the Minerals Industries* (edited by., Colorado, p. 249 - 256.
- Balch, R. S., Weiss, W. W., Wo, S. & Hart, D. M., 2000. Regional data analysis to determine production trends using a fuzzy expert exploration tool. DeMis, W. D., Nelis, M. K. & Trentham Robert, C. (ed) *In: The Permian Basin; proving ground for tomorrow's technologies*. West Texas Geological Society. Midland, TX, United States. 2000.
- Barouhdi, H., Piguet, J. P., Chambon, C. & Asof, M., 1990. Utilization of the block generator "RESOBLOK" to complex geologic conditions in an open pit mine. In: *Inter. Conf. on Mechanics of Jointed and Faulted Rock* (edited by Rossmanith). Balkema, Vienna, p. 529-539.
- Barton, N. & Grimstad, E., 1994. The Q-System following twenty years of application in NMT support selection. *Felsbau* v. 12 (6), p. 428-436.
- Barton, N., Lien, R. & Lunde, J., 1974. Engineering classification of rock masses for design of tunnel support. *Rock Mechanics* v. 6, p. 189-236.
- Basu, A. J. & Lineberry, G. T., 1992. Evaluation of a prototype expert system for configuring the underground coal mines. In: *23rd Application of computers and operations research in the mineral industry* (edited by Kim, Y. C.). University of Arizona, Soc. for Mining, Metallurgy and Exploration, Pennsylvania State University, p. 899-908.
- Baumgarten, B., Folie, K. & Stedingk, K., 2000. Auf den Spuren der Knappen, Bergbau und Mineralien in Südtirol. Tapeiner, Lana (Bozen), Italien. p. 287.
- Bennett, J. G., 1936. Broken coal. *Jour. Inst. Fuel*. v. 10, p. 22-39.
- Berwanger, S. & Helms, W., 1998. Ökologische und technisch-wirtschaftliche Untersuchung einer untertägigen Hartgesteinsgewinnung: Abschlußbericht zu einem von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt unter dem Aktenzeichen 00654 geförderten Forschungsvorhaben. Clausthal, p. 388.
- Bieniawski, Z. T., 1974. Estimating the strength of rock materials. *J SAfr Inst. Min. Metall*, p. 312-320.
- Bieniawski, Z. T., 1989. *Engineering rock mass classifications*. Wiley, New York. p. 251.
- Bieniawski, Z. T., 1992. *Design methodology in rock engineering: theory, education and practice*. Balkema, Netherlands, Rotterdam. p. 198.
- Biethahn, J. & Hoppe, U., 1991. *Entwicklung von Expertensystemen*, Wiesbaden. p. 300.
- Börner, K. & Hill, D., *Große Enzyklopädie der Steine*. Börner, K. Last access: 6.11.02. <http://www.abraxas-verlag.de/>.
- Bradley, F., 1997. *Guide to the marble quarries in Carrara*. Internationale Marmi e Macchine Carrara, Luca, Italy. p. 95.
- Bradley, F., 1999. *Marble quarrying - technical and commercial manual*. Industrie Grafiche Pacini, Pisa.
- Braun, A., 1975. Die genetische Deutung natürlicher Haufwerke mit Hilfe des doppeltlogarithmischen Körnungsgesetzes nach ROSIN, RAMMLER und SPERLING (DIN 4190). *Z. dt. geol. Ges.* v. 126, p. 199-205.
- Breunig, M., Heyer, G., Perkhoff, A. & Seewald, M., 1991. An expert system to support mine planning operations. Karagiannis, D. (ed) *In: Database and expert systems applications; proceedings of the international conference in Berlin*. Springer, Vienna [u.a.], Austria, 293-298.

- Brown, E. T., 1981. Rock characterization - testing and monitoring: ISRM suggested methods. Pergamon Press.
- Bruno, R., Montoto, M. & Paspaliaris, I., 2004. Characterisation methodologies and norms. In OSNET Editions 5. Laboratory of Metallurgy, National Technical University of Athens, Athens, p. 185.
- Cai, J. G., Zhao, J. & Hudson, J. A., 1998. Computerization of rock engineering systems using neural networks with an expert system. *Rock Mechanics and Rock Engineering* v. 31, p. 135-167.
- Camm, T. & Smith, M. L., 1992. An object-orientated expert system for underground mining method selection and project evaluation. In: *23rd Application of computers and operations research in the mineral industry* (edited by Kim, Y. C.). University of Arizona, Soc. for Mining, Metallurgy and Exploration, Pennsylvania State University, p. 909-916.
- Carmignani, L., Giglia, G. & Kligfield, R., 1978. Structural evolution of the Apuane Alps; an example of continental margin deformation in the northern Apennines. Italy. *Journal of Geology* v. 86 (4), p. 487-504.
- Chabas, A. & Jeannette, D., 2001. Weathering of marbles and granites in marine environment: petrophysical properties and special role of atmospheric salts. *Environmental Geology* v. 40 (3), p. 359-368.
- Cheimanoff, N. M. & Schleifer, J., 1990. Short term scheduling of underground mines with artificial intelligence: The Bonanza Approach. Proc. XXII Symposium APCOM, Berlin v. II, p. 245-255.
- Cramer, T., 2004. Methodik der multivariaten Charakterisierung von Marmoren auf petrographischer, geochemischer und isotopegeochemischer Basis - das Beispiel der Herkunftsbesimmung kleinasiatischer archaischer hellenistischer Objekte der Berliner Antikensammlung zu mediteranen und anatolischen Marmorlagerstätten., TU Berlin.
- Crassoulis, C., Kapenis, A., Thoraval, A., Ferrero, M., Germann, K., Iabichino, G., Gardenato, M. & Dell' Antone, F., 1999. Development of an integrated computer aided design and planning methodology for underground marble quarries. Eurothen'99, p. 559.
- Crassoulis, C., Kapenis, A., Thoraval, A., Ferrero, M., Germann, K., Iabichino, G., Gardenato, M. & Dell' Antone, F., 2000. Development of an integrated computer aided design and planning methodology for underground marble quarries. Eurothen 2000, p. 559.
- Curth, M., Bölscher, A. & Raschke, B., 1991. Entwicklung von Expertensystemen. Hanser, München; Wien. p. 237.
- de la Vergne, J. N., 2003. Hard Rock Miner's Handbook. McIntosh Engineering, Otario, Canada. p. 330.
- Deere, D. U. & Deere, D. W., 1988. The rock quality designation (RQD) index in practice. In: Kirkaldie, L., (ed), *Rock Classification Systems for Engineering Purposes*. 984. ASTM Spec. Publ., p. 91-101.
- Dieb, A. & Paspaliaris, I., 2003. Health and safety in ornamental stone industry: current situation - risk assessment and safety on quarries and processing plants. In OSNET Editions 3. Laboratory of Metallurgy, National Technical University of Athens, Athens, p. 232.
- DIN 66145, 1974. Darstellung von Korn-(Teilchen-)größenverteilungen RRSB-Netz. Fachnormenausschuß Siebböden und Kornmessung (FNSK) im Deutschen Institut für Normung e.V.(1-3).
- DIN EN 1467, 1994. Naturstein - Rohblöcke - Spezifikationen. Normenausschuß Materialprüfung (NMA) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V., p. 1-5.
- DIN EN 1468, 1994. Naturstein - Halbfertigerzeugnisse (Rohplatten). Normenausschuß Materialprüfung (NMA) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V., p. 1-5.
- DIN EN 12670, 1997. Terminologie von

- Naturstein. Normenausschuß Materialprüfung (NMP) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Normenausschuß Bauwesen (NaBau) im DIN, p. 1-85.
- Drysdale, R., Pierotti, L., Piccini, L. & Baldacci, F., 2001. Suspended sediments in karst spring waters near Massa (Tuscany), Italy. *Environmental Geology* v. 40, p. 1037-1050.
- Duda, R. O., Hart, P. E. & Einaudi, M. T., 1980. The encoding and use of ore deposit models in the PROSPECTOR consultation program. *Proceedings - Geoscience Information Society* v. 10, p. 119-125.
- Eisbacher, G. H., 1996. Einführung in die Tektonik. Ferdinand Enke, Stuttgart. p. 374.
- Engelhardt, I. & Wycisk, P., 2001. Umweltverträgliche Natursteingewinnung und Regionalplanung. *Erzmetal* v. 5, p. 248-254.
- Ewan, V. J., West, G. & Temporal, J., 1983. Variation in measuring rock joints for tunnelling. *Tunnels & Tunnelling* v. 3, p. 15 - 18.
- Fabian, J., 1998. Ein System zur Unterstützung der mittelfristigen Abbaureihenfolgeplanung im Eisenerztiefbau durch Integration von wissensbasierten Techniken und Techniken der Unternehmensforschung., Technische Universität Berlin.
- Feng, Q., Sjögren, P., Stephansson, O. & Jing, L., 2001. Measuring fracture orientation at exposed rock faces by using a non-reflector total station. *Engineering Geology* v. 59, p. 133-146.
- Ferrero, A. M. & Marini, P., 2001. Experimental studies on the mechanical behaviour of two thermal cracked marbles. *Rock Mech. Rock Engng.* v. 34 (1), p. 57-66.
- Frizado, J., 1992. Management of geological databases. Pergamon Press, England, Oxford. p. 250.
- Gabriel, R., 1992. Wissensbasierte Systeme in der betrieblichen Praxis. McGrawhill, Hamburg, New York. p. 395.
- Gerhardt, H., Steinmetz, R. & Wilke, L., 1995. Wissensbasierte bergmaennische Planung(ed) *In: XLVI. Berg- und Huettenmaennischer Tag vom 14. bis 17. Juni 1995; Abstracts.* TU Bergakad., Freiberg, 34.
- Germann, K., Koch-Moeck, M., Crassoulis, G., Kazatsanidis, L., Thoraval, A., Ferrero, M., Iabichino, G., Gardenato, M. & Dell'Antone, F., 2001. Development of an integrated computer aided design and planning methodology for underground marble quarries. *In: Eurothen 2001 - Proceedings of the fourth annual workshop* (edited by Paspaliaris, I., Taxiarchou, M., Adjemian, A. & Katalagarianakis, G.). *Eurothen*. Laboratory of Metallurgy, National Technical University of Athens, Stockholm, Sweden, p. 209-236.
- Gwosdz, W., Classification of Reserves/Resources with the UN Framework Classification System. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Last access: 11.06.2002. http://www.bgr.de/b122/classification_dok23.htm.
- Hadjigeorgiou, J., Grenon, M. & Lessard, J. F., 1998. Defining in-situ block size. *CIM* v. 91 (1020), p. 72-75.
- Harada, M., Tezuka, S., Hiyane, K., Sasada, M. & Narita, N., 1994. GEMS; geothermal expert modelling system. Dimitrakopoulos, R., McCammon R., B. & Shoji, T. (ed) *In: Expert systems and artificial intelligence in the applied geosciences; 26th international geological congress.: Mathematical Geology 26.* Plenum [for the] International Association for Mathematical Geology, New York-London, International, 899-915.
- Heliot, G., 1988. Generating a blocky rock mass. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* v. 25 (3), p. 127-138.
- Higgins, M., D. & Higgins, R., 1996. A geological companion to Greece and the Aegean. Duckworth, London. p. 240.
- Hoeck, E., 1998. Putting numbers to geology - an engineer's viewpoint. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* v. 32 (1), p. 1-19.

- Hoeck, E. & Bray, J., 1981. Rock slope engineering, revised 3rd ed. Institution of Mining and Metallurgy, London. p. 385.
- Hoeck, E. & Brown, E. T., 1980. Empirical strength criterion for rock masses. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE* v. 106 (No GT9), p. 1013-1035.
- Hoeck, E., Kaiser, P. K. & Bawden, W. F., 1995. Support of underground excavation in hard rock. Balkema, Rotterdam. p. 300.
- Iannacchione, A. T., 1999. Analysis of pillar design practices and techniques for U.S. limestone mines. *Trans. Inst. Min. Metall. (Sec. A: Min. industry)* v. 108, p. 152-160.
- Ibbeken, H. & Schleyer, R., 1991. Source and sediment - a case study of an provenance and mass balance at an active plate margin (Calabria, Southern Italy). Springer Verlag, Berlin.
- Jacobshagen, V., 1986. Geologie von Griechenland. In *Beiträge zur regionalen Geologie der Erde* 19. Gebr. Bornträger, Berlin, Stuttgart, p. 363.
- Jethwa, J. L., Dube, A. K., Singh, B. & Mithal, R. S., 1982. Evaluation of methods for tunnel support design in squeezing rock conditions. In: *4th Int. Congr. Int. Assoc. Eng. Geol.* (edited by. 5. Dehli, p. 125-134.
- Kelter, D., Langer, A. & Walter, L., 1999. Anwendung der UN Rahmen-Vorratsklassifikation auf Industriemineralien, Steine und Erden. Slaby, D. & Brenzinski, H. (ed) In: *Rohstoffwirtschaft im Prozess der Transformation: D 205 Wirtschaftswissenschaften*. Technische Universität Bergakademie Freiberg, Freiberg, 189-206.
- Khalokakai, R., Dowd, P. A. & Fowell, R. J., 2000. Incorporation of slope design into optimal pit design algorithms. *Trans. Inst. Min. Metall. (Sec. A: Min. technol.)* v. 109 (A), p. 70-76.
- Krumbein, W. C. & Tisdell, F. W., 1940. Size distribution of source rocks of sediments. *American Journal of Science* v. 238 (4), p. 296-305.
- Laborazione da ICE su Fonte Istat, Import Export von roh/verarbeitetem Marmor und Travertin Italiens. Poli Business s.p.a. Last access: 10.10.2002. <http://www.marbleandmore.com/econ/scambiomarmoing.asp>.
- Langer, W. H., 2001. Potential environmental impacts of quarrying stone in karst - a literature review. Open-file report OF-01-0484. USGS, U.S. Department of the interior, U.S. Geological Survey.
- Laubscher, D. H., 1984. Design aspects and effectiveness of support systems in different mining conditions. *Trans. Instn. Min. Metall. (Sec. A: Min. industry)* v. 93 (A), p. 70-81.
- Laubscher, D. H., 1994. Cave mining; the state of the art. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy* v. 94 (10), p. 279-293.
- Laubscher, D. H. & Taylor, H. W., 1990. The design of a rock support in a high stress or weak rock environments. In: *Proc. 92nd Can. Inst. Min. Metall.* (edited by. AGM, Ottawa, p.
- Laures, G., 2002. Regelgerecht - Anpassbare Geschäftsregeln durch Rules Engines. In: *ix* (edited by. 11. p. 46-50.
- Lemy, F., Hadjigeorgiou, J., Cote, P. & Mardague, X., 2001. Image analysis of drill core. *Trans. C.I.M.* v. A 110, p. 172-177.
- Lepsius, G. R., 1890. Griechische Marmorstudien. *Abhandlungen der Königlichen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, Philosophisch-historische Klasse*. p. 1-135.
- Lepsius, R., 1893. Geologie von Attika - Ein Beitrag zur Lehre vom Metamorphismus der Gesteine. Dietrich Reimer, Berlin.
- Lerchs, H. & Grossmann, L., 1965. Optimum Design of open pit mines. *Trans. C.I.M.* v. LXVIII, p. 17-24.
- Loesby, R. E., 2003. Yule Quarry back i business again. *Mining Engineering* v. 11, p. 17-22.
- Lorenz, W. & Gwosdz, W., 2003 a. Bewertungskriterien für Industriemineralien, Steine und Erden - Teil 6 Natursteine und Dach-

- schiefer(ed) *In*: Geologisches Jahrbuch **H**. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, Stuttgart, 82.
- Lorenz, W. & Gwosdz, W., 2003 b. Handbuch zur geologisch-technischen Bewertung von Mineralischen Baurohstoffen. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, Stuttgart. p. 498.
- Lorenz, W., Gwosdz, W. & Toms, H., 2000. The UN international framework classification for reserves/recourses applied to mineral construction materials. *Erzmetall* v. 53 (1), p. 26-30.
- Mackensen, L., 1985. Ursprung der Wörter - Etymologisches Wörterbuch der deutschen Sprache. VMA Verlag, Wiesbaden.
- Manche, A., Rausch, L. & Simon, K.-H., 1990. Perlen in der Muschel; Expertensystem-Shells auf dem PC, Teil 3. *In*: *c't* (edited by. **8**. p. 46-50.
- Martens, P. N., Möllerherm, S. & Inderst, R., 1997. Development of the knowledge base "Rock Mechanics" for a mine planning expert system. *In*: *Computer Applications and Operations Research in the Mineral Industries (APCOM)* (edited by. The Institution of Mining and Metallurgy, Mosvow, 1997, p. 240-243.
- McCammon, R. B., 1994. PROSPECTOR II; towards a knowledge base for mineral deposits. Dimitrakopoulos, R., McCammon Richard, B. & Shoji, T. (ed) *In*: Expert systems and artificial intelligence in the applied geosciences; 26th international geological congress.: Mathematical Geology **26**. Plenum [for the] International Association for Mathematical Geology, New York-London, International, 917-936.
- McKay, B., Lambert, I. & Miskelly, N., International harmonisation of classification and reporting of mineral resources. McKay B. Last access: 6.11.2002. <http://www.jorc.org/pdf/mckay1.pdf>.
- Milne, D., Hadjigeorgiou, J. & Pakalnis, R., Rock mass characterization for underground hard rock mines. Last access: 02.08.04. <http://www.mining.ubc.ca/rock/publications/Rock%20Mass-can-tun98.fnl-3.PDF>.
- Molli, G., Conti, P., Gioretti, G., Mechereri, M. & Oesterling, N., 2000. Microfabric study of the deformational and thermal history of the Alpi Apuane marbles (Carrara marbles). Italy. *Journal of Geology* v. 22, p. 1809-1825.
- Montomoli, C., Ruggieri, C., Poirion, C. & Cathelineau, M., 2001. Pressure fluctuation during uplift of the Northern Apennines (Italy): a fluid inclusion study. *Tectonophysics* v. 341, p. 121-139.
- Motoyuki, S. & Moriyasu, T., 2000. Classification of subsurface fracture roughness by polarimetric borehole radar. *IEEE*, p. 996-999.
- Mutagwaba, W. A. & Terezopoulos, N. G., 1994. Knowledge-based system for mine method selection. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy* v. 103, p. 27-32.
- Nelles, P. L., 1995. Der Bergbau auf Granit. GDMB Schriftenreihe: Kleinbergbau und seine Bedeutung v. H 76, p. 121-138.
- Neu, T., 2003. Untertägige Gewinnung von Steine- und Erden- Rohstoffen - Voraussetzungen, Rahmenbedingungen und Wirtschaftlichkeit. *Bergbau* v. 6, p. 259-262.
- Palmström, A., 1995. RMi - a rock mass characterization system for rock engineering purposes. Unpublished PhD thesis thesis, Oslo Univerity.
- Palmström, A., Block size and block size distribution. Paper presented at the workshop on the "Reliability of classification systems", GeoEng2000 Conference, Melbourne. Last access: Feb. 2003. <http://www.rockmass.net/Block%20size%20measurements1.pdf>.
- Pande, G. N., Beer, G. & Williams, J. R., 1990. Numerical methods in rock mechanics. Wiley, Chichester.
- Parka, H. & West, T. R., 2001. Development of a probabilistic approach for rock wedge

- failure. *Engineering Geology* v. 59, p. 233-251.
- Peschel, A., 1977. *Natursteine*. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig. p. 390.
- Pieri, M., Burlini, L., Kunze, K., Stretton, I. & Olgaard, D. L., 2001. Rheological and microstructural evolution of Carrara marble with high shear strain: results from high temperature torsion experiments. *Journal of Structural Geology* v. 23, p. 1393-1413.
- Rahn, H. P., 1986. *Engineering Geology*. Elsevier Science, New York. p. 589.
- Ramsay, J. G. & Huber, M. I., 1987. The techniques of modern structural geology(ed) *In: Folds and fractures 2*. Academic Press, London, 700.
- Rich, E., 1983. *Artificial intelligence*. McGraw-Hill, New York. p. xii, 436.
- Russel, S. J. & Norwig, P., 1995. *Artificial Intelligence: a modern approach*. Alan Apt, New Jersey, USA. p. 931.
- Rutter, E. H., 1998. Use of extension testing to investigate the influence of finite strain on the rheological behaviour of marble. *Journal of Structural Geology* v. 20 (2/3), p. 243-253.
- Schilcher, M., 1991. *Geo-Informatik: Anwendungen, Erfahrungen, Tendenzen; Beiträge zum internationalen Anwenderforum 1991 Geo-Informationssysteme und Umweltinformatik Duisburg 20. bis 21 Februar 1991 / Siemens Nixdorf Informationssysteme AG. Siemens Aktiengesellschaft, Berlin, München*. p. 620.
- Schilka, W., 2003. Marmorbergbau in einem sächsischen FFH-Gebiet. *Bergbau* v. 6, p. 255-258.
- Schleyer, R., 1986. The goodness-of-fit to ideal Gaus and Rosin distributions: a new grain-size parameter. *Journal of Sedimentary Petrology* v. 57 (5), p. 871-880.
- Seipp, H., 1936. *Der Marmor von Laas (Lasa) im Vinschgau (Südtirol) und die Marmorwerke der "Societa Anomina Lasa per L'Industria del Marmo"(ed) In: Geologie und Bauwesen 8*, Wien, Österreich, 95.
- Shi, Y., Zhang, S., Fan, Q. & Li, X., 1999. Method of combining expert system with artificial neural network for safety monitoring during drilling. *Xiandai Dizhi = Geoscience* v. 13 (3), p. 367-370.
- Shields, D. J. & Šolar, S. V., 2000. Sustainable mineral resource management in karst areas. *Portoro*, p. 7.
- Singewald, C., 1992. *Naturstein - Exploration und Gewinnung*. Rudolf Müller, Köln, Bad Bentheim. p. 260.
- Taboada, J., Vaamonde, A. & Saavedra, A., 1999. Evaluation of the quality of a granite quarry. *Engineering Geology* v. 53 (1), p. 1-11.
- Taboada, J., Vaamonde, A., Saavedra, A. & Alesano, I., 1997. Application of geostatistical techniques to exploitation planning in slate quarries. *Engineering Geology* v. 47, p. 269-277.
- Temiz, H., Poisson, A., Andrieux, J. & Barka, A., 1997. Kinematics of the Plio-Quaternary Burdur-Dinar cross-fault system in SW Anatolia (Turkey). *Annales Tectonicae* v. 11 (1-2), p. 102-113.
- Terezopoulos, N. & Paspaliaris, I., 2003. Dimension stone quarrying in Europe and stability of quarrying operations. *In OSNET Editions 2. Laboratory of Metallurgy, National Technical University of Athens, Athens*, p. 159.
- Tugrul, A., 1998. The application of rock mass classification systems to underground excavation in weak limestone, Ataturk Dam, Turkey. *Engineering Geology* v. 50 (3-4), p. 337-345.
- United Nations Economic and Social Council, 1997. *United Nations international framework classification for reserves/resources - solid fuels and mineral commodities - final version*, EN-ERGY/WP.1/R70. p. 25.
- Vogt, R., 1999. Ein System zur Unterstützung der kurzfristigen Abbauplanung im Festgesteinstagebau durch Integration wissensba-

- sierter Techniken und Verfahren der Unternehmensforschung, Techn. Univ. Berlin.
- Wagner, M., Luo, J., Germann, K. & Skala, W. D., 1996. GEOEXPLORER, an expert system for bauxite exploration. Anonymous (ed) *In: 7th congress of ICSOBA.: Travaux du Comite International pour l'Etude des Bauxites, de l'Alumine, et de l'Aluminium* **26**. Academie Yougoslave des Sciences et des Arts, Zagreb, Croatia, 25-35.
- Wang, J., Milne, D. & Pakalins, R., 2002. Application of a neural network in the empirical design of underground excavation spans. *Trans. Instn Min. Metall.* v. 111 (A: Min technol.), p. 73-79.
- Wang, Y.-J. & Yin, J.-H., 2002. Wedge stability analysis considering dilatancy of discontinuities. *Rock Mech. Rock Engng.* v. 35 (2), p. 127-137.
- Waterman, D., 1986. A guide to expert systems. Addison-Wesley, Reading, Mass., p. 419.
- Weber, J., Dehnhart, J. & Lepper, J., 2001. Trennflächenanalyse zur Vorratsermittlung von Naturwerkstein-Lagerstätten. *Z. angew. Geol.* v. 47 (2), p. 74-78.
- Weber, R. & Hill, D., 1998. Naturstein für Anwender, Ulm. p. 207.
- Wilke, F. L., 1989. Entwicklung eines wissensbasierten Systems für bergmännische Planungsaufgaben auf der Basis von geologischem und geostatistischen Datenmaterial (ed) *In: Protokoll über das Rundgespräch "Wissensbasierte Systeme in den Geowissenschaften" am 24. Oktober 1989. Bonn-Bad Godesberg, Federal Republic of Germany*, 23-24.
- Wittig, M., 1995. Unterstützung bergmaennischer Zuschnittplanung durch Kombination von wissensbasierten Systemen und CAD (ed) *In: XLVI. Berg- und Hüttenmännischer Tag vom 14. bis 17. Juni 1995; Abstracts. TU Bergakad., Freiberg, Federal Republic of Germany*, 44.
- Wittkopf, V., 2002. Analyse und Formalisierung geophysikalisch- geologischen Wissens am Beispiel der integrierten Interpretation krustaler Strukturen. *In Berliner Geowissenschaftliche Abhandlungen B. Selbstverlag Fachbereich Geowissenschaften, Berlin*, p. 107.
- Zekai, S., 2000. Rock quality designation model formulation and simulation for correlated fracture intact lengths. *Mathematical Geology* v. 32 (8).

Anhang

Tabelle A1: Detailaufnahme eines Trennflächengefüges

Zone of investigation: wall A														
Reference point:		x (local) 0		y (local) 0		z 0								
Fracture n°	dip	dd	type	thickness	aperture	morphology		end1			end2			note
	[°]	[°]		[cm]	[cm]	s.scale	b.scale	x ₁	y ₁	type	x ₂	y ₂	type	
1	70	120	diac	0.1	-	sm	P	1.20	3.2	L	2.46	0.00	L	
2	77	118	diac	0.2	-	sm	P	3.15	3.2	L	4.00	0.00	L	
3	85	9	diac	0.1	-	r	P	6.40	1.15	L	6.50	3.2	L	
4	74	112	diac	0.1-0.2	-	r	P	10.91	3.2	L	11.27	0.00	L	W
5	65	195	diac	0.1-0.2	-	r	U	17.51	3.2	L	18.10	0.00	L	W
6	76	202	diac	< 0.1	-	r	P	21.90	3.2	L	22.90	1.00	L	

Diac = diacalse

w = presence of water

Morphology

r = rough

sm = smooth

sl = slickensided

S = stepped

U = undulating

P = planar

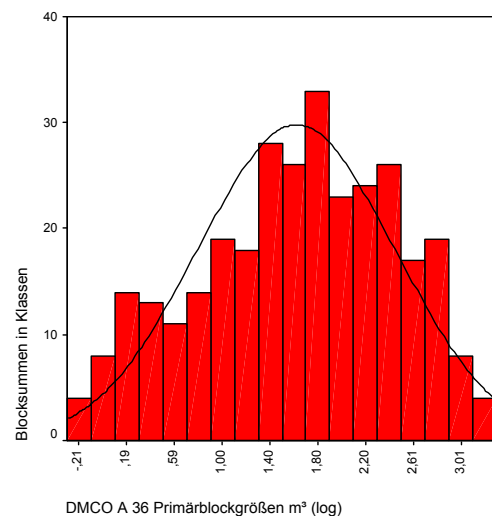
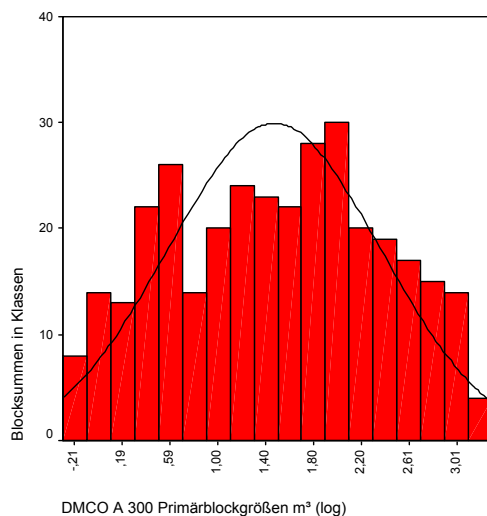
Type

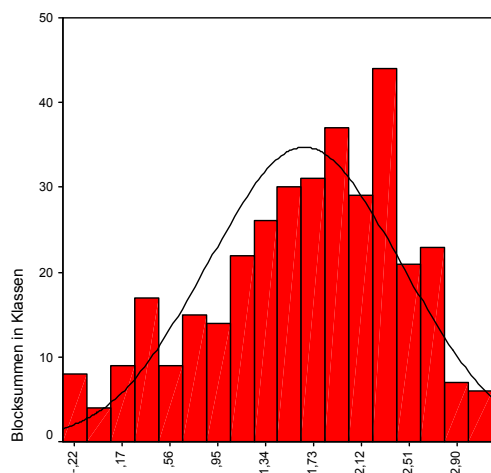
s = stopped

l = lonely

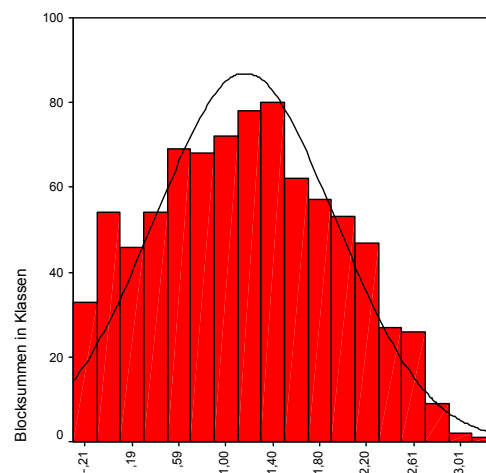
t = truncated

Abb. A1: Häufigkeitsverteilungen (Histogramme) der logarithmierten Primärblockgrößen [in m³] mit dem RESOBLOK-Trennflächenmodell für die möglichen Orientierungen der untertägigen Hohlräume (siehe Kap. 7.1.2).

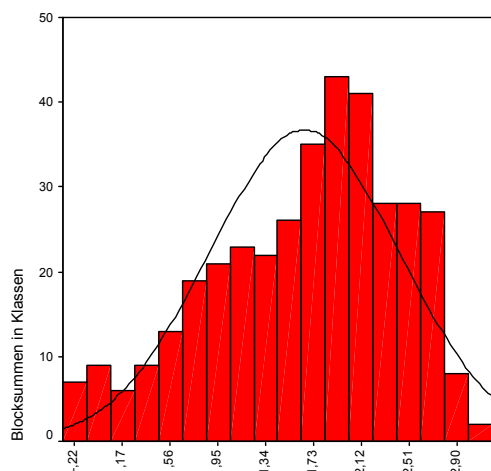




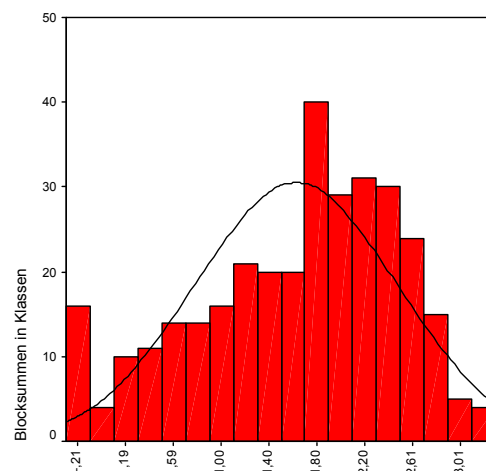
DMCO B 36 Primärblockgrößen m³ (log)



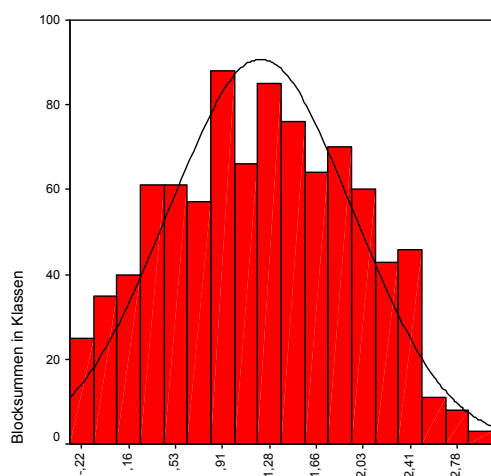
LASA 105 Primärblockgrößen m³ (log)



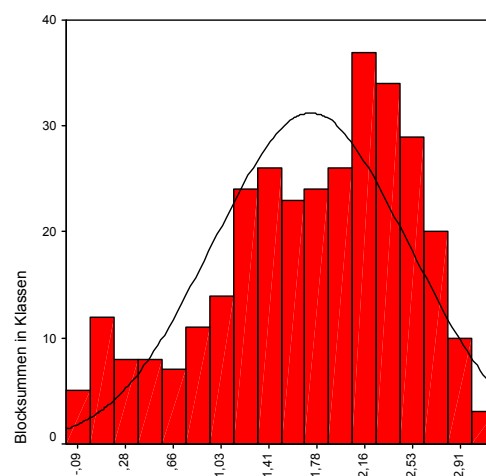
DMCO B 212 Primärblockgrößen m³ (log)



LEVI 205 Primärblockgrößen m³ (log)



LASA 62 Primärblockgrößen m³ (log)



LEVI 40 Primärblockgrößen m³ (log)

Tabelle A2: Auszug aus dem Fragebogen für die erste Erhebung in der ersten Phase des CAD-PUMA Projektes. Die gesammelten Informationen aus den Interviews Vorort bei den Steinbruchbetreibern werden in tabellarischer Form festgehalten und bewertet.

Number / Key	Group	Question	Types	Scales	Units	Info / Notes	Variables	Progress	Objectives	QPF	REC	SWC	OPD	MBR	REI
								< X >	(Profits) +/-	(Costs) +/-	(Safety) +/-	(Product) +/-	(Block rec.) +/-	(Envirom.) +/-	
0.0															
1.0	Geological Situation	Enough geological	yes / no			X	GEOStart								
1.1	Geological history / Age of the deposit				a / million			< age							→
1.2.0	Geological Sequence / Overburden / Morphology														
1.2.1.0	Type / Lithology of														
1.2.1.1		Type: 4)sediments 3)meta sediments 2)carbonates 1)shist			C 1-4	X	GEOOverburdenI							→	→
1.2.2.1	Bedding	yes / no				X	GEOOverburdenB	Yes						→	→
1.2.2.2.1	Bearing	1)flat 2)plane 3)folded 4)steep			C 1-3	X	GEOOverburdenBearing	< angle						→	→
1.2.2.2.5	Angle of bearing				0-90 angle	X	GEOOverburdenBearingDip							→	→
1.2.3	Thickness of overburden				0-XX meters	X	GEOOverburdenI	< meters						→	→
1.2.4.0	Sharpness of contact between marble and						thickness							→	→

Tabelle A3: Dateiauszug eines in *RESOBLOK* modellierten Trennflächenkörpers. Mit *id* sind die Blöcke indiziert. Die Position des gravimetrischen Schwerpunkt (x, y, und z) und ein Volumen in m³ sind beschreibende Merkmale des Blockes. „Free“ bezeichnet eine Variable, ob der Roh-oder Primärblock an den modellierten Hohlraum angrenzt (1) oder nicht (0).

id	x	y	z	volume	free
1	-15.85	-19.98	0.47	0.0	0.0
10	21.92	19.22	-1.41	5.26	0.0
100	-16.93	19.78	3.69	0.97	0.0
101	-16.10	18.80	3.81	3.79	0.0
103	8.66	-19.51	-0.68	3.9	0.0
104	-13.61	18.92	4.0	3.13	0.0
106	-5.4	3.69	-0.83	11.80	0.0
109	6.17	-7.02	13.01	26.84	0.0
111	3.85	19.85	3.13	0.11	0.0
111	-1.26	-5.13	4.45	0.0	1.0
113	-13.16	-19.36	3.28	8.33	0.0
114	-19.83	-2.48	10.73	0.93	0.0
115	-17.05	-6.13	12.79	0.03	0.0
117	-10.11	-19.11	3.75	8.13	0.0
12	0.13	16.70	-5.59	1.2	0.0
120	-15.78	-6.03	14.94	0.0	0.0
122	-19.22	18.78	0.68	2.09	0.0
123	-15.78	5.49	1.34	28.58	1.0
124	39.75	19.79	0.58	0.29	0.0
125	22.63	19.66	1.02	3.46	0.0
127	36.36	-6.12	1.36	0.08	0.0
128	39.60	19.38	0.04	0.0	0.0
13	39.98	19.89	1.66	0.0	0.0
130	36.04	-6.34	0.21	0.08	0.0
131	25.03	-18.61	2.18	30.48	0.0
135	21.71	-13.84	1.48	44.14	0.0

Abkürzungen

γ	= Gesteinsdichte in Kg/m ³
σ_n	= Sigma Spannung
AI	= Artificial Intelligence
BSA	= Block Stability Analysis
BEM	= Boundary Element Method
BTH	= Breite, Tiefe, Höhe
CAD-PUMA	= Development of an Integrated Computer Aided Design and Planning Methodology for Underground Marble Quarries
CCLL	= Cooperativa Condomi Lavoratori dei Beni Sociali di Levigliani
CNR	= Centro Studi per la Fisica delle Rocce e le Geotecnologie
DMCO	= Dionyssomarble Coorparation
EN	= European Norm
ESDF	= Expertsytem Data Fontend
EU	= Europäische Union
GEO	= Modul GEO
M. %	= Masseprozent
GSI	= Geological Strength Index
INERIS	= Institute National de l'Environnement Industriel et des Risques
J_a	= Kluft Alteration
J_n	= Anzahl an Kluftfamilien
J_r	= Kluft Rauigkeit
J_w	= Reduktion durch Wasser
KI	= Künstliche Intelligenz
m. ü. NN	= Meter über Normal Null, Meeresspiegel
MADDEM	= Marble Deposit Model
MAMIN	= Marble Mine Model
MB	= Megabyte
MEC	= Modul Marble Economics
MMP	= Modul Marble Mass Properties
MPa	= Mega Pascal
POLITO	= Politecnico di Torino, Dipartimento di Georisore e Territorio
Q	= Q-Faktor
RMR	= Rock Mass Rating
RQD	= Rock Quality Index
SRF	= Spannungsreduktionsfaktor
UN	= United Nations
UQL	= Modul Underground Quarry Layout
Vb	= Volumenparameter
VRML	= Virtuel Reality Meta Language
WBS	= Wissensbasiertes System
XPS	= Experten System
ZOI	= Zone of Interest