

**Naturwerksteine Thailands:
Lagerstättenerkundung und Bewertung**

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultäten
der Georg-August-Universität zu Göttingen

vorgelegt von
Andreas Hoffmann
aus Bad Driburg

Göttingen 2006

D 7

Referent: Prof. Dr. Siegfried Siegesmund
Geowissenschaftliches Zentrum der Universität Göttingen

Korreferent: Prof. Dr. Bernhard Stribrny
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover

Tag der mündlichen Prüfung: 31.10.2006

Kurzfassung

In den letzten drei Jahrzehnten konnte ein kontinuierlicher Anstieg des Bedarfs an Naturwerksteinen verzeichnet werden. Schon jetzt lässt sich für die Zukunft prognostizieren, dass die umfangreichen Bedarfsmengen kaum aus den derzeit existierenden Lagerstätten gefördert werden können und eine Abdeckung der Nachfrage nur durch den Ausbau bestehender Ressourcenkapazitäten gedeckt werden kann. Dieses Problem der Rohstoffverfügbarkeit wird zudem dadurch verschärft, dass Naturwerksteine gegenwärtig immer noch allzu häufig ohne Kenntnisse der Ressourcenbeschaffenheit und Ressourcenqualität gewonnen werden. Viele Brucheigner wählen eine Abbaustrategie, die in keiner Weise den geologisch-lagerstättenkundlichen Voraussetzungen gerecht wird, so dass potentiell gewinnbare Ressourcen unter Missachtung nachhaltiger Abbauplanung für eine zukunftsorientierte Natursteingewinnung oft irreparabel geschädigt werden. Es wird deutlich, dass im Rahmen dieser Ressourcenproblematik ein dringender Handlungsbedarf besteht, die Lagerstätten für Naturwerksteine nach geowissenschaftlichen Gesichtspunkten fundiert zu erfassen und zu bewerten.

In der vorliegenden Arbeit wurden thailändische Naturwerksteine, bestehend aus Granitoiden und Gneisen, einem Hornblendit, verschiedenen Marmoren sowie carbonatischen und klastischen Sedimenten, lagerstätten-geologisch erkundet und bewertet. Die Bewertung erfolgte im Wesentlichen auf der Grundlage lithologischer, struktureller und gesteintechnischer Untersuchungen.

Die lithologischen Untersuchungen basierten auf verschiedenen petrographischen, gefügekundlichen und röntgenographischen Verfahren, anhand derer das Dekor, die mineralogische Zusammensetzung und das Mikrogefüge der Varietäten charakterisiert werden konnten. Die Mineralogie und das Gefüge eines Naturwerksteins müssen als Grundvoraussetzung für eine fundierte Lagerstätten erkundung gewertet werden, da beide Einflussfaktoren die bautechnischen Eigenschaften eines Gesteins bzw. das Materialverhalten unter dem Einfluss der Verwitterung maßgeblich kontrollieren. Die strukturellen Untersuchungen dieser Arbeit konzentrierten sich im Wesentlichen auf das Trennflächengefüge der Lagerstätten, die Tektonik der Abbaugebiete sowie auf die Lagerungsverhältnisse der Naturwerksteine. Die Ergebnisse gaben Aufschluss darüber, auf welche Art und in welchem Ausmaß die Gewinnung der Naturwerksteine durch die Vorgaben aus der geologischen Entwicklungsgeschichte des Abbaugebietes diktiert wird. Zusammen mit einer Dokumentation von Blockgrößen und Abraummengen konnte aus diesen Untersuchungen eine Abschätzung der Rohblockhöflichkeit vorgenommen werden, die denjenigen Anteil an Rohblöcken beschreibt, der in verarbeitungsgerechten Dimensionen dem Gesteinsverband entnommen werden kann. Die Charakterisierung der Lithologien wurde durch gesteintechnische Untersuchungen ergänzt, mit deren Hilfe neben den Indexeigenschaften wie etwa Dichte und Porosität auch die mechanischen und thermischen Eigenschaften erfasst werden konnten. Die gesteintechnischen Studien ließen dabei eine Aussage über die bautechnische Eignung der Gesteine zu, so dass in weiteren Schritten eine Einschätzung zum ökonomischen Potential der Lagerstätten erfolgen kann.

Aus den lithologischen und strukturellen Ergebnissen sowie anhand des regional-geologischen Rahmens wurden Lagerstättenmodelle konzipiert, über die präzise Aussagen zur Genese bzw. zur post-genetischen Evolution der Abbaugebiete abgeleitet werden konnten. Die Modelle ermöglichten es, eine detaillierte Vorstellung über die Beschaffenheit und Ergiebigkeit der Ressourcen zu erhalten und erlaubten darüber hinaus die Entwicklung von Abbau- und Erkundungsstrategien.

Abstract

The last three decades were characterised by a continuous growth with respect to the demand of dimension stones. At the present time it is already obvious that the large quantities that are needed in the future cannot be quarried from the existing deposits. This implies that either new resources must be found or existing deposits must be developed. Problems concerning the availability of dimension stone moreover arise from the fact that in some deposits stones are quarried without any knowledge of the geological background and quality of the resource. Due to this lack of information, many quarry owners chose mining strategies which are inadequate with respect to the geological conditions and which harm the sound and high quality material. It becomes clear that the problems related with the production of dimension stones demand for a profound resource characterisation on the basis of geoscientific investigations and evaluations.

Within the present work, dimension stones from Thailand that consist of granitoid rocks and gneisses, a hornblendite, various marbles as well as carbonate and clastic sediments underwent detailed studies and assessments concerning their depositional environment and stone properties. These assessments were conducted mainly by lithological, structural and geotechnical analyses.

The lithological studies were carried out by different petrographic, texture-oriented and X-ray methods, which were used to quantify the décor, the micro fabric and the mineralogical composition of the varieties. The mineralogy and the fabric must be regarded as a basic element for the assessment of dimension stones, since both parameters significantly control the technical properties of the material under the influence of weathering. The structural investigations mainly concentrated on the deposits of the stones, here in particular the fracture spacing as well as tectonic and depositional aspects. Thereby it was possible to record, how far and to what extend the exploitation of a resource is influenced by the geological history of the mining area. Together with the documentation of block sizes and waste quantities, conclusions for the block prospectivity were derived. The characterisation of the lithologies was supported by geotechnical investigations, which cover among others the index parameters of a stone such as density and porosity as well as the mechanical and thermal properties. The results of the geotechnical characterisation were used to quantify the suitability of the stones for construction purposes, so that in further steps an evaluation of the economic potential of the deposit might be possible.

Lithological and structural investigations together with information from the regional geology finally allowed to create models for the stone deposits, from which precise conclusions concerning the genesis and post-genetic evolution of the mining area were derived. The models enabled to receive a more detailed picture of all influencing geological factors on the quarrying and led to the development of exploitation and exploration strategies.

Inhaltsverzeichnis

1. EINLEITUNG	1
1.1 Problemstellung und Zielsetzung der vorliegenden Arbeit	1
1.2 Themenrelevante Publikationen anderer Autoren	3
1.3 Vorgehensweise und Grundkonzept der vorliegenden Arbeit	3
2. DER NATURWERKSTEINMARKT: GLOBALE BETRACHTUNG UND DIE POSITION THAILANDS	5
2.1 Übersicht zur internationalen Produktion von Naturwerkstein	5
2.1.1 Geographische Verteilung der Naturwerksteinproduzenten.....	5
2.1.2 Anwendungsbereiche für Naturwerksteine	7
2.1.3 Im- und Export von Naturwerksteinen	8
2.2 Die thailändische Naturwerkstein-Industrie	8
2.2.1 Entwicklungen.....	8
2.2.2 Abbautechnik, technische Ausrüstung der Werke und verfügbare Produktgruppen.....	12
3. REGIONALE GEOLOGIE THAILANDS UND REGIONALISIERUNG DER LAGERSTÄTTENPROVINZEN FÜR NATURWERKSTEINE	15
3.1 Die tektonische Evolution Thailands: Überblick und Zusammenhänge	15
3.1.1 Theorien zur tektonischen Evolution Thailands und SE-Asiens	15
3.1.2 Extensionstektonik	18
3.1.3 Regionale Kompressionen.....	19
3.2 Tektonische Einheiten und regionale Stratigraphie Thailands	20
3.2.1 Shan Thai Terrain	20
3.2.2 Indochina-Terrain	20
3.3 Magmatismus in Thailand	21
3.3.1 Plutonischer Magmatismus	21
3.3.2 Vulkanische Aktivitäten im Zusammenhang mit tektonischen Ereignissen	23
3.4 Regionalisierung der Lagerstättenprovinzen für Naturwerksteine	24
3.4.1 Übersicht.....	24
3.4.2 Triassische Batholith-Intrusionen in NW- und N-Thailand	26
3.4.3 Triassische Granite in Verbindung mit Vulkaniten des CTVB	27
3.4.4 Granitoide im „Großraum Bangkok“	28
3.4.5 Hornblendite in den vorgelagerten Bereichen des Khorat-Plateaus	30
3.4.6 Permische Carbonatgesteine in den vorgelagerten Bereichen des Khorat-Plateaus.....	31
3.4.7 Sandsteine des Mesozoikums am W-Rand des Khorat-Plateaus.....	32
3.4.8 Permische Kalksteine in SE-Thailand	32
3.4.9 Carbonatgesteine des Mittleren bis Oberen Palaeozoikums in NW-Thailand	33

4. LITHOLOGISCHE CHARAKTERISIERUNG DES WERKSTEINPOTENTIALS	36
4.1 Dekoreigenschaften	36
4.1.1 Granitoide, Gneise und Hornblendit.....	36
4.1.2 Carbonatgesteine	40
4.1.3 Sandsteine	44
4.2 Mineralogische und chemische Zusammensetzungen	46
4.2.1 Granitoide, Gneise und Hornblendit.....	46
4.2.2 Carbonatgesteine	49
4.2.3 Sandsteine	51
4.3 Mikrogefüge	53
4.3.1 Referenzsystem	53
4.3.2 Granitoide und Gneise.....	54
4.3.3 Carbonatgesteine	60
4.3.3.1 Marmore	60
4.3.3.2 Kalksteine.....	65
4.3.4 Sandsteine	67
5. GESTEINSTECHNISCHE CHARAKTERISIERUNG DES PROBENMATERIALS	72
5.1 Dichte, Porenraumeigenschaften und Wasseraufnahmeverhalten	72
5.1.1 Die Bedeutung der Kennwerte in der bautechnischen Anwendung.....	72
5.1.2 Methodik	73
5.1.3 Dichte, Porenraumeigenschaften und Wasseraufnahme des Probenmaterials	75
5.2 Ultraschallanalytik	78
5.2.1 Hintergrund der Untersuchungen.....	78
5.2.2 Methodik	79
5.2.3 Kompressionswellengeschwindigkeiten des Probenmaterials	79
5.3 Mechanische Eigenschaften	82
5.3.1 Die Bedeutung der Kennwerte in der bautechnischen Anwendung.....	82
5.3.2 Methodik	85
5.3.3 Mechanische Eigenschaften des Probenmaterials	88
5.3.3.1 Druckfestigkeiten und statischer E-Modul.....	88
5.3.3.2 Spaltzugfestigkeiten	89
5.3.3.3 Biegezugfestigkeiten	90
5.3.3.4 Abriebfestigkeiten	91
5.4 Dehnungseigenschaften	95
5.4.1 Die Bedeutung der Kennwerte in der bautechnischen Anwendung.....	95
5.4.2 Methodik	95
5.4.3 Dehnungseigenschaften des Probenmaterials.....	99

6. LAGERSTÄTTENGEOLOGISCHE CHARAKTERISIERUNG DER THAILÄNDISCHEN NATURWERKSTEINE	103
6.1 Übersicht zur Morphologie der Abbaugebiete	103
6.2 Abbauprodukte, Lagerstättenenerträge und Blockgrößen	107
6.2.1 Abbauprodukte und Lagerstättenenerträge	107
6.2.2 Blockgrößen	108
6.3 Trennflächensysteme.....	110
6.3.1 Abstandsverteilung der Trennflächen.....	110
6.3.2 Orientierung der Trennflächen	112
6.3.3 Methodik und Fallbeispiel für die Bestimmung des Trennflächengefüges	117
6.4 Weitere lagerstätten-kontrollierende Elemente der thailändischen Abbaugebiete.....	122
6.5 Rohblockhöffigkeiten	123
7. DISKUSSION UNTER BERÜCKSICHTIGUNG METHODOLOGISCHER ASPEKTE ZUR ERFASSUNG UND BEWERTUNG DER UNTERSUCHTEN VORKOMMEN.....	126
7.1 Qualitative Bewertung der Abbauprodukte hinsichtlich ihrer Eignung als Werkstein	126
7.1.1 Bewertungskriterien und potentielle Verwitterungsschäden bei Naturwerksteinen.....	126
7.1.1.1 Bewertungskriterien für die Anwendung von Naturwerksteinen	126
7.1.1.2 Potentielle Verwitterungsschäden bei Granitoiden	128
7.1.1.3 Potentielle Verwitterungsschäden bei Carbonatgesteinen.....	129
7.1.1.4 Potentielle Verwitterungsschäden bei Sandsteinen	131
7.1.2 Qualitative Bewertung thailändischer Granite, Gneise und Hornblendit	133
7.1.2.1 Optische Eigenschaften	133
7.1.2.2 Gesteinstechnische Eigenschaften.....	134
7.1.2.3 Möglichkeiten und Grenzen für die Anwendung der Gesteine	143
7.1.3 Qualitative Bewertung thailändischer Carbonatgesteine.....	145
7.1.3.1 Optische Eigenschaften	145
7.1.3.2 Gesteinstechnische Eigenschaften.....	146
7.1.3.3 Möglichkeiten und Grenzen für die Anwendung der Gesteine	152
7.1.4 Qualitative Bewertung thailändischer Sandsteine	155
7.1.4.1 Optische Eigenschaften	155
7.1.4.2 Gesteinstechnische Eigenschaften.....	155
7.1.4.3 Möglichkeiten und Grenzen für die Anwendung der Gesteine	159
7.2 Bewertung der Trennflächensysteme und der Rohblockhöffigkeit	161
7.3 Ableitung von Lagerstättenmodellen und Strategien für deren Erkundung.....	168
7.3.1 Grundzüge der Lagerstättenbildung und Explorationsmethoden	169
7.3.2 Lagerstättenmodelle für thailändische Granitoide.....	171
7.3.2.1 Feldspat-Alteration infolge Tektonik und hydrothermalen Beeinflussung.....	171
7.3.2.2 Kontakte einzelner Vorkommen zu benachbarten Lithologien.....	174

7.3.2.3	Änderungen im Gefüge	177
7.3.2.4	Intrusion von Gängen	179
7.3.2.5	Subvulkanische Intrusionen	183
7.3.2.6	Diagonale Kluftsysteme	188
7.3.3	Lagerstättenmodelle für thailändische Carbonatgesteine	189
7.3.3.1	Änderungen im Dekor infolge der metamorphen und tektonischen Überprägung.....	189
7.3.3.2	Tektonische Überprägungen.....	193
7.3.4	Lagerstättenmodelle für thailändische Sandsteine	194
7.3.4.1	Farbänderungen	194
7.3.4.2	Tonakkumulationen und Mangan-Ausfällungen.....	201
7.3.4.3	Silifizierung der Sandsteinvorkommen	204
7.3.4.4	Generelle Prognosen zur Lagerstättenerweiterung in den Sandsteinvorkommen	205
7.3.4.5	Lagerstättenerweiterung bei Sandsteinen in Bezug auf die Optimierung technischer Gesteinseigenschaften	206
7.4	Ansatzpunkte für die Prospektion weiterer Naturwerksteine in Thailand.....	210
8.	ZUSAMMENFASSUNG	213
9.	LITERATURVERZEICHNIS	221

ANHANG I:	Auflistung der untersuchten Lagerstätten und Proben
ANHANG II:	Datenblätter der untersuchten Naturwerksteine
ANHANG III:	Lagerstättenerträge, Blockgrößen und durchschnittliche Blockabmessungen
ANHANG IV:	Maximale Abstandsverteilung der Trennflächen in den Lagerstätten

Danksagung

Lebenslauf

1. EINLEITUNG

1.1 Problemstellung und Zielsetzung der vorliegenden Arbeit

Viele Objekte und Bauwerke aus Naturwerkstein sind Zeugnisse außergewöhnlicher technischer und künstlerischer Leistungen und gelten seit Jahrtausenden als elementarer Bestandteil verschiedener Kulturkreise.

In den letzten drei Jahrzehnten konnte weltweit eine deutlich höhere Nachfrage bei der Anwendung von Naturwerksteinen verzeichnet werden. Prognosen für die Zukunft gehen von einer Verdoppelung der Zuwachsraten alle zehn Jahre aus. Im Jahr 2025 könnte der Bedarf an Naturwerksteinen etwa 300 Mio. t/a erreichen (Abb. 1.1). Schon jetzt ist abzusehen, dass derart umfangreiche Mengen kaum aus den derzeit existierenden Lagerstätten gefördert werden können. Sollte sich ein Bedarf von Naturwerksteinen wie vorhergesagt einstellen, ließe sich eine Abdeckung der Nachfrage nur durch die Neuerschließung bzw. durch den Ausbau existierender Lagerstätten gewährleisten.

Naturgemäß sind Neuerschließungen und auch Erweiterungen bestehender Lagerstätten mit Anforderungskriterien verbunden, die sich u. a. aus ökologischen, infrastrukturellen und legislativen Faktoren sowie aus der Wirtschaftlichkeit der Abbauvorhaben ergeben. Für einen ökonomisch vertretbaren Abbau ist entscheidend, dass die Produktion von Rohmaterial eine möglichst hochwertige und einheitliche Qualität gewährleistet. Zudem ist neben der Homogenität des Werksteins für die wirtschaftliche Gewinnung und damit als Anforderung an ein Abbaugelände ein bestimmtes Abbauvolumen von Bedeutung.

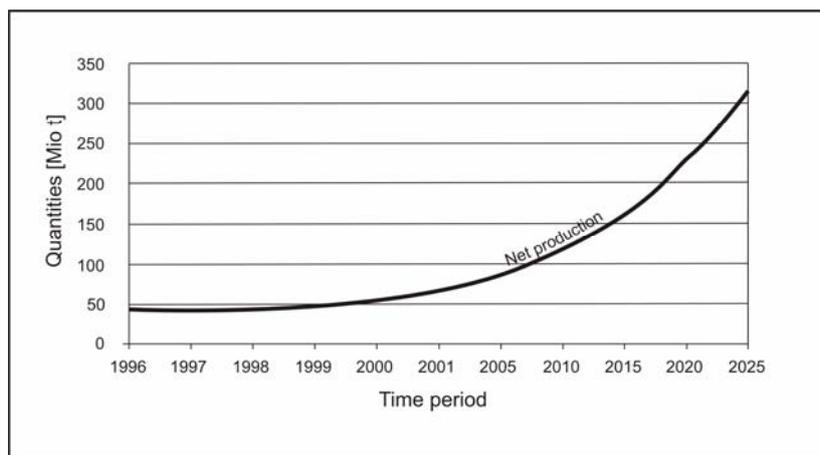


Abb. 1.1: Prognose für die Netto-Produktion von Naturwerksteinen bis zum Jahre 2025. Die Vorhersage zeigt dabei einen kontinuierlichen Zuwachs der Produktion, wobei sich die Fördermengen in der Zukunft etwa alle zehn Jahre verdoppeln werden (nach Montani 2003).

Mit der weltweiten Zunahme der Naturwerksteinproduktion haben sich neben der spezifischen Lagerstättenproblematik auch höhere bautechnische Anforderungen an den Naturwerkstein ergeben. Da die technischen Eigenschaften bei fast allen Naturwerksteinen

eine differenzierte Verwendbarkeit am Bauwerk und in der Technik bedingen, sollte bei der Wahl eines Naturwerksteins als Baustoff eine umfangreiche Materialcharakterisierung nach modernen Prüfbestimmungen vorliegen. Ein erheblicher Teil an Naturwerksteinen wird auf dem internationalen Markt jedoch nur lückenhaft, teilweise auch widersprüchlich hinsichtlich seiner gesteintechnischen Eigenschaften ausgewiesen. Diese unzureichende Ausweisung dürfte es den verarbeitenden Produktionsbetrieben und Architekten erheblich erschweren, in den Gesteinen wesentliche Grundmerkmale zu erkennen und diese mit der jeweiligen Bausituation in Einklang zu bringen.

Die eingangs genannten Anforderungen an eine Lagerstätte und an den daraus geförderten Naturwerksteinen sind eng an die geologischen Konditionen des Abbaugebietes geknüpft. Eine Grundvoraussetzung für den Abbau von Naturwerksteinen sollte daher eine systematische geologische Lagerstättenerkundung sein. Anders jedoch als beispielsweise in der Prospektion auf Industriemineralien und Erze, in der seit langem umfangreiche geologische, geochemische und geophysikalische Methoden zu einer ausgearbeiteten Erkundungsstrategie zusammengeführt wurden (siehe dazu u. a. Annels 1991, 1992; Whateley & Harvey 1994; Wellmer 1981; Wellmer & Greinwald 1982, Marjoribanks 1997), gibt es hinsichtlich des Werksteinabbaus noch keine vollständig etablierte, geowissenschaftlich basierte Methodologie, welche die systematische Bewertung eines Abbaugebietes erlaubt. Viele der an der Planung eines Abbauvorhabens Beteiligten sind daher nur unzureichend über den geologischen Hintergrund eines Vorkommens bzw. dessen Ausdehnung und Grenzen informiert, so dass Naturwerksteine gegenwärtig immer noch allzu oft ohne Kenntnis der Ressourcenbeschaffenheit und Ressourcenqualität gewonnen werden. Als Folge geht daraus vielfach hervor, dass potentiell gewinnbare Vorkommen durch falsche Abbaumethoden und unter Missachtung nachhaltiger Abbauplanung für eine zukunftsorientierte Werksteingewinnung irreparabel geschädigt werden. Weiterhin gehen mit einem Abbau, der durch mangelnde Erkundung nur bedingt den geologisch-lagerstättenkundlichen Voraussetzungen gerecht wird, erhebliche materielle Verluste einher. Es darf in diesem Zusammenhang angenommen werden, dass in vielen Produktionsstätten unter Berücksichtigung aller geologischen Einflussfaktoren eine wesentlich höhere Ausbeute erzielt werden könnte.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist, die bedeutendsten thailändischen Naturwerksteine lagerstätten-geologisch zu erkunden und hinsichtlich ihrer gesteintechnischen Eigenschaften zu bewerten. In diesem Zusammenhang sollen exemplarisch grundlegende Aspekte zur Entwicklung einer Methodologie aufgezeigt werden, anhand derer die Vorkommen von Naturwerksteinen fundiert erfasst und sowohl lagerstätten-geologisch als auch gesteintechnisch bewertet werden können. Eine standardisierte Methodologie könnte dazu beitragen, gezieltere Kriterien für die Prospektion von Lagerstätten für Naturwerksteine aufzustellen und bestehende Gewinnungsverfahren auf ihre Wirtschaftlichkeit und Effizienz im Sinne nachhaltiger Entwicklungen hin zu überprüfen.

1.2 Themenrelevante Publikationen anderer Autoren

An dieser Stelle soll eine kurze Auswahl jüngerer Publikationen angesprochen werden, die sich ebenfalls dem Thema „Rohstoff Naturwerkstein“ und den Lagerstätten widmen. Arbeiten zum Werksteinabbau wurden in der Vergangenheit u. a. von Luodes et al. (2000) und Selonen et al. (2000) vorgelegt. Die Autoren untersuchten Vorkommen von Naturwerksteinen in S-Finnland und zeigen anhand von Fallstudien grundlegende Aspekte auf, die für eine Bewertung von Naturwerkstein-Lagerstätten herangezogen werden können. Im Vordergrund stehen dabei u. a. Erkundungen des Untergrunds mittels Bohrlochuntersuchungen und Geo-Radar (siehe hierzu auch Hänninen et al. 1991, Luodes & Selonen 2001). Neben den hier angeführten Publikationen existiert eine Reihe anderer Fachartikel finnischer Autoren, die sich mit dem Abbau von Naturwerksteinen auseinandersetzen. Zu nennen sind in diesem Zusammenhang z. B. Selonen (1998), Selonen et al. (2001), Härmä et al. (2001), Luodes (1999), Selonen & Ramsay (2002), Selonen & Suominen (2003) sowie Selonen et al. (2003).

Weitere Veröffentlichungen mit Fokus auf den Abbau von Naturwerksteinen nähern sich dem Thema auf geostatistischer Ebene (z.B. Taboada et al. 1997, Taboada et al. 1998, Taboada et al. 1999, Tercan & Özcelik 2000, Pereira et al. 1992). Einige der Publikationen setzten dabei auf Qualitäts-Indizes, die aus der Menge und der Beschaffenheit der ausgebrachten Rohblöcke abgeleitet werden. Die Ansätze sind vereinzelt rein mathematisch und definieren als Qualitätsparameter überwiegend die Häufigkeit von Trennflächen im Gesteinsverband. Wichtige Einflussfaktoren auf die Qualität einer Lagerstätte wie etwa ästhetische oder gesteintechnische Eigenschaften des Naturwerksteins geraten dabei allerdings oftmals in den Hintergrund. Auf weitere Publikationen mit dem Schwerpunkt der Trennflächenanalyse und Rohblockvorhersage wird noch detaillierter im Kapitel 6.5 eingegangen.

1.3 Vorgehensweise und Grundkonzept der vorliegenden Arbeit

Die in der Dissertation vorgelegten methodologischen Aspekte zur Erfassung und Bewertung von Naturwerksteinvorkommen wurden am Beispiel thailändischer Lagerstätten erarbeitet. Dazu konnten im Rahmen eines sechsmonatigen Geländeaufenthaltes ausgewählte Lagerstätten in Thailand (siehe Anhang I) geologisch aufgenommen werden. Im Vordergrund standen lithologische und strukturelle Untersuchungen in magmatischen, metamorphen und sedimentären Vorkommen, die den Einfluss lagerstätten-geologischer Faktoren auf den Abbau quantifizieren sollen. Durch die Untersuchungen soll letztlich eine präzise Vorstellung über die Beschaffenheit und die Ergiebigkeit der Abbaugebiete entstehen.

An 30 Varietäten des thailändischen Naturwerksteinpotentials (siehe Anhang I) wurden darüber hinaus petrographisch-gefügekundliche und petrophysikalische Untersuchungen vorgenommen, die das Lagerstättenmaterial auf geowissenschaftlicher Grundlage charakterisieren. Durch Gefügeanalysen und die Simulation physikalischer Verwitterungsprozesse wird eine umfangreiche Datensammlung zum Verhalten der Materialien unter

destruktiven Bedingungen, d. h. unter Einfluss der natürlichen Verwitterung abgeleitet, um zu einer konkreten Aussage über die Qualität der Abbauprodukte zu gelangen.

In diesem Zusammenhang wird nachstehend noch einmal die Dringlichkeit einer gesteintechnischen Charakterisierung unter entwicklungspolitischen Gesichtspunkten deutlich gemacht. Längst haben die Einführung neuer Handelssorten auf dem internationalen Markt und die intensiv entwickelten Qualitätskriterien infolge des hohen Konkurrenzdruckes eine qualitative und quantitative Ausweisung von Handelssorten an Standards gefordert. Für die verschiedenen Anwendungsbereiche von Naturwerksteinen gelten bereits jetzt europäische Prüf- und Produktnormen (DIN EN), die spezielle Anforderungen an die jeweiligen Produkte enthalten. So dürfen entsprechend der Bauproduktenrichtlinie nur noch Materialien aus Naturstein verwendet werden, die einen Nachweis der Konformität (d. h. die betreffenden Anforderungen werden vom Bauprodukt erfüllt) erbringen können (siehe Deppisch & Krug 2005). Für Rohblöcke, Rohplatten und Massivsteine erfolgt dies zurzeit noch über eine Konformitätserklärung. Für Bekleidungsplatten, Belagsplatten und Fliesen aus Naturstein wird bei der Einfuhr in den europäischen Markt zusätzlich eine CE-Kennzeichnung gefordert (Deppisch & Krug 2005), wodurch sich höchste Anforderungen an die Qualität der Abbauprodukte ergeben.

Abbildung 1.2 fasst die Vorgehensweise und das Konzept der vorliegenden Arbeit in ihren wesentlichen Grundzügen zusammen.

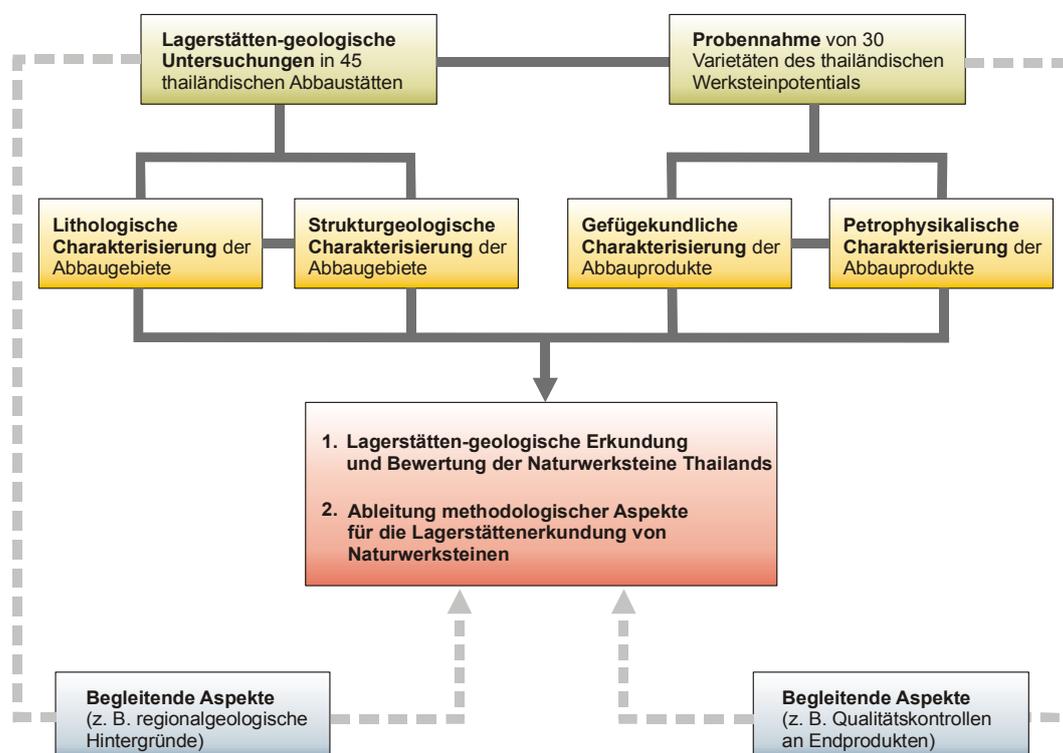


Abb. 1.2: Grundkonzept und Vorgehensweise der vorliegenden Arbeit bestehend aus lithologischen und strukturgeologischen Untersuchungen der Abbaugebiete sowie gefügekundlichen und petrophysikalischen Untersuchungen der Abbauprodukte. Begleitende Aspekte wie etwa die Einbindung der regionalen Geologie Thailands in den lagerstätten-geologischen Kontext ergänzen dabei das methodische Inventar zur Zielfindung der Arbeit (rot unterlegt). Weitere Erläuterungen im Text dieses Kapitels.

2. DER NATURWERKSTEINMARKT: GLOBALE BETRACHTUNG UND DIE POSITION THAILANDS

2.1 Übersicht zur internationalen Produktion von Naturwerkstein

2.1.1 Geographische Verteilung der Naturwerksteinproduzenten

Die Naturwerkstein-Industrie gehört in mehr als 50 Ländern der Erde zu einem bedeutenden Zweig auf dem Gebiet der Rohstoffgewinnung. Weltweit führend bei der Produktion von Naturwerksteinen sind dabei Asien und Europa (Abb. 2.1). Der europäische Anteil der Werksteinproduktion beträgt etwa 38 % und liegt damit deutlich hinter dem der asiatischen Staaten, die sich im Jahr 2004 mit etwa 45 % an der Weltproduktion von Naturwerksteinen beteiligten (Montani 2005). Die übrigen 15 % der Weltproduktion verteilen sich auf die amerikanischen Nationen, Afrika und Ozeanien. Etwa 75 % der weltweit abgebauten Werksteine werden dabei von nur zwölf Ländern getragen, die jeweils eine jährliche Produktion von >1 Mio. t Naturwerkstein erbringen. Sechs dieser Spitzenproduzenten sind europäische Staaten, fünf davon der Europäischen Union zugehörig. Vier Nationen sind in Asien, zwei in Amerika und eine in Afrika beheimatet (Tab. 2.1).

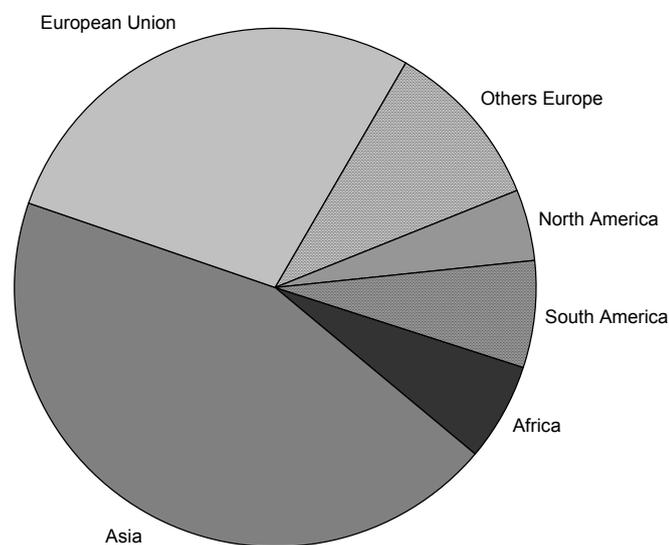


Abb. 2.1: Geographische Verteilung der Weltproduktion von Naturwerkstein (nach Montani 2005). Erläuterungen im Text dieses Kapitels.

Tab. 2.1: Führende Nationen bei der Produktion von Naturwerksteinen und ihre Erträge. Staaten der EU sind durch Fettdruck gekennzeichnet. Deutschland liegt mit 0.7 Mio. t unterhalb der Grenze von 1.0 Mio. t und zählt daher nicht zu den Spitzenproduzenten.

<i>Produzent</i>	<i>Produktionsmengen</i>
China	16.8 Mio. t
Italien	10.5 Mio. t
Indien	10.1 Mio. t
Iran	7.5 Mio. t
Spanien	6.2 Mio. t
Türkei	2.6 Mio. t
Brasilien	2.5 Mio. t
Griechenland	2.0 Mio. t
Portugal	2.0 Mio. t
Frankreich	1.5 Mio. t
Südafrika	1.4 Mio. t
USA	1.3 Mio. t
...	
Deutschland	ca. 0.7 Mio. t

Die ökonomisch signifikanten Regionen der europäischen Naturwerksteinproduktion liegen überwiegend im südlichen Europa mit Anschluss an das Mittelmeer. Länder wie Italien, Spanien, Portugal oder Griechenland decken aufgrund ihrer vorteilhaften Konditionen durch die jeweilige regionale Geologie und der langjährigen Tradition auf dem Gebiet der Naturwerksteinverarbeitung etwa 90 % der EU-Produktion ab (Europäische Kommission 1998). Neben weiteren traditionellen Naturwerksteinproduzenten in Europa, wie beispielsweise den skandinavischen Ländern, konnten sich die Tschechische Republik und Polen fest auf dem Naturwerksteinsektor formieren (Montani 2003).

Der europäische Beitrag zur weltweiten Naturwerksteinproduktion ist seit einigen Jahren rückläufig. Die Ursache dafür ergibt sich vorrangig aus den starken Fördermengen sowie den zunehmenden Weiterverarbeitungskapazitäten in Ländern wie China, Indien, Brasilien oder Südkorea, welche gleichzeitig durch deutlich niedrige Arbeitskosten im Vergleich zu europäischen Ländern gekennzeichnet sind (Terezopoulos 2004). Besonders beeindruckend sind die enormen Mengen an asiatischen Naturwerksteinen, die derzeit kontinuierlich in den internationalen Markt eingeführt werden. China konzentrierte sich in den 1990er Jahren auf einen Zuwachs seiner Lagerstättenkapazitäten und akquirierte darüber hinaus wesentliche Mengen Rohmaterial aus Indien, Brasilien, Süd Afrika und Norwegen. Im asiatischen Raum vertritt China heute eine einzigartige Position hinsichtlich der angebotenen Mengen an Fertigprodukten sowohl aus Übersee als auch aus den eigenen Lagerstätten. Aufgrund der günstigen geographischen Lage nah am Pazifik und anderer Seewege haben sich für China längst stabile und profitable Märkte gefunden, darunter Europa, die Westküste der USA und

der mittlere Osten, der bis vor einigen Jahren nur eine untergeordnete Rolle im internationalen Handel gespielt hat (Bruno & Paspaliaris 2004).

2.1.2 Anwendungsbereiche für Naturwerksteine

Naturwerksteinprodukte reichen von unbearbeiteten Rohblöcken über Halbfertigware bis hin zu veredelten Maßprodukten für die verschiedensten Anwendungsbereiche. Die Bauindustrie verarbeitet etwa 70-75 % (Primavori 1999, Founti 2004) der weltweit gewonnen Rohstoffmengen in Form von Fliesen, Fassadenplatten, Treppenstufen oder anderen architektonischen Elementen und stellt damit das umfangreichste Feld für die Anwendung von Naturwerksteinen dar (Abb. 2.2). Obwohl die Bauindustrie innerhalb einzelner Epochen der letzten drei Jahrzehnte dazu überging, Naturwerksteine durch den Verbau von etwa Stahl, Beton, Glas oder Ziegel zu ersetzen, konnten Alternativprodukte die Nachfrage in Bezug auf den natürlichen Rohstoff zu keinem Zeitpunkt ganz unterbinden. Die permanent hohe Nachfrage für Naturwerksteine ist nicht zuletzt wohl auch auf die hochwertige Erscheinung des Materials, seine architektonische Vielfältigkeit und seinen Prestigecharakter zurückzuführen, der zahlreiche öffentliche Einrichtungen und Repräsentativbauten in aller Welt prägt (Abb. 2.3).

Ein weiterer Abnehmer relativ großer Mengen an Naturwerksteinen ist der Grabmalsektor, der etwa 15 % der Weltproduktion verarbeitet. Die Grabmalindustrie bevorzugt dabei Halbfertigprodukte in Form von kleineren Blöcken, die anschließend für individuelle Zwecke weiterverarbeitet werden. Auf den Gebieten Städtebau und Kunsthandwerk erfüllt der Naturwerkstein im Wesentlichen funktionelle bzw. dekorative Aspekte oder trägt im Rahmen von Konservierungsmaßnahmen in der Restauration zum Schutz und Erhalt von Kulturgut bei (Abb. 2.2).

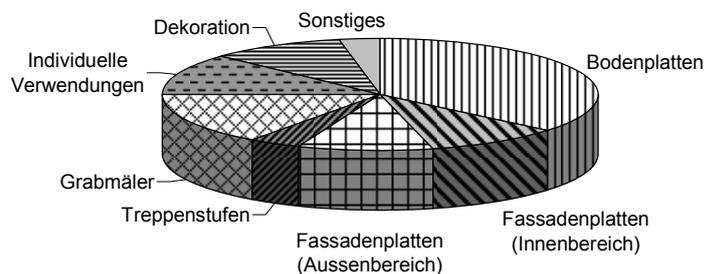


Abb. 2.2: Produktgruppen der Naturwerksteinproduktion.

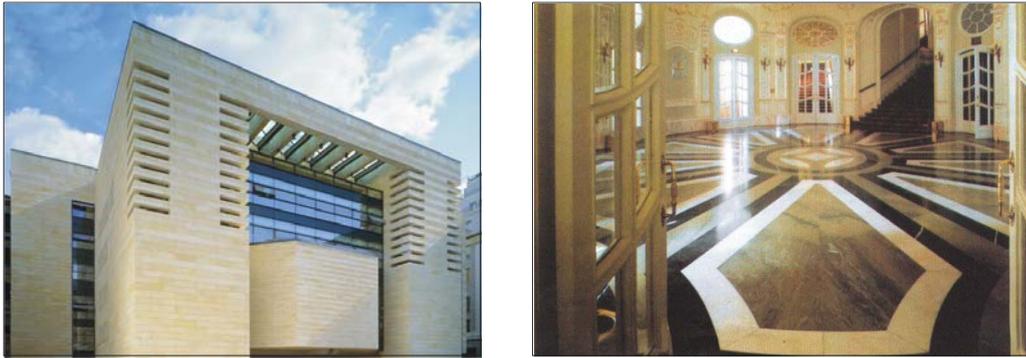


Abb. 2.3: Kalkstein als Außenverkleidung der Nationalbank von Athen, Griechenland (links). Carbonatgesteine im Innenbereich des Comedy Theatre in Vigszinhaz, Ungarn (Quelle: www.osnet.ntua.gr).

2.1.3 Im- und Export von Naturwerksteinen

Mit der kontinuierlichen Zunahme des Natursteinabbaus in vielen Ländern der Erde ist auch der internationale Handel mit dem Rohstoff Naturstein angestiegen (Napoli 2003). Im Jahr 2001 waren weltweit sechs Länder führend in Bezug auf den Im- und Export von Naturwerksteinen (Montani 2003). In absteigender Reihenfolge der Exportzahlen konnten China, Italien, Indien, Spanien, Brasilien und Portugal jeweils >1 Mio. t Material auf dem internationalen Markt absetzen.

An führender Position der Importländer stehen u.a. Deutschland, Italien, China und auch Spanien. Die Tatsache, dass die drei zuletzt genannten Staaten sich auch unter den führenden Exportstaaten befinden, verdeutlicht noch einmal die Dominanz dieser Nationen auf dem internationalen Naturwerkstein-Markt. Neben den hohen Produktionsraten liegen die Gründe hierfür sicherlich darin, dass diese Länder zusätzlich noch große Mengen an Rohmaterial und Halbfertigwaren importieren, die es ihnen anschließend erlauben, durch individuelle und flexible Endfertigungen die unterschiedlichsten Nachfragen auf dem Markt abzudecken.

2.2 Die thailändische Naturwerkstein-Industrie

2.2.1 Entwicklungen

Die industrielle Produktion von Naturwerkstein in Thailand lässt sich bis auf wenige chronologische Lücken bis an den Anfang der 1980er Jahre zurückverfolgen. Die Produktion begann im Jahr 1980 mit der Förderung geringer Mengen an Marmor (Permpoon et al. 1992), die in einer Größenordnung von <10.000t pro Jahr lagen (Abb. 2.4). Die Marmorgewinnung erreichte 1984-1985 einen vorläufigen Höhepunkt, als sich die Abbauraten mit insgesamt etwa 40.000 t pro Jahr im Vergleich zu 1980 mehr als verdreifacht hatten (Sampattavania 1992) (Abb. 2.4). Zeitgleich mit einem vorübergehenden Rückgang der Marmorproduktion in den Jahren 1985-1986 (Abb. 2.4) erfolgte der erste Abbau von granitoiden Gesteinen. Die Gewinnung von Hartgesteinen etablierte sich schnell auf dem thailändischen Werksteinsektor

und formierte sich neben der Marmorproduktion zu einem gleichwertigen Industriezweig. Im Jahr 1990 konnten bereits mit rund 55.000 t pro Jahr identische Produktionsraten wie auf dem Marmorsektor erzielt werden (Permpoon et al. 1992). Insgesamt konnten beide Sektoren ihre Abbauraten in der zweiten Hälfte der 1980er Jahre kontinuierlich steigern, wobei teilweise eine Verdopplung der Zuwachsraten innerhalb weniger Jahre erreicht wurde (Abb. 2.4).

Während zu Beginn der 1980er Jahre die Produktionszahlen von Naturwerkstein weit über den Konsummengen von Marmor und Granit lagen, konnte 1991 die Werkstein-Industrie den Rohstoffbedarf mit einer Fördermenge von 151.000 t pro Jahr (Sampattavania 1992) gerade noch abdecken (Abb. 2.4). Die Fördermengen setzten sich dabei aus fast gleichen Teilen Marmor und Granit zusammen, die zu diesem Zeitpunkt in mehr als hundert Lagerstätten landesweit abgebaut wurden. Noch im selben Jahr begann der Abbau von Gneisen (Permpoon et al. 1992).

Die erste Hälfte der 1990er Jahre ist in Thailand als auch anderen Staaten in SE-Asien durch einen wirtschaftlichen Aufschwung gekennzeichnet, in dessen Rahmen die Bauindustrie florierte und sowohl in der Metropole Bangkok als auch in anderen Bevölkerungszentren des Landes eine erhebliche Anzahl an Großbauprojekten realisiert werden konnte. Dieses Wachstum der Baubranche beeinflusste im Gegenzug auch den thailändischen Naturwerksteinsektor, der während dieser Zeit einen Großteil der angebotenen Produkte auf dem einheimischen Markt absetzen konnte. Ergänzend zu den landeseigenen Werksteinen wurden in Zeiten des Wohlstands große Mengen internationaler Naturwerksteine importiert (Duerrast et al. 2003).

Durch die asiatische Wirtschaftskrise im Jahre 1997 kam dieser Aufschwung jedoch zum Erliegen. Der erhebliche Einfluss dieser Krise auf die Gesamtwirtschaft der Region zeigt sich in einem Vergleich des Brutto-Inlandproduktes (BIP) aus dem Jahr 1997 mit dem der vorherigen Jahre (1990-1996), in denen die so genannten „Tiger-Staaten“ (u. a. Hong Kong, Taiwan, Singapur, Süd Korea, Malaysia und Thailand) noch Zuwachsraten des BIP von 40-60 % verzeichnen konnten. Thailand konnte im Jahr 1996 noch Kapital in Höhe von etwa 11 % des BIP gewinnen, musste aber dann mit dem Einsetzen der Krisenprozesse einen Kapitalabfluss in gleicher Größenordnung hinnehmen (Holl 1998). Als Folge der Asienkrise mussten in Thailand letztlich erhebliche Teile der Produktionskapazitäten geschlossen werden, woraufhin es in einzelnen Produktbereichen zu einem Einbruch bis 90 % für mehrere Jahre kam. Noch jetzt zeugen manchenorts vereinzelt stehende Neubauruinen oder abgebrochene Bauvorhaben im Stadtbild Bangkoks von den Auswirkungen der Rezession. Die Gesamtproduktion für Granit, Marmor, Gneis und Kalkstein, die 1997 eine jährliche Gewinnrate von 200.000 t pro Jahr überschritten hatte, fiel um fast zwei Drittel auf etwa 75.000 t im Jahr 1998. Im darauf folgenden Jahr 1999 erreichte die Naturwerksteinproduktion in Thailand mit etwa 54.000 t ihren niedrigsten Stand seit 1987-1988 (Abb. 2.4).

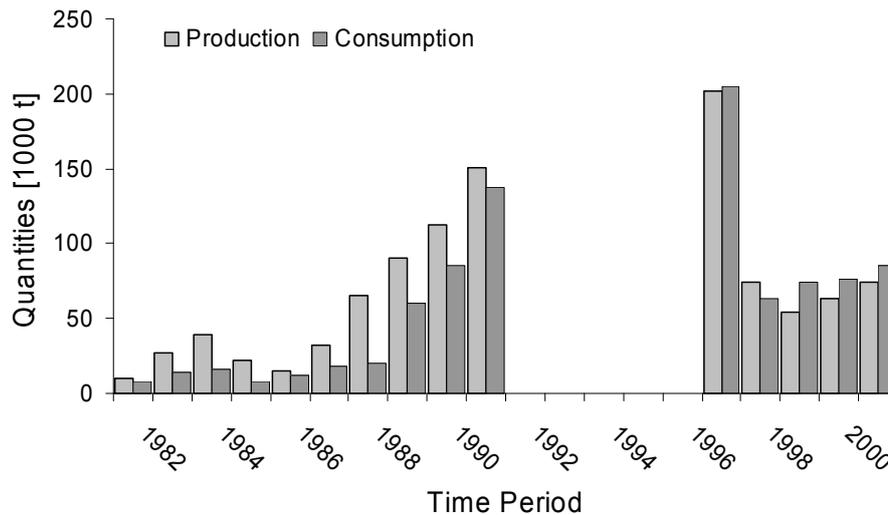


Abb. 2.4: Produktion und Konsum von Granitoiden und Carbonatgesteinen in Thailand für den Zeitraum 1982-2001 (nach Permpoon et al. 1992, Sampattavania 1992, Vereinte Nationen 2001, Wu 2002). Für die Jahre 1992-1996 liegen keine Angaben vor.

Infolge des Krisengeschehens wurden der thailändischen Naturwerkstein-Industrie restriktive Importbestimmungen auferlegt, so dass in den Jahren unmittelbar nach dem wirtschaftlichen Zusammenbruch nur noch begrenzte Mengen, vornehmlich Hartgesteine aus Norwegen, Vietnam, China und Brasilien, eingeführt werden konnten (Duerrast et al. 2003). Im Jahr 1997 lag der Konsum von Granit bei etwa 120.000 t, wobei lediglich die Hälfte davon im eigenen Land produziert werden konnte. Während dann in den Folgejahren kontinuierlich steigende Mengen an Hartgestein in Thailand eingeführt wurden, stagnierte die heimische Granitproduktion bei Fördermengen von etwa 16-20.000 t pro Jahr. Der Marmorsektor entwickelte sich gegenläufig, da der Industriezweig durch die minimalen Einfuhrmengen zwischen 1997 und 2001 (Tab. 2.2) wirtschaftlich gestärkt werden konnte. Der Marmorabbau in Thailand erreichte 2001 mit 53.000 t etwa das Dreifache der Granitproduktion.

Tab. 2.2: Thailändische Importmengen von Granit und Marmor im Zeitraum 1997-2001 (Vereinte Nationen 2001).

	1997	1998	1999	2000	2001
Granit	109.045 t	41.133 t	49.358 t	73.180 t	76.956 t
Marmor	200 t	98 t	100 t	0 t	0 t

Seit dem Jahr 2001 kann ein allmählicher Anstieg der Produktion beobachtet werden, was besonders für die zentralen und nördlichen Teile des Landes gilt (Tab. 2.3, 2.4). Im Rahmen dieses Neuanfangs wurden auch die Importvorschriften für Naturwerkstein gelockert, so dass beispielsweise seit Anfang 2003 auch Marmor in Form unbearbeiteter Rohblöcke eingeführt werden darf. Darüber hinaus exportiert die thailändische Naturwerkstein-Industrie geringe Produktmengen, insbesondere nach Japan, Taiwan und Korea, daneben aber auch nach Australien und in die USA.

Tab. 2.3: Granitproduktion in Thailand in den Jahren 1997 bis 2002 (Vereinte Nationen 2001; Mitteilung des Department of Mineral Resources/ Statistic Section, Technical and Planning Division). Ein leichter Anstieg der Produktionszahlen ab dem Jahr 2001 ist dabei vorrangig in den zentralen und nördlichen Provinzen (Fettdruck) zu beobachten. Angaben in [m³].

	1997	1998	1999	2000	2001	2002
Chachoengsao	490	510	176	659	8	50
Chiang Rai	2	-	80	-	-	n/a
Chanthaburi	168	168	144	-	-	n/a
Lampang	50	-	-	-	-	n/a
Nakhon Ratchasima	240	-	-	-	-	n/a
Nakhon Sawan	740	710	380	-	58	114
Phetchabun	299	206	53	150	250	150
Phetchaburi	-	-	-	-	130	n/a
Prachuap Khiri Khan	2725	434	148	1214	589	808
Ratchaburi	582	485	182	360	592	441
Songkhla	81	-	-	-	-	n/a
Suphan Buri	180	10	700	-	450	n/a
Tak	18460	6970	4327	5212	4585	5139
Total	24017	9493	6190	7595	6659	6772

Tab. 2.4: Marmorproduktion in Thailand in den Jahren 1997 bis 2002 (Vereinte Nationen 2001; Mitteilung des Department of Mineral Resources/ Statistic Section, Technical and Planning Division). Ein leichter Anstieg der Produktionszahlen ab dem Jahr 2001 ist dabei vorrangig in den zentralen und nördlichen Provinzen (Fettdruck) zu beobachten. Angaben in [m³].

	1997	1998	1999	2000	2001	2002
Chai Nat	5370	1054	1925	1121	200	256
Kamphaeng Phet	9125	7710	5280	6450	5730	5280
Kanchanaburi	270	60	-	-	-	n/a
Lampang	7592	102	-	52	565	1085
Lamphun	25	20	20	-	-	n/a
Lop Buri	2592	1500	749	520	235	n/a
Nakhon Ratchasima	12210	1350	150	1276	7899	5312
Phetchabun	570	415	-	33	-	n/a
Phetchaburi	111	-	-	-	-	n/a
Sara Buri	3757	2913	2572	4219	3560	4665
Sra Kaeo	96	144	144	72	144	120
Sukhothai	4735	1640	2500	1300	1180	1342
Uthai Thani	2000	400	100	100	-	n/a
Uttaradit	1270	600	355	336	-	n/a
Yala	826	160	65	150	-	n/a
Total	50589	18168	13860	15629	19563	18060

Der Expansionsprozess der thailändischen Naturwerkstein-Industrie wird im Wesentlichen durch Unternehmen vorangebracht, die als Großindustrie mit teilweise mehr als 100 Mitarbeitern in Bereichen der Granit- und Marmorproduktion agieren. Obwohl Sandstein ebenfalls in größeren Mengen gewonnen wird, ist dieser Sektor aufgrund der Dominanz kleinerer und kleinster Familienunternehmen anders strukturiert. Der größte Teil der Unternehmen der Naturwerkstein-Industrie ist in der „Thai Granite and Marble Association“ (TMGA) mit Sitz in Bangkok, Thailand, organisiert. Der Verband wurde im Jahr 1992 gegründet und umfasste im Jahr 2003 bereits 144 Mitglieder (Duerrast et al. 2003).

2.2.2 Abbautechnik, technische Ausrüstung der Werke und verfügbare Produktgruppen

In der Granitproduktion ist das Bohren und Sprengen eine weit verbreitete Verfahrenstechnik, die ungeachtet einer eventuellen Materialschädigung noch in fast allen Lagerstätten praktiziert wird (Abb. 2.5a, b). Im Gegensatz dazu werden die thailändischen Marmor- und Kalksteinvorkommen mit Abbautechniken gewonnen, in deren Rahmen Gesteinsblöcke mit materialschonenden Seilsägen und Kettensägen aus dem Fels getrennt werden (Abb. 2.5c, d). Das Verfahren wurde in der Vergangenheit auch in einigen thailändischen Hartgesteinslagerstätten erprobt, musste jedoch wegen eines hohen Materialverschleißes der Schneidsegmente und des daraus resultierenden hohen Kostenfaktors wieder eingestellt werden. Beim Abbau von thailändischen Sandsteinen lassen sich verschiedene Gewinnungstechniken unterscheiden. Den zahlreichen kleineren Familienbetrieben stehen in der Regel nur geringe finanzielle Mittel zur Verfügung, so dass hier in vielen Fällen der Abbau ohne Einsatz von Maschinen geführt werden muss und sich auf einfachste Brechverfahren beschränkt. Das Material wird vorrangig durch manuelles Lösen mittels Hammer und Meißel gewonnen (Abb. 2.5e, f). In solchen Fällen, in denen die geologischen Konditionen in der Lagerstätte die Gewinnung größerer Blöcke erlauben, erfolgt das Lösen über eine Kombination von Reihenbohrungen und anschließendem Spalten entlang der Bohrlinien.

Die Weiterverarbeitung von Rohblöcken übernehmen in der Regel Granit- und Marmorwerke mit größeren Verarbeitungskapazitäten, in denen das Material mittels Gatter- oder Multidiskblocksägen in Rohplatten aufgesägt wird. Endprodukte stellen mehrheitlich rechtwinkelige Bodenplatten oder Fassadenplatten mit den Standardmaßen 80 x 40 x 2 cm für granitoide Gesteine und 60 x 30 x 2 cm für Marmor und Kalksteine dar, die in der Regel vollständig poliert sind. Die Sandstein-Industrie fertigt überwiegend handbehauene Bodenplatten und Wandverblender mit einer Standardgröße von 80 x 40 x 5 cm sowie quaderförmige Bruchsteine für Mauerwerke. Die Bearbeitung von Sandsteinplatten ist deutlich vielfältiger gestaltet als auf dem Granit- oder Marmorsektor, da neben den handbehauenen Produkten auch gesägte Platten mit geschliffener, spaltrauer und bossierter Oberfläche angeboten werden. Granite, Carbonatgesteine und Sandsteine zeigen insgesamt eine hohe Variabilität hinsichtlich der Abmessungen und Oberflächenbearbeitung. Für die Anwendung ergibt sich daraus, dass die Formate individuell den Bedürfnissen der Planung angepasst werden können.

Bei der Fertigung der Produkte wird mehrheitlich auf Maschinen italienischer Hersteller zurückgegriffen, wodurch viele Firmen internationale Standards bezüglich Winkligkeit, Abmessung und Ausbildung der Schnittkanten erreichen. Darüber hinaus ist u. a. asiatische Fertigungstechnik, beispielsweise aus China oder Südkorea, im Einsatz. Größere Betriebe auf dem thailändischen Granit-, Marmor- und Kalksteinsektor verfügen über ein umfangreiches Fertigungsinventar und produzieren dadurch zeitgleich an bis zu zehn Gattersägen und mehreren Polierstraßen.



Abb. 2.5: a) Oberflächennaher Granitabbau durch kontrollierte Bohrlochspaltungen (Tak Granite Mining Co., Tak), b) Handling von abgesprengtem Bouldermaterial (Silamane Co., Tak), c) Moderne Abbautechnik in Marmorbrüchen (Sawang Marble Co., Kamphaeng Phet), d) Aus dem Gesteinsverband gesägte Marmorblöcke (Khao Yai Tachang Marble Co., Nakhon Ratchasima), e) Manuelles Spalten von Sandsteinen (Nakhon Ratchasima), f) Spaltrauhe, grüne Sandsteinplatten (Nakhon Ratchasima).

Im Zuge einer abschließenden Qualitätskontrolle wird eine Qualifikation der Handelssorten nach der überwiegenden Farbe des Gesteins und der Ausbildung struktureller Merkmale, wie etwa Häufigkeit und Farbe von mineralisierten Klüften, vorgenommen. Bei Marmoren und Kalksteinen mit qualitativen Mängeln kommt es im Anschluss an eine Qualitätsprüfung auch noch zu Korrekturen und Nachbearbeitungen, in deren Rahmen offene Poren oder unzureichend mineralisierte Risse nachträglich mit Spachtelmasse verfüllt werden. Nicht repräsentative Produkte, z.B. stark alterierte Platten, werden in der Qualität herabgestuft, so dass im Rahmen festzulegender Grenzmuster letztlich eine relative Stabilität von Handelssorten durch das Prüfverfahren gewährleistet werden kann.

In der Marmor- und Sandsteinproduktion, und hier regional begrenzt, werden neben den herkömmlichen Bodenplatten auch kunsthandwerkliche Arbeiten angeboten. Die Produkte reichen von stilvollen Gefäßen über dekoratives Mobiliar bis hin zu Reliquien für religiöse Gruppen. Letztere stellen insbesondere für den südost- und ostasiatischen Raum ein Exportprodukt mit hoher Nachfrage dar (Abb. 2.6).

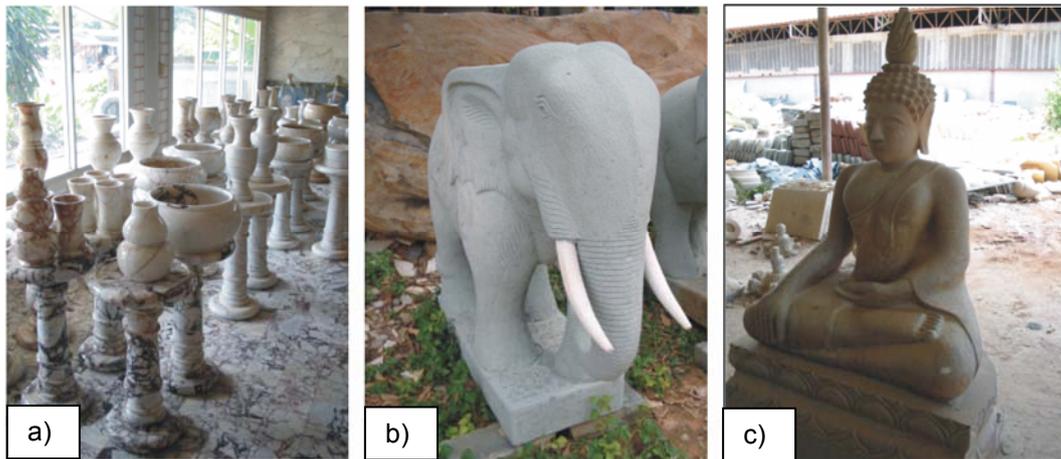


Abb. 2.6: Kunsthandwerkliche Arbeiten aus der Provinz Nakhon Ratchasima. a) Dekoratives Mobiliar aus Marmor. b) Tierskulpturen aus grünem Sandstein. c) Religiöse Reliquien aus gelbem Sandstein.

3. REGIONALE GEOLOGIE THAILANDS UND REGIONALISIERUNG DER LAGERSTÄTTENPROVINZEN FÜR NATURWERKSTEINE

3.1 Die tektonische Evolution Thailands: Überblick und Zusammenhänge

3.1.1 Theorien zur tektonischen Evolution Thailands und SE-Asiens

Das geologische Grundgerüst Thailands setzt sich aus zwei mikrokontinentalen Terrains, dem Shan Thai Block (Sinoburmalya) und dem Indochina Block, zusammen (Gatinsky et al. 1978, Bunopas 1981, Hutchison 1989). Beide Blöcke sind über eine mobile Zone miteinander verschweißt (Stauffer 1973, Ridd 1980, Hahn et al. 1986) (Abb. 3.1). Während der Shan Thai Block die westliche Hälfte Thailands, E-Myanmar, und NW-Laos abdeckt, beinhaltet der Indochina Block die östliche Hälfte Thailands, Laos, Kambodscha, S-Vietnam und die östliche Malaysische Halbinsel. Die mobile Zone ist durch den Yunnan Malay Mobile Belt charakterisiert, der den östlichen Teil N-Thailands und den westlichen Teil NE-Thailands umfasst. Der Gürtel zeichnet sich durch eine N-S-Streichrichtung aus und ist sinistral entlang der NW-SE-streichenden Moei Uthai Thani Fault Zone versetzt. In N- und NE-Thailand teilt sich die mobile Zone in den westlichen Sukhothai Foldbelt und den östlichen Loei Foldbelt auf (Hahn et al. 1986). Nach Bunopas & Vella (1978) und Bunopas (1981) wird der Sukhothai Foldbelt dem Shan Thai Block, der Loei Foldbelt dem Indochina Block zugeordnet.

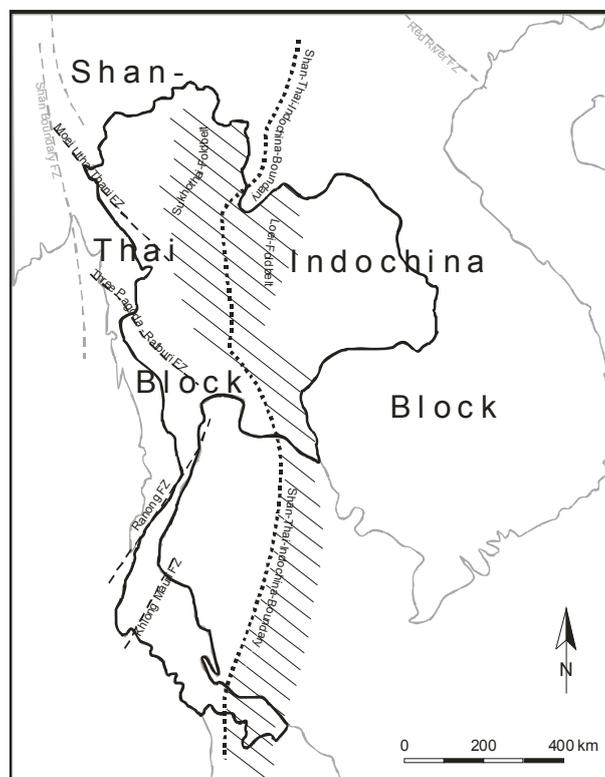


Abb. 3.1: Geologisches Grundgerüst Thailands und SE-Asiens mit den zwei mikrokontinentalen Blöcken Shan Thai und Indochina sowie dem Yunnan Malay Mobile Belt entlang der Suturezone beider Kontinentalblöcke (modifiziert nach Hahn et al. 1986).

Obwohl die zwei Mikrokontinente Shan Thai und Indochina eine unabhängige geologische Evolution vor dem Zeitpunkt der Kollision aufweisen, kann für beide Einheiten aufgrund ähnlicher stratigraphischer Sequenzen ein gemeinsamer Ursprung angenommen werden. Fossilienfunde in den Sequenzen der Kontinentalblöcke deuten dabei an, dass beide Landmassen eventuell ehemalige Randgebiete des Großkontinents Gondwana repräsentieren. Palaeogeographische Rekonstruktionen und palaeomagnetische Daten zeigen darüber hinaus, dass sich die Region SE-Asien neben den beiden großen Einheiten Shan Thai und Indochina aus einem komplexen Mosaik allochthoner Kontinentalblöcke sowie aus Fragmenten von Inselbögen und Ophiolithen aufbaut (Bunopas 1981) (Abb. 3.2). Metcalfe (1991) nimmt dagegen an, dass sich die Region lediglich aus den vier Terrains S-China, Indosinia (Indochina), Sinoburmalaya (Shan-Thai) und E-Malaysia zusammensetzt.

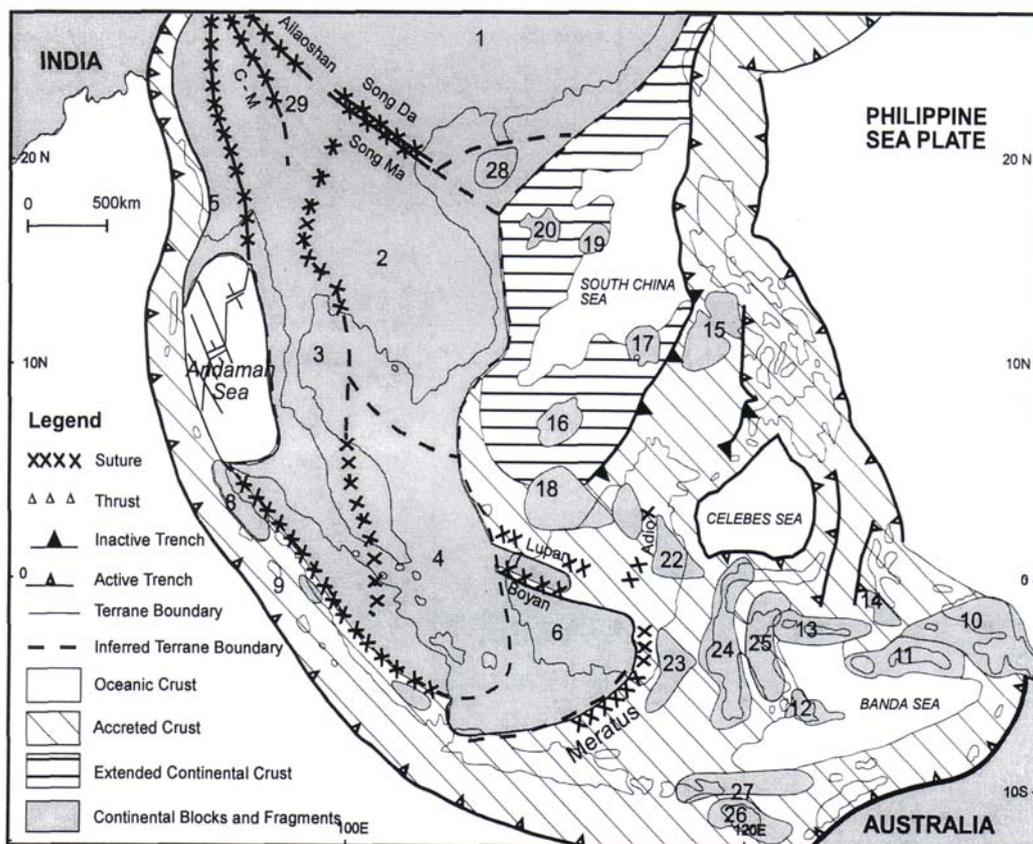


Abb. 3.2: Verteilung von Kratonen und Kontinentalfragmenten im Raum SE-Asien (aus Mickein 1997). 1. South China, 2. Indochina, 3. Sibumasu, 4. Eastmalaya, 5. West Burma, 6. Southwest Borneo, 7. Semitau, 8. Sikuleh, 9. Natal, 10. West Irian Jaya, 11. Buru Seram, 12. Buton, 13. Bangai-Sula, 14. Obi-Bacan, 15. North Palawan, 16. Spradley Island-Dangerous Ground, 17. Reed Bank, 18. Luconia, 19. Macclesfield Bank, 20. Parcel Islands, 21. Kelabit-Longbowan, 22. Mangkalihat, 23. Paternoster, 24. West Sulawesi, 25. East Sulawesi, 26. Sumba, 27. Banda Allochthon, 28. Qiongzong and Yaxian Terrains of Hainan, 29. Simao Terrain, C-M = Changning Mengiiian Suture.

Nach Gatinsky et al. (1984) und Hutchison (1989) beginnt die tektonische Evolution SE Asiens im Oberen Devon und vollzieht sich über mehrere Stadien bis in die Gegenwart. Hutchison (1989) zufolge löste sich das Sinoburmalaya Terrain in Zeiten des Devons bis Karbons vom NW-Rand Gondwanas. Die Theorie ist konträr mit der Auffassung von

Helmcke (1983, 1985, 1986), der das Terrain aufgrund von unter-karbonischen bis oberpermischen pelagischen Sedimenten, Flysch und Molasse im Petchabun Fold Belt, einem östlichen Randgebiet Sinoburmalayas, von einem vulkanischen Bogen ableitet.

Durch die Schließung der Palaeo-Tethys infolge einer nach E gerichteten Subduktion kam es zur Kollision Sinoburmalayas und Indochinas (Bunopas 1992, Sengör 1985). Das Ereignis führte zur Bildung des ostasiatischen Kontinents und ist Gegenstand zahlreicher Diskussionen, die sich auf die geochronologische Einordnung und den Ort der Kollision sowie auf die Intensität und Verbreitung der Deformationsstrukturen konzentrieren (Bunopas & Vella 1978, Bunopas 1981; Chonglakmani et al. 1991; Helmcke & Lindenberg 1983, Helmcke 1984, 1985; Mitchell 1981).

Als Zeitpunkt für eine Kollision werden das Untere Karbon (Hahn et al. 1986) und Mittlere Perm (Helmcke & Kraikhong 1982, Helmcke & Lindenberg 1983, Helmcke 1984), die Untere Trias (Cooper et al. 1989, Metcalfe 1990, Mitchell 1992), Obere Trias (Bunopas & Vella 1978, Sengör 1984, Hutchison 1989), und auch Oberes Jura (Audley-Charles 1983, 1984) angenommen. Die aus der Kollision resultierende so genannte „Indosinische Orogenese“ ist in der Ausbildung eines Faltengürtels dokumentiert, der N-S-streichend von der Malayischen Halbinsel bis nach S-China reicht und möglicherweise eine Suturzone zwischen kontinentalen Einheiten darstellt. Auf thailändischem Gebiet wird diese Nahtzone durch die Nan-Uttaradit Suturzone repräsentiert, die in dem Gebiet NE' der Provinzhauptstadt Uttaradit durch gefaltete Mafit- bis Ultramafit-Komplexe charakterisiert ist. Abweichend von einem Kollisionsszenario von Mikrokontinenten gehen Helmcke & Kraikhong (1982), Helmcke & Lindenberg (1983), Helmcke (1984) und Altermann (1989) von der Schließung eines Back-arc Basins entlang der Linie Nan-Uttaradit im Zeitraum Oberes Karbon - Unteres Perm aus. Dieser Theorie zufolge würde es sich bei der Region Nan-Uttaradit also nicht um einen Teil des Shan Thai Blocks handeln, sondern um die westliche Fortsetzung des Indochina Blocks. Die Subduktionszone zwischen beiden Kontinenten wäre demnach weiter westlich, eventuell in den Gebieten des heutigen Myanmar, zu suchen, wo sie unter Umständen seit dem Oberen Karbon oder Unteren Perm aktiv ist (Helmcke et al. 1993).

Barr & MacDonald (1987) und MacDonald et al. (1991, 1993) halten ein Back-arc Milieu in der Region Nan-Uttaradit ebenfalls für wahrscheinlich. Barr & MacDonald (1991) fordern darüber hinaus ein weiteres Terrain zwischen den beiden Blöcken, das sich demnach E' des Shan Thai Terrains und W' des Indochina Terrains befindet. Dieses Terrain, das von Barr & MacDonald (1991) unter der Bezeichnung Sukhothai Terrain und von Sattayarak et al. (1989) unter der Bezeichnung Nakhon Thai Terrain geführt wird, grenzt sich im E durch die Nan-Uttaradit Zone und im W durch eine cryptische Suturzone von dem Shan Thai Terrain ab. Die cryptische Suturzone würde sich folglich W' der Linie Nan-Uttaradit befinden. Indizien für eine Kollision entlang dieser verborgenen Nahtlinie ergeben sich u. a. aus petrologischen und geochemischen Untersuchungen an Vulkaniten des Chiang Mai Belts, die einen magmatischen Bogen über einer nach E gerichteten Subduktionszone repräsentieren (Mitchell 1981). Weitere Argumente für tektonische Aktivitäten westlich der Linie Nan-Uttaradit liefern magmatische Komplexe und Metamorphite entlang des Kontinentalrands von Shan Thai, deren Bildung eine nach E einfallende Subduktionszone und ein „underplating“ Shan

Thais unter die bereits kollidierten Terrains Sukhothai und Indochina erfordert (Barr & MacDonald 1991).

3.1.2 Extensionstektonik

In der Zeit vom Oberen Perm bis zur Unteren Trias kam es in SE-Asien zu einer Extension der kontinentalen Kruste, die zur Ausbildung von N-S- und NW-SE-streichenden Halbgräben in den nördlichen und nordöstlichen Teilen Thailands geführt haben (Helmcke 1983; Cooper et al. 1989, Sattayarak et al. 1989, Chonglakmani & Helmcke 1989, Kozar et al. 1992, Chonglakmani et al. 1991, Gabel et al. 1993). In NE-Thailand entwickelten sich Halbgräben in der Region Petchabun, Khon Khaen und Ubon Ratchathani (Abb. 3.3a). Heggemann et al. (1994) und Drumm et al. (1993) sehen in den Halbgräben die initiale, rift-ähnliche Phase einer lang andauernden thermischen Subsidenz dokumentiert. Die Extension führte in NE-Thailand zur Bildung des Khorat Beckens, das einen großen Ablagerungsraum für klastische Sedimente darstellt. Heggemann (1994) gibt an, dass das Khorat Becken in einem Zeitraum beginnend von der oberen Trias bis ins Palaeogen mit mehr als 4.5 km mächtigen kontinentalen Serien gefüllt wurde, die das heutige Khorat Plateau aufbauen. Die lithostratigraphischen Einheiten wurden von Ward & Bunnag (1964) unter der Bezeichnung Khorat Gruppe zusammengefasst und ausführlich von zahlreichen Autoren bearbeitet (z. B. Heggemann 1994, Sattayarak 1983, Maranate & Vella 1986, Chonglakmani & Sattayarak 1981, Ward & Bunnag 1964). Die Verteilung der Khorat Gruppe in SE-Asien ist in Abbildung 3.3b dargestellt.

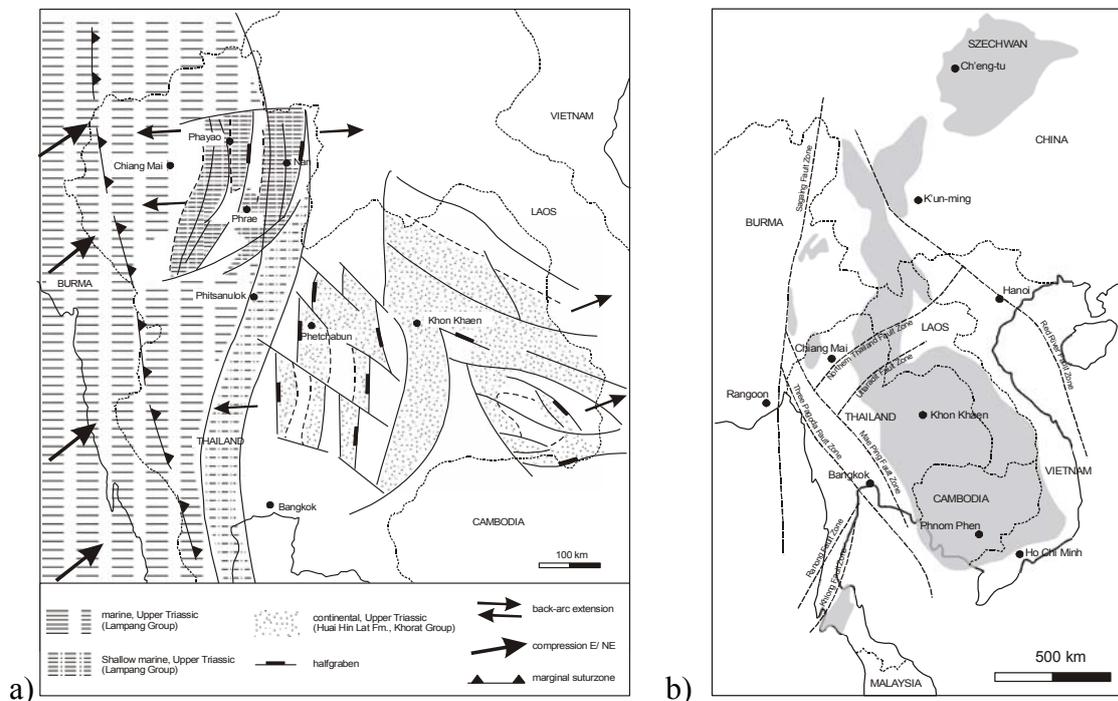


Abb. 3.3: a) Triassische Halbgräben in NE-Thailand (nach Heggemann 1994). b) Verbreitung der Khorat Gruppe (graue Flächen) in SE-Asien (nach Heggemann 1994).

3.1.3 Regionale Kompressionen

Die SE-asiatische Halbinsel wurde im Zeitraum Obere Trias bis Tertiär durch die Kollision von (Mikro-) Terrains und Inselbögen, die sich an die W-Seite Shan Thais anlagerten, mehrfach durchgreifend deformiert. Bunopas & Vella (1978, 1983, 1992) verweisen auf ein entscheidendes Deformationsereignis in N- und NE-Thailand, das die Autoren anhand gefalteter triassischer Sedimente zwischen Lampang und Nam Pat auf die Indosinische Orogenese zurückführen. Chonglakmani et al. (1991) interpretieren dieses Event aufgrund der Deformationsstrukturen als transpressive Überprägung, die insbesondere die Regionen im W-Teil des Landes beeinflusst hat und sich mit abnehmender Intensität nach E hin fortsetzen konnte.

Daran anschließend kam es zu weiteren Ereignissen, die von Baum et al. (1970), Hahn et al. (1986), Mitchell (1981, 1992, 1993) und Coward et al. (1986) als tektono-metamorphe Überprägungen gewertet werden. Die Aussagen gehen dabei auf isotopengeologische Untersuchungen von Zirkonen hoch metamorpher Gneise zurück, die eine amphibolit-fazielle Metamorphose im Unteren Jura dokumentieren. Das Ereignis kann einerseits auf die Kollision Shan Thais mit einem Inselbogen (Ahrendt et al. 1993, 1994; Hansen et al. 1994; Mücke et al. 1995), andererseits auf die Kollision des Shan Thai Blocks mit dem Sukhothai Terrain zurückgeführt werden (Barr & MacDonald 1991). Die Kollision Shan Thais mit einem Inselbogen bewirkte darüber hinaus eine weitere Deformation, die sich insbesondere auf die Einheiten in N-Thailand konzentrierte (Mitchell 1981, 1992). Im Zuge der Annäherung beider Kontinentaleinheiten wurden die jurassischen Sedimente der Khorat Gruppe in N-Thailand intensiv gefaltet, während deren Äquivalente in den NE-Teilen des Landes nur untergeordnet einer Deformation unterlagen. Ahrendt et al. (1991, 1993) konnten ein lang andauerndes Spannungsregime mit progressiver Deformationsfront von W nach E für die Ereignisse in dem Zeitraum Oberer Jura bis Obere Kreide datieren. Zeitgleich mit den Deformationen in N- und NE-Thailand wurden listrische Störungen in triassischen Halbgräben invers reaktiviert. Die Deformationsmuster deuten dabei auf einen transpressiven Einfluss (Cooper et al. 1989), der bis in die Regionen des Khorat-Beckens reichte und dort eventuell zur Ausbildung des Loei Foldbelts führte (Heggemann 1994).

Das letzte große Deformationsereignis in Thailand setzte mit der Kollision Indiens und der Eurasischen Platte entlang der Indus-Tsangpo-Suturzone in der Oberen Kreide ein. Die Kollision wirkt noch heute auf die tektonischen Einheiten der Region, was sich in der Hebung großer Partien SE-Asiens und der Rotation Thailands in Bezug auf den Indochina Kraton äußert (McCabe et al. 1988). Im Zuge der Kollision wurden nach Tapponier et al. (1986), Peltzer & Tapponier (1988) und Polchan & Sattayarak (1989) NW-SE-streichende Störungssysteme angelegt, die anhand der Red-River-Fault-Zone, der Mae-Ping-Fault-Zone, der Three-Pagodas-Fault-Zone oder der Sagaing-Fault-Zone nachvollzogen werden können. Als Ausgleich zu diesen Strukturen entwickelten sich infolge N-S-gerichteter Kompression und E-W-gerichteter Extension eine Reihe N-S-streichender „pull-apart“-Becken bzw. NE-SW-gerichteter Störungen, wie beispielsweise die Northern-Thailand-Fault, Rangong-Fault und Khlong-Mauri-Fault.

3.2 Tektonische Einheiten und regionale Stratigraphie Thailands

3.2.1 Shan Thai Terrain

Die stratigraphischen Einheiten des Shan Thai Terrains sind vorrangig in den nördlichen Bergregionen und dem Westen Thailands, auf der südlichen Halbinsel und in dem Sukhothai Foldbelt aufgeschlossen. Die ältesten Gesteine in diesen Gebieten setzen sich aus präkambrischen Serien zusammen, die seit dem Mesozoikum hochgradig metamorph überprägt und vereinzelt mit unterschiedlicher Intensität aufgeschmolzen wurden (MacDonald et al. 1993, Ahrend et al. 1997). Aus der Metamorphose gingen im Wesentlichen Gneise und quarzitisches Glimmerschiefer sowie carbonatische und quarzitisches Metamorphite hervor. Während des Perms sind die westlichen Teile des Shan Thai Terrains vorübergehend durch carbonatisch-klastische Sequenzen gekennzeichnet (Bunopas 1976, Ingavat 1984), die jedoch bis in die Mittlere Trias von marinen Einheiten überlagert wurden (Sashida et al. 1994).

Durch die Kollision mit dem Indochina Block wurden in der Oberen Trias bis in den Jura weitreichende Teile des Mikrokontinents Shan Thai über den Meeresspiegel gehoben, so dass lokal die Bedingungen zur Ablagerung von Rotsedimenten gegeben waren. Weitere Sedimentationsräume wurden durch Krustenbewegungen im Oberen Oligozän geschaffen. Das Zusammentreffen der indischen und eurasischen Platte induzierte beispielsweise eine Reihe von Blockverschiebungen und -absenkungen, durch die sich fluviatil-lakustrine Sedimente ausbilden konnten (Polachan & Sattayarak 1989). In den tertiären Abfolgen befinden sich derzeit umfangreiche Lagerstätten für Kohle, Öl und Ölschiefer (Vereinte Nationen 2001).

Gesteine im E-Teil des Shan Thai Terrains umfassen im Bereich des Sukhothai Foldbelts silurisch-devonische Quarz-Schiefer und Phyllite sowie flach marine sedimentäre Einheiten des Unteren bis Mittleren Karbons (Fontaine & Saliapongse 1997). Die Sequenzen gehen graduell in meta-vulkanoklastische Gesteine über. Als relativ junge Einheiten treten jurassische und tertiäre Beckensedimente, känozoische Basalte und quartäre Ablagerungen auf.

3.2.2 Indochina-Terrain

Die stratigraphischen Einheiten des Indochina-Terrains stehen überwiegend als Bergketten am W-Rand des Khorat-Plateaus sowie in E- und NE-Thailand an. Die ältesten Gesteine des Terrains stellen regionalmetamorph geprägte Chlorit-Schiefer, Phyllite, Quarzite und Meta-Tuffe dar, die als basale silurisch-devonische Einheit den Lithologien des Sukhothai Foldbelts gleichen. Neben den mittel-palaeozoischen, metamorph überprägten Abfolgen treten auch Sedimentgesteine auf, die im Mittleren Silur bis Perm zur Ablagerung kamen. Die Gesteine gehen im W' Abschnitt des Indochina Terrains auf unterschiedliche Bildungsbedingungen zurück, so dass an dieser Position für den Zeitabschnitt Mittleres bis Oberes Palaeozoikum

drei unterschiedliche Sedimentationsräume angenommen werden müssen: (i) Plattformablagerungen des Mittleren Silurs bis Perms, bestehend aus u. a. Argilliten, Tuffen und Riffkalkstein (Chairangsee et al. 1989, Fontaine 1990, Chonglakmani & Fontaine 1992), (ii) Fore-arc Becken des Mittleren Devons und Unteren Karbons mit Grauwacken, Chert und Kalkstein (siehe Vereinte Nationen 2001) sowie (iii) Beckenablagerungen des Perms mit pelagischer Fazies, Flysch- und Molasse-Fazies (Helmcke 1985).

Die palaeozoischen Einheiten des Indochina-Blocks gehen nach E in jüngere, mesozoische Ablagerungen über, die hier durch triassische Sandsteine und Schiefer bzw. durch jurassisch-kretazische, klastische Sedimente der Khorat Gruppe charakterisiert sind. Die klastischen Einheiten setzen sich in E' Richtungen bis an die Landesgrenze zum benachbarten Laos fort. Wie in den Sequenzen des Shan Thai Terrains finden sich lokal auflagernd tertiäre Beckensedimente, känozoische Basalte und quartäre Deckschichten.

3.3 Magmatismus in Thailand

3.3.1 Plutonischer Magmatismus

Plutonischer Magmatismus wird in Thailand durch einen Teil der SE-asiatischen Batholithintrusionen repräsentiert, die sich N-S-streichend von den südlichen Provinzen Chinas bis nach Indonesien erstrecken und dabei W-Laos, NW-Thailand, E-Myanmar und die gesamte malaysische Halbinsel abdecken. Nach Nakapadungrat & Putthapiban (1992) erfolgte die Intrusion der Batholithe in den vier zeitlich differenzierten Perioden Untere und Obere Trias sowie Untere und Obere Kreide. Basierend auf Geländestudien, Petrographie und Geochemie können die Vorkommen der Plutonite in drei Gürtel, den so genannten Eastern, Central und Western Granite Belt, gegliedert werden (Mitchell 1977) (Abb. 3.4). Dieselben Vorkommen werden von Darbyshire (1988) und Cobbing & Pitfield (1986) unter der Bezeichnung Eastern, Main Range und Western Province geführt, wobei die Autoren aufgrund der sehr komplexen geologischen Situation in N-Thailand noch eine zusätzliche North Thai Province fordern.

Granitoide des Eastern Granite Belts liegen westlich des Khorat-Plateaus und teilen sich in zwei Sub-Gürtel entlang der Linien Loei-Phetchabun-Nakhon Nayok und Chiang Rai-Tak-Uthai Thani-Chantaburi auf. Beide Gürtel befinden sich E' bzw. W' der Nan-Uttaradit-Suturzone. Kennzeichnend für die Vorkommen sind relativ kleine Plutone, die mit Graniten, Granodioriten und Tonaliten, untergeordnet auch Quarz-Monzoniten, Quarz-Monzodioriten, Quarz-Dioriten und Gabbros, eine Vielzahl an Kompositionen aufweisen. Während die mafischen Varietäten vornehmlich mittel- bis grobkörnig und equigranular ausgebildet sind, zeigen felsische Gesteine ein grobkörniges, porphyrisches Gefüge mit weißen, pinken oder violetten Feldspäten (Nakapadungrat & Putthapiban 1992). Gesteine des Eastern Granite Belts sind vielfach in palaeozoische und triassische Metamorphite eingedrungen und eng mit vulkanischen Derivaten assoziiert (Piyasin 1974, Bunopas 1974). Die lithologischen Strukturen deuten auf ein triassisches Intrusionsalter, das von Rb/Sr-WR Alterdatierungen

gestützt wird (Teggin 1975). Die Granitoide der beiden Sub-Gürtel zeigen einen I-Type Charakter nach Chappell & White (1974), der sich von ostwärts gerichteter Subduktion unter den Indochina Block (Mitchell 1992) bzw. von westwärts gerichteter Subduktion unter den Shan Thai Block ableitet (Nakapadungrat & Putthapiban 1992). Barr & MacDonald (1991) verweisen auf ein hohes Intrusionsniveau der Plutone.

Granite des Central Granite Belts ziehen sich von Chiang Rai über Lampang und S-Thailand bis nach Malaysia. Im Gegensatz zu den Intrusionskörpern des Eastern Granite Belts sind diese Granitoide durch einen S-Typ Charakter definiert (z.B. Beckinsale 1979). Die teilweise sehr komplexen Zusammensetzungen und differenzierten makroskopischen Dekors der Gesteine erlauben die Einteilung in verschiedene Gesteinstypen. Migmatische Granite zeigen ein grobkörniges, porphyrisch bis equigranulares Gefüge und sind darüber hinaus stark deformiert (Nakapadungrat & Putthapiban 1992). Primäre Texturen sind nur selten zu erkennen (Cobbing et al. 1986). Die Einheiten sind triassischen Alters (Cobbing et al. 1986) und treten in den Regionen Chiang Mai (Baum et al. 1970), Hua Hin (Dheeradolok 1973, Putthapiban & Suensilpong 1978, Pongsapich et al. 1980, Tulyatid 1991) und Yala (Ishihara et al. 1980) auf. Andere Granitoide des Central Granite Belts sind als foliierte, equigranulare bis großporphyrische Granite bzw. undeformierte Granite zusammengefasst. Die Gesteine sind gewöhnlich in Form großer, gestreckter Batholithe aufgeschlossen, wie beispielsweise W' von Chiang Mai (Cobbing et al. 1986) oder auf der Insel Khao Luang (Ishihara et al. 1980), die durch ein triassisches Intrusionsalter sowie kretazische Deformationsalter gekennzeichnet sind (Nakapadungrat & Putthapiban 1992). Als dominierende Gesteine des Central Granite Belts treten mittel- bis grobkörnige, porphyrische Biotit-Granite auf, die sehr homogene Texturen und Mineralogien zeigen (Baum et al. 1970). Plutone diesen Typs beinhalten z.B. den Samoeng Granit in N-Thailand oder den Rayong-Bang Lamung Granit in SE-Thailand (Punyaprasiddhi 1980, Teggin 1975). Im Gegensatz zu anderen Einheiten des Central Granite Belts sind diese Gesteine kretazischen Alters und gewöhnlich als Decken, Dikes, kleinere Stöcke oder zonierte Plutone in die Erdkruste eingedrungen.

Granite des Western Granite Belts erstrecken sich in Form großer Batholithe und auch kleinerer Plutone von Mae Lama in N-Thailand bis nach Ranong in S-Thailand. Die Granite sind sowohl durch S-Typ- als auch durch I-Typ-Affinitäten gekennzeichnet und gehen auf kretazische Subduktionen am W-Rand Shan Thais oder auf eine Beckenschließung infolge einer Kontinent-Kollision zurück (Mitchell 1977, Beckinsale 1979). Dominant sind in dieser Suite Muskovit-Biotit-, Turmalin-Muskovit- und Biotit-Granite mit porphyrischem, mittel- bis grobkörnigem Gefüge ausgebildet.

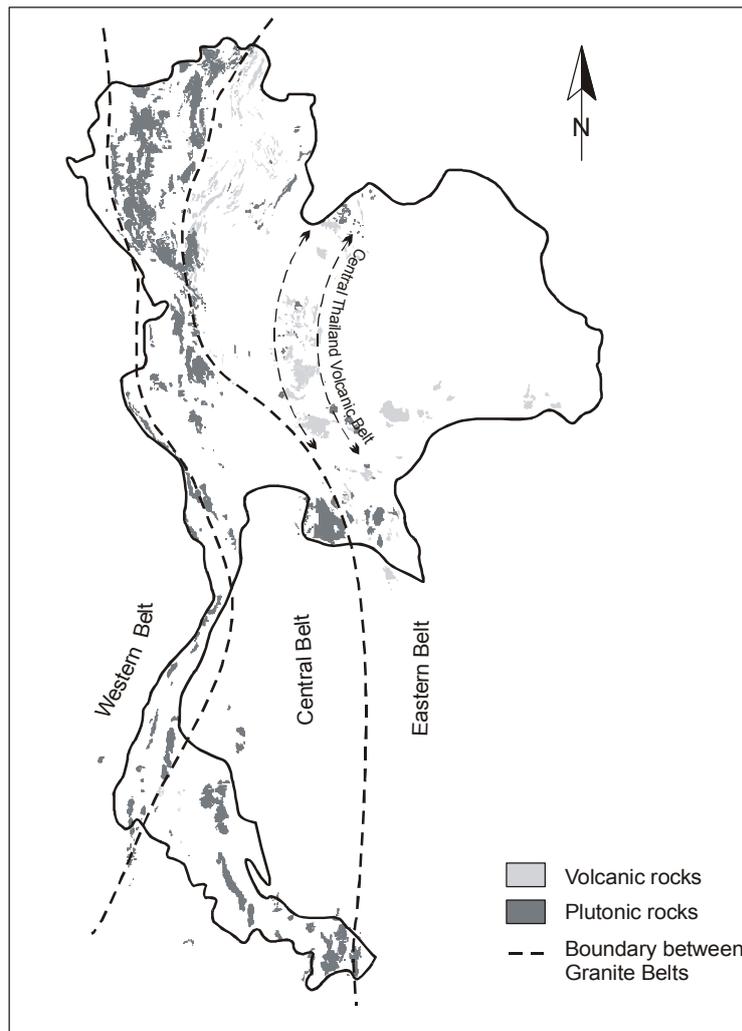


Abb. 3.4: Vorkommen magmatischer Gesteine in Thailand, bestehend aus Plutoniten der N-S-streichenden Eastern-, Central- und Western Granite Belts sowie aus Vulkaniten des Central Thailand Volcanic Belts und Vulkaniten in den Regionen Chiang Mai und Chiang Rai (N-Thailand) (nach Cobbing & Pitfield 1986).

3.3.2 Vulkanische Aktivitäten im Zusammenhang mit tektonischen Ereignissen

An die tektonische Evolution des Großraums SE-Asien sind vulkanische Aktivitäten gebunden, die sich in Thailand in Form eines N-S-streichenden, magmatischen Bogens ausdrücken. Die zahlreichen Effusivgesteine innerhalb dieses so genannten Central Thailand Volcanic Belts (CTVB) (Abb. 3.4) bzw. Loei-Phetchabun-Chantaburi Belts entwickelten sich im Zusammenhang mit Subduktionsereignissen und Kontinent-Kontinent-Kollisionen in der Zeit (i) vom oberen Devon bis unteren Karbon, (ii) der mittleren Trias und (iii) des Tertiärs (Intasopa 1993). Kennzeichnend für den Vulkanismus in Thailand ist, dass relativ SiO_2 -reiche Gesteine wie etwa Rhyolithe wesentlich häufiger auftreten als basische Kompositionen.

Isotopengeologische Untersuchungen datieren für die Ereignisse an der Grenze Devon-Karbon zwei magmatische Events, die ca. 374 Ma bzw. 361 Ma zurückliegen. Das ältere Event geht dabei auf Subduktionsprozesse zurück, die sich vor der Verschmelzung des Indochina Blocks mit dem S-China Block ereigneten und zur Bildung rhyolitischer Vulkanite

E' von Loei führten. Das jüngere Ereignis ist anhand von Basalten dokumentiert, die infolge eines Seafloor-spreading zwischen den Mikrokontinenten Shan Thai und Indochina aufdringen konnten und rezent in der zentralen Region Loei aufgeschlossen sind (Intasopa 1993). Die Ozeanöffnung sowie weitere Subduktionen an der Grenze Devon-Karbon begünstigten dabei eventuell das Aufdringen und die Ausbildung von zwei weiteren vulkanischen Gürteln in den Regionen Chiang Rai und Chiang Mai (Intasopa 1993, Intasopa & Dunn 1994) (Abb. 3.4).

Vulkanische Gesteine der Trias stehen in der Region Phetchabun S' von Loei an und setzen sich dort aus Andesiten und basaltischen Andesiten zusammen. Die Vulkanite entwickelten sich infolge spät-palaeozoischer Subduktion unter den W-Rand Indochinas. Das Alter dieser Gesteine wird von einigen Autoren wie beispielsweise Bunopas (1981) oder Hutchison (1989) als Indiz für eine Kollision der Kontinente in der Oberen Trias gewertet.

Tertiärer Vulkanismus ist vielfach in den zentralen Provinzen Thailands in Form von dominant auftretenden tholeiitischen Basalten, Alkali-Basalten, Andesiten, Daciten und Rhyolithen dokumentiert. Vulkanite in der Region Lop Buri zeigen dabei sehr unterschiedliche Alter (57 - 9 Ma), wobei größere Abstände zwischen einzelnen Altersangaben darauf schließen lassen, dass das Aufdringen und Ausfließen von Magmen überwiegend episodisch erfolgte.

3.4 Regionalisierung der Lagerstättenprovinzen für Naturwerksteine

3.4.1 Übersicht

Das gesamte Lagerstättenpotential für Naturwerksteine in Thailand ergibt sich aus dem geologischen Aufbau des Landes, der im W durch magmatische Intrusionen sowie die mobile Zone bestimmt wird und sich im NE und E durch die klastischen Einheiten des Khorat Plateaus auszeichnet. Aus diesem geologischen Grundgerüst lassen sich mehrere Provinzen ableiten, die für den Natursteinabbau ein bemerkenswertes Potential aufweisen und interessante Steine hinsichtlich der Farben und Strukturen offerieren. Die geographische Position dieser Lagerstättenprovinzen ist in Abbildung 3.5 graphisch illustriert.

An die magmatischen Intrusionen sind gebunden:

- a) Triassische Batholithe in NW- und N-Thailand mit verschiedenen farbigen und verschieden strukturierten Granitoiden, insbesondere in der Region Tak,
- b) Feinkörnige, triassische Granitoide mit orangen und violetten Farben in Verbindung mit Vulkaniten des CTVB,
- c) Porphyrische und gneisische Granitoide des Mesozoikums bzw. Präkambriums im Großraum Bangkok,
- d) Tiefschwarze, riesenkörnige Hornblendite mit farblich abgegrenzten Zwickelfüllungen aus hellem Feldspat in den vorgelagerten Bereichen des Khorat-Plateaus.

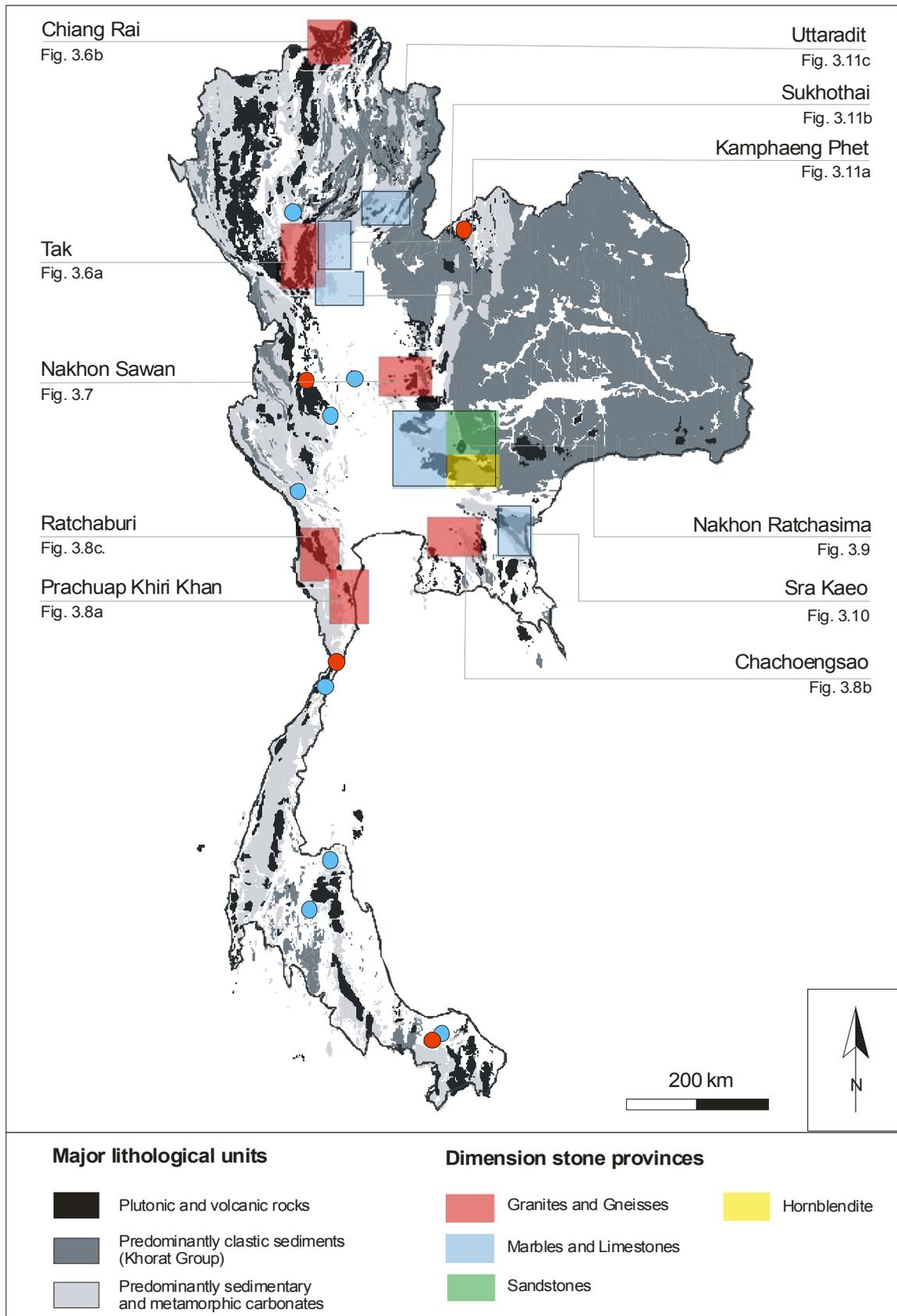


Abb. 3.5: Regionalisierung der Lagerstättenprovinzen für Naturwerksteine in Thailand. Farbige Kästen geben in diesem Zusammenhang die Lage der Arbeitsgebiete an, in denen lagerstättengeologische Aufnahmen für die vorliegende Arbeit erfolgten. Siehe dazu auch die jeweiligen Kartenausschnitte im folgenden Teil des Kapitels. Als Punkte sind weitere Vorkommen (rot = Granite, blau = Carbonatgesteine) nach Kenntnis der Vereinten Nationen (2001) eingetragen. Weitere Erläuterungen zur Regionalisierung im Text dieses Kapitels.

An die mobile Zone sind gebunden:

- e) Permische Carbonatgesteine mit grauen sowie weiß-rötlichen Farben in Abhängigkeit tektonischer Überprägungen in den vorgelagerten Bereichen des Khorat-Plateaus,
- f) Permische Kalksteine mit überwiegend roten Farben im SE-thailändischen Grenzbereich zu Kambodscha,
- g) Carbonatgesteine des Mittleren bis Oberen Palaeozoikums mit unterschiedlichem Metamorphosegrad und vorwiegend grauen und/ oder pinken sowie weißen Grundtönen in NW-Thailand.

An das Khorat-Plateau sind gebunden:

- h) Farblich differenzierte Sandsteine des Mesozoikums am W-Rand des Khorat-Plateaus.

3.4.2 Triassische Batholith-Intrusionen in NW- und N-Thailand

Die höchste Dichte an derzeit aktiven Lagerstätten findet sich in der Provinz **Tak**, etwa 500 km NNW der Hauptstadt Bangkok. Die Vorkommen sind innerhalb des Tak Batholithen aufgeschlossen (Abb. 3.6a), der eine triassische Intrusion des Eastern Granite Belts repräsentiert. Obwohl die Intrusionen dieses Gürtels mehrheitlich in Form kleinerer Plutone auftreten, verkörpert der Tak Batholith mächtige, mehrphasige Magmenschübe (in chronologischer Reihenfolge Eastern Pluton, Western Pluton, Mae Salit Pluton und Tak Pluton), die sich über eine Fläche von ca. 3000 km² zwischen den Distrikt-Hauptstädten Tak und Thoen erstrecken. Tak Granitoide wurden intensiv von Pongsapich & Mahawat (1977), Mahawat (1982), Mahawat et al. (1990) und Atherton et al. (1992) hinsichtlich mineralogischer und genetischer Kriterien bearbeitet. Ähnlich wie die übrigen Gesteine des Eastern Granite Belts besitzen die Tak Granitoide ein weites Spektrum in Bezug auf ihre Zusammensetzung. Granite, Granodiorite und Quarz-Diorite bis Tonalite treten dabei vorzugsweise im Eastern Pluton auf, während Quarz-Monzonite, Monzogranite und Syenogranite in den übrigen drei Plutonen anstehen (Nakapadungrat & Putthapiban 1992). Die als Naturwerkstein abgebauten Varietäten umfassen dabei schwarze Quarz-Diorite sowie weiße, grau-blaue, grau-violette und orange Granitoide mit fein-, mittel- und grobkörnigem Gefüge.

Weit im N des Tak Batholithen an der Grenze zu Myanmar treten in der Provinz **Chiang Rai** foliierte, teilweise großporphyrische Granite auf, deren Abbau sich jedoch lediglich auf zwei kleinere Probeaufschlüsse beschränkt. Die Aufschlüsse befinden sich im E' Teil des Chiang Rai Batholithen (Abb. 3.6b), der das nördlichste Segment des Central Granite Belts repräsentiert und mit einer Fläche von 175 x 150 km auch noch jenseits der Staatsgrenzen zu Myanmar und Laos aufgeschlossen ist (Cobbing & Pitfield 1986). In den zentralen Bereichen wird die Intrusion durch die E-W- bis ENE-WSW-streichende Mae Chan Fault geteilt, die nur wenige hundert Meter S' des potentiellen Abbaugbietes verläuft.

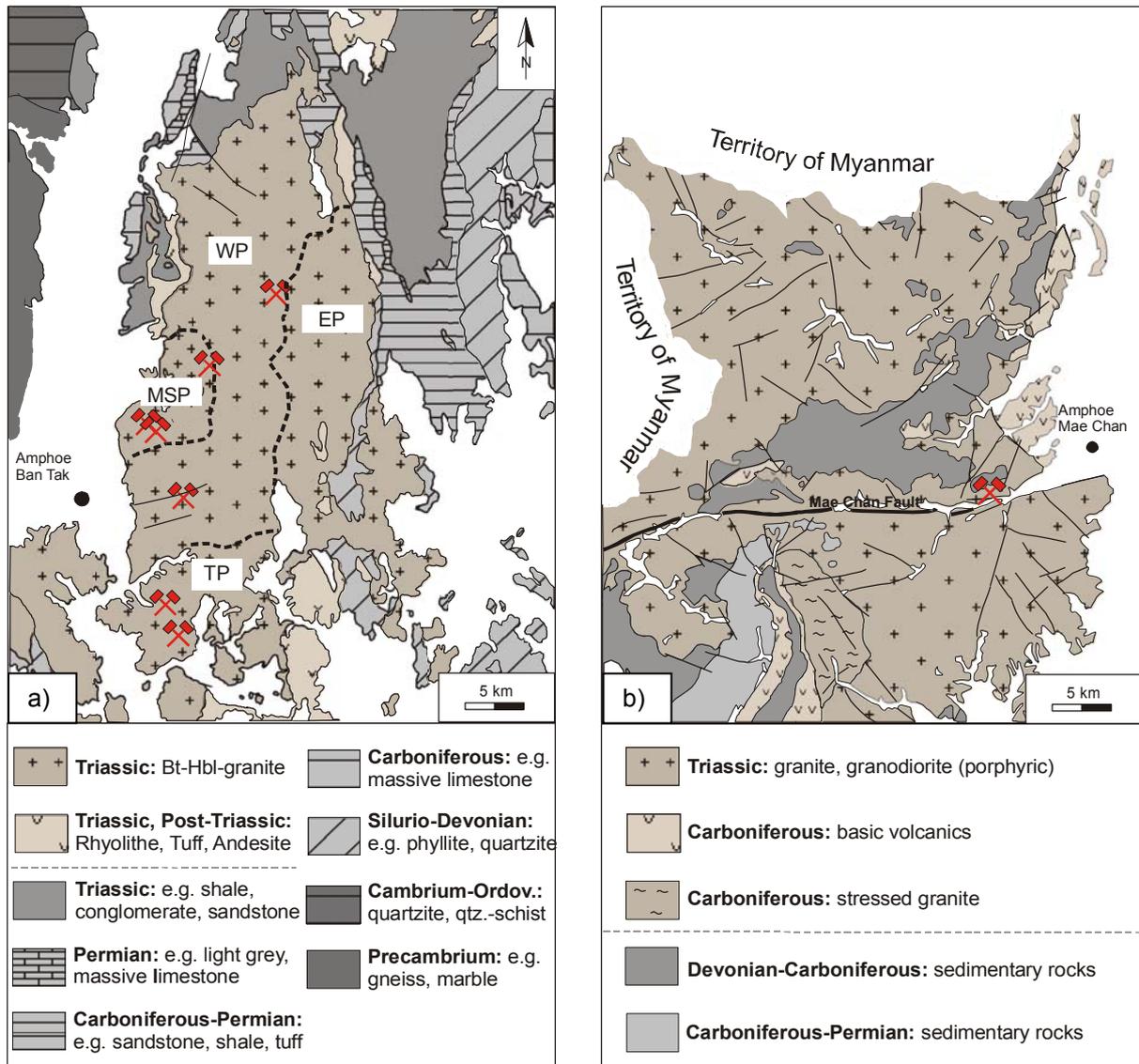


Abb. 3.6: Position der Lagerstätten und Arbeitsgebiete in N- und NW-Thailand. a) Tak Batholith in der Provinz Tak. Die Vorkommen befinden sich hier in verschiedenen Plutonen des Batholithen. WP: Western Pluton, EP: Eastern Pluton, MSP: Mae Salit Pluton, TP: Tak Pluton. Unterbrochene Linien repräsentieren die Grenzen der Plutone nach Atherton et al. (1992). Kartengrundlage: Geological Map of Thailand NE 47-11 (Geological Survey Division 1974). b) Chiang Rai Batholith in der Provinz Chiang Rai. Das Vorkommen liegt im E des Batholithen in der näheren Umgebung einer regionalen Störung. Kartengrundlage: Geological Map of Thailand, Sheet (Chiang Rai) 2 (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe 1976).

3.4.3 Triassische Granite in Verbindung mit Vulkaniten des CTVB

Triassische Granite in Verbindung mit Vulkaniten treten in der Provinz **Nakhon Sawan**, ca. 240 km NNE' von Bangkok auf. Die Lagerstätten sind an ein Vorkommen E' der Distrikthauptstadt Amphoe Nong Bua gebunden (Abb. 3.7), das in der geologischen Karte (Kartenblatt ND 47-4, Geological Survey Division 1977) als Rhyolith des Central Thailand Volcanic Belts ausgewiesen ist. Obwohl triassische Rhyolithe und Basalte als dominierende magmatische Lithologien in der Umgebung E' von Nakhon Sawan erscheinen, zeigen die

Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit, dass es sich bei den Abbauvorkommen um plutonische Gesteine handelt. Diese Plutonite gleichen dabei makroskopisch einem größeren Granitvorkommen, das in geringer Distanz S' der Produktionsstätten in direktem Kontakt mit den vulkanischen Einheiten auftritt (Abb. 3.7). Eine Reihe von Autoren (z.B. Jacobsen et al. 1969, Jungyusuk & Khositantont 1992) verweist auf Fe-Erze des CTVB in Form von Hematit und Magnetit, die sich u. a. im Kontaktbereich zwischen Vulkaniten und Plutoniten gebildet haben. Diese Mineralisationen stehen eventuell im Zusammenhang mit dem farblichen Dekor der Granite.

Weitere Granite in Verbindung mit Vulkaniten sind aus der Provinz **Loei** an der Grenze zu Laos bekannt.

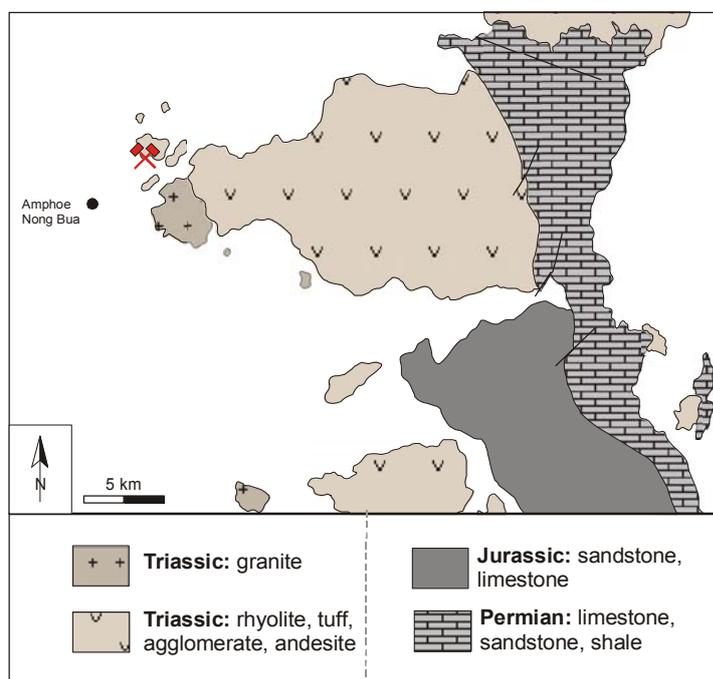


Abb. 3.7: Position der Lagerstätten und Arbeitsgebiete in der Provinz Nakhon Sawan. Kartengrundlage: Geological Map of Thailand ND 47-4 (Geological Survey Division 1977).

3.4.4 Granitoide im „Großraum Bangkok“

Der wohl umfangreichste Abbau granitoider Naturwerksteine im „Großraum Bangkok“ konzentriert sich auf foliierte gneissische Granite des Central Granite Belts, die einen wesentlichen Bestandteil des Hua Hin-Pran Buri Metamorphic Complex in der Provinz **Prachuap Khiri Khan** ausmachen (Abb. 3.8a). Der Komplex befindet sich ca. 150 km SW' von Bangkok und wird von Pongsapich et al. (1980) in drei Einheiten (Hub Kapong-, Hua Hin- und Pran Buri- Gneissic Granites) unterteilt, die sich in Form eines relativ schmalen Streifens N-S-streichend über eine Länge von ca. 60 km erstrecken. Der derzeitige Abbau von Naturwerksteinen erfolgt dabei in der Präkambrischen Pran Buri- Gneissic Granite Suite, die

nach Tulyatid (1992) die am stärksten deformierte Einheit innerhalb des Metamorphic Complex darstellt. Neben den hier gewonnenen mittelkörnigen und equigranularen Granat-Gneisen beinhaltet der Komplex noch grobkörnige, porphyrische Biotit-Gneise sowie nicht-foliierte Gesteine. Etwa 40 km S' der Provinzhauptstadt Prachuap Khiri Khan, und damit schon außerhalb des Großraum Bangkoks, werden weitere texturierte Granitoide abgebaut. Darunter befinden sich zwei grobkörnige Granite mit pinken bzw. grauen Feldspat-Porphyrklasten.

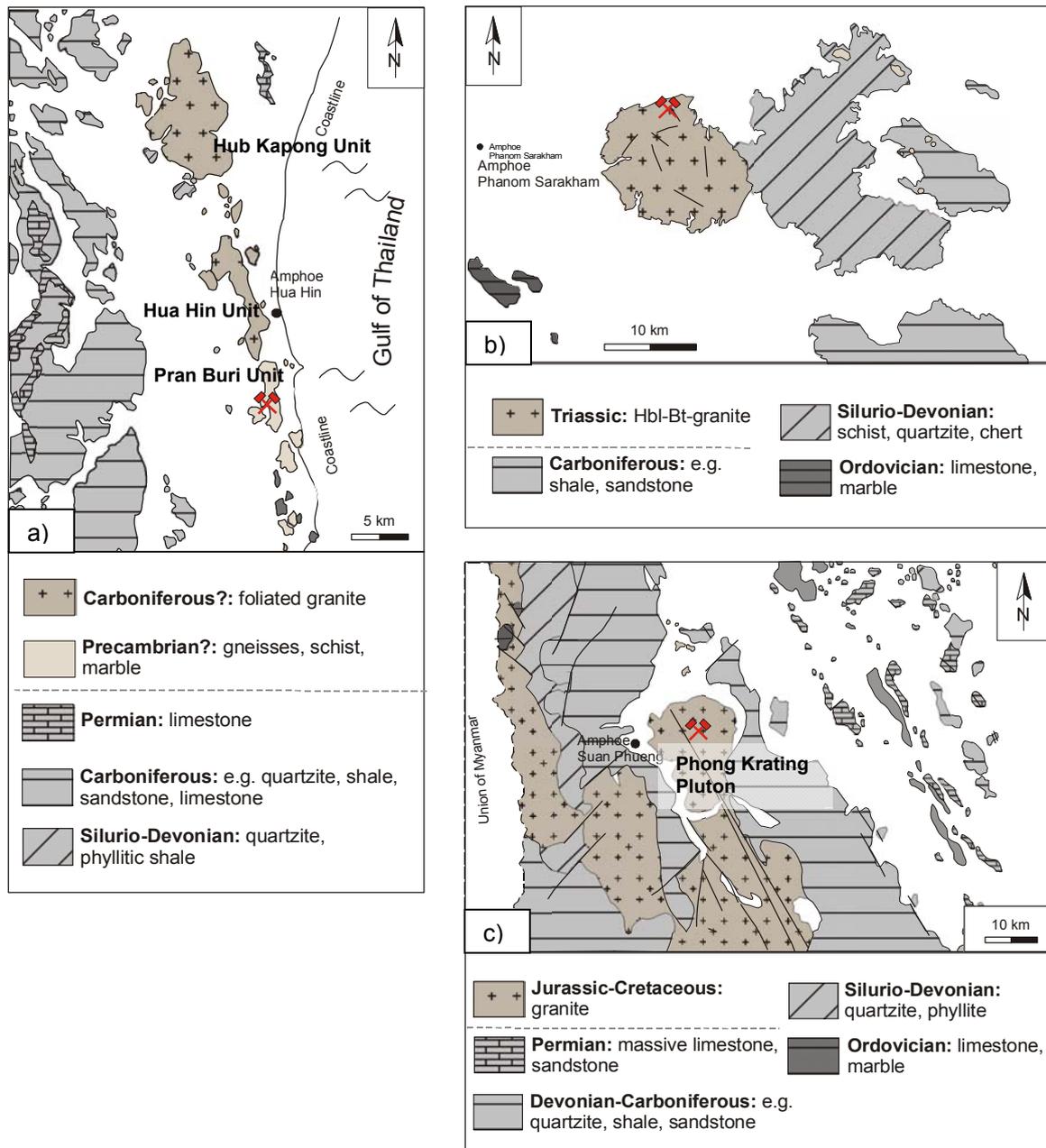


Abb. 3.8: Position der Lagerstätten und Arbeitsgebiete im „Großraum Bangkok“. a) Hua Hin- Pran Buri Metamorphic Complex der Provinz Prachuap Khiri Khan. Die Lagerstätte befindet sich innerhalb der Pran Buri Gneissic Granite Suite. Kartengrundlage: Geological Map of Thailand ND 47-15 (Geological Survey Division 1985). b) Pluton und Lagerstätte in der Provinz Chachoengsao. Kartengrundlage: Geological Map of Thailand ND 47-12 (Geological Survey Division 1984). c) Phong Krating Pluton in der Provinz Ratchaburi. Kartengrundlage: Geological Map of Thailand ND 47-11 (Geological Survey Division 1985).

Weniger stark, aber dennoch deutlich foliierte Granitoide werden in der Provinz **Chachoengsao** ca. 80 km E' von Bangkok gewonnen. Der Abbau der Gesteine erfolgt am N-Rand eines relativ kleinen Plutons des Eastern Granite Belts in etwa 1-2 km Entfernung zum Rahmengestein (Abb. 3.8b). Der S-Rand des Plutons liegt direkt am Kontakt zu der WNW-ESE-streichenden Chao Phraya Fault (Sittithaworn & Wasuwanich 1992), wobei nicht bekannt ist, in welcher Form sich die Störung auf die Qualität der Gesteine oder auf das Dekor auswirkt. Fest steht, dass die Texturierung von Gesteinen in der Region Unterschiede aufweist, da beispielsweise in etwa 50 km Entfernung SW' des Abbauvorkommens kleinere Plutone mit equigranularen, stark foliierten Gesteinen den Kontakt zwischen Eastern und Central Granite Belt definieren (Cobbing & Pitfield 1986, Darbyshire 1988).

Granitoide Naturwerksteine mit schwacher Texturierung und vereinzelt Feldspat-Porphyrklasten werden 100 km W' von Bangkok im Phong Krating Pluton der Provinz **Ratchaburi** abgebaut (Abb. 3.8c). Die Gesteine gehören vermutlich zur Pong Yo Unit, die den N' Teil des 40 x 15 km großen Plutons bildet und neben dem Abbauprodukt noch equigranulare Biotit-Granite mit pinken Feldspäten aufweist (Cobbing & Pitfield 1986). Der S' Teil des Plutons wird von stärker texturierten Biotit-Graniten dominiert.

3.4.5 Hornblendite in den vorgelagerten Bereichen des Khorat-Plateaus

Die Vorkommen tiefschwarzer Hornblendite in Thailand konzentrieren sich auf eine sehr begrenzte Region am W-Rand des Khorat Plateaus in der Provinz **Nakhon Ratchasima**. Die Gesteine gehen auf einen magmatischen Ursprung zurück und lassen sich stratigraphisch der obertriassischen Hin Tang Hornblendit-Einheit zuordnen (Abb. 3.9). Die Gesteine sind über eine Distanz von ca. 6 km sporadisch innerhalb eines NW-SE-streichenden Intrusiv-Komplexes, den so genannten Soi Woi Intrusives, aufgeschlossen, der sich aus undifferenzierten Gesteinen, vornehmlich Granodioriten, Hornblende-Graniten und Quarz-Dioriten zusammensetzt und von klastischen bzw. carbonatischen Sedimenten umgeben ist.

Hornblendite mit magmatischer Genese stellen eine sehr außergewöhnliche Gesteinsart dar, die bislang aufgrund ihrer Seltenheit nur wenig als Naturwerkstein erkundet (siehe Barnes et al. 1942) bzw. abgebaut werden konnte. Die Seltenheit der Lithologie zusammen mit der Tatsache, dass keines der bekannten Vorkommen den Anforderungen einer Naturwerkstein-Lagerstätte genügt (ausgenommenen einem grünlichen Hornblendit mit metamorpher Überprägung in Brasilien - pers. Mitteilung J. Stein), macht das Abbaugelände in Thailand zu einem weltweit einzigartigen Naturwerksteinvorkommen.

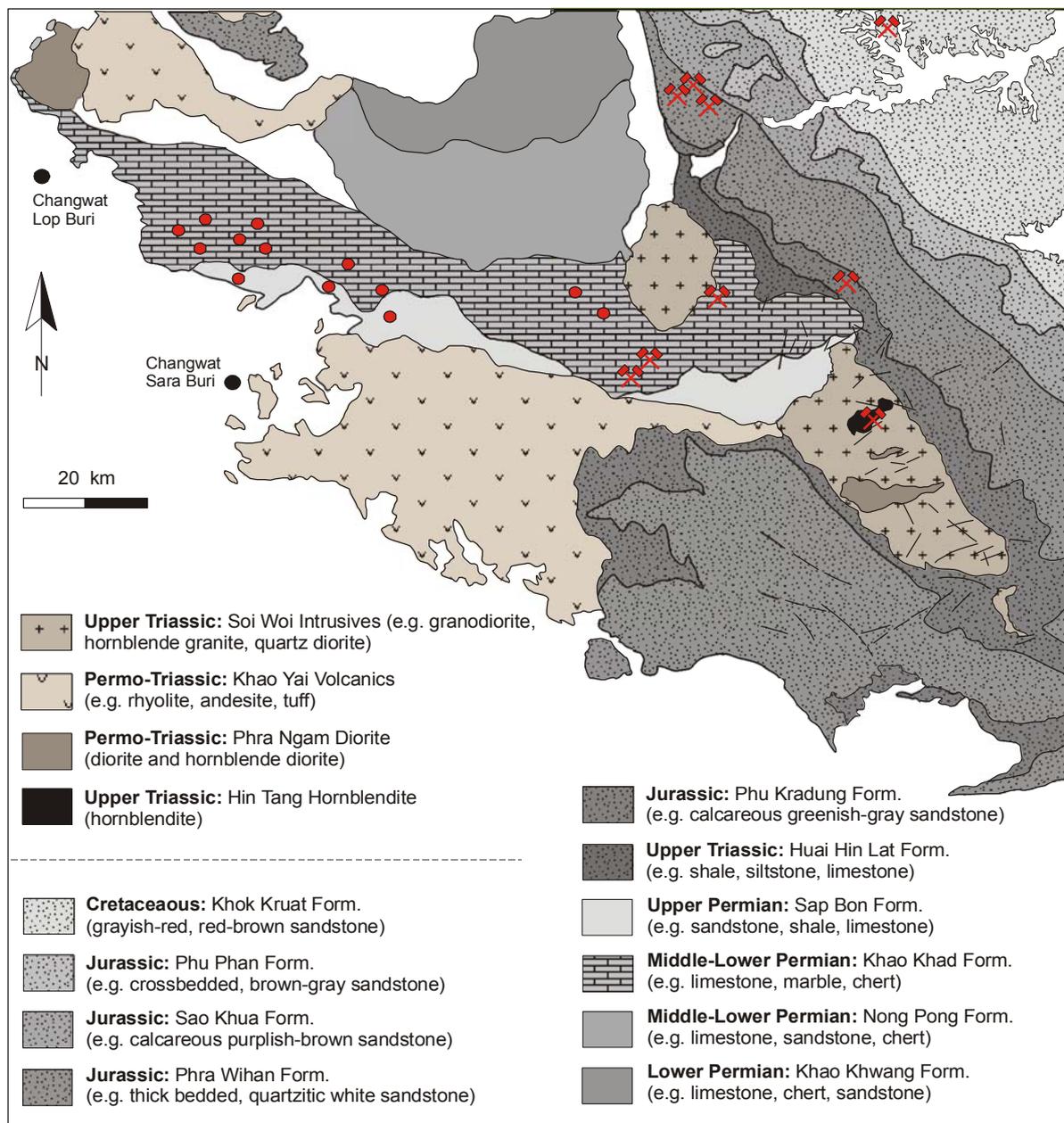


Abb. 3.9: Position der Lagerstätten und Arbeitsgebiete in den Provinzen Nakhon Ratchasima, Sara Buri und Lop Buri. In dieser Abbildung kennzeichnen lediglich die roten, gekreuzten Hämmer die Lage der Arbeitsgebiete. Als Punkte sind Abbauvorkommen von Carbonatgesteinen aus der Kartengrundlage Geological Map of Thailand ND 47-8 (Geological Survey Division 1985) übernommen. Weitere Erläuterungen im Text dieses Kapitels.

3.4.6 Permische Carbonatgesteine in den vorgelagerten Bereichen des Khorat-Plateaus

Die Carbonatgesteine in den vorgelagerten Bereichen des Khorat Plateaus sind an die permische Ratburi Gruppe gebunden, die sich zwischen den bereits erwähnten Soi Woi Intrusives befindet bzw. W' daran anschließt. Die Gruppe ist u. a. in der Provinz **Nakhon Ratchasima** aufgeschlossen und stellt dort innerhalb der unter bis mittel permischen Khao Khad Formation eine wesentliche Anzahl der thailändischen Lagerstätten für Kalksteine und Marmore. Die Formation ist als etwa 70 km langer, WNW-ESE-streichender Streifen

ausgebildet, der im S durch die ober-permische Sap Bon Formation bzw. die permotriassische Khao Yai Volcanic Suite begrenzt ist und im N an die unterlagernde Nong Pong Formation grenzt. Neben massiven dunkel grauen Kalksteinen werden in der Khao Khad Formation verschiedene helle Marmorvarietäten gewonnen, die infolge einer spröden Deformation unterschiedlich stark brekziiert sind und dadurch ein sehr ansprechendes, aber auch wechselhaftes Dekor aufweisen.

Weitere Vorkommen von Naturwerksteinen befinden sich in den Provinzen **Sara Buri** und **Lop Buri**, in denen schwarze Kalksteine bzw. auch Travertin gefördert werden. Eine Übersicht zur Lage der Lagerstätten für Carbonatgesteine in der Khao Khad Formation befindet sich in Abbildung 3.9.

3.4.7 Sandsteine des Mesozoikums am W-Rand des Khorat-Plateaus

Sandsteine sind sowohl in N-Thailand als auch in NE-Thailand verbreitet. Die derzeit bekannten Sandsteinvorkommen, die als Naturwerksteine abgebaut werden, konzentrieren sich jedoch lediglich auf den W-Rand des Khorat Plateaus (NE-Thailand) in der Provinz **Nakhon Ratchasima**.

Alle Sandsteinvorkommen lassen sich stratigraphisch der mesozoischen Khorat Gruppe zuordnen, von der sich drei Formationen im Abbau befinden. Diese sind: (i) die Phu Kradung Formation (Mittlerer Jura, grüne Sandsteine), (ii) die Phra Wihan Formation (Mittlerer bis Oberer Jura; weiße, gelbe, braune Sandsteine) und (iii) die Khok Kruat Formation (Abt-Alb, rote Sandsteine) (Abb. 3.9). Die optisch sehr ansprechenden Gesteine sind von ausgesprochen guter Farbintensität und wurden als Naturwerkstein bereits zu Zeiten der Khmer Periode für die Errichtung von Tempelanlagen genutzt (Dheeradilok 1993).

3.4.8 Permische Kalksteine in SE-Thailand

Die permischen Einheiten SE Thailands sind durch zahlreiche, schroffe Kalksteinfelsen gekennzeichnet, die in der Provinz **Sra Kaeo** an der Grenze zu Kambodscha für den Werksteinabbau genutzt werden (Abb. 3.10). Geographisch befindet sich das Abbaugelände sehr dicht an der vermuteten Nahtlinie zwischen den Kontinentalblöcken Shan Thai und Indochina. Die Produktion konzentriert sich in erster Linie auf einen sehr fossilreichen, roten Kalkstein, untergeordnet auch auf graue Kalksteine. Die grauen Gesteine zeigen dabei nahezu gleiche Strukturen wie die roten Kalksteine, so dass sich beide Varietäten lediglich anhand der Farbe unterscheiden. Das Material sedimentierte sehr viel weiter E' innerhalb einer flachmarinen Fazies und wurde tektonisch an die heutige Position transportiert (Bunopas et al. 1983).

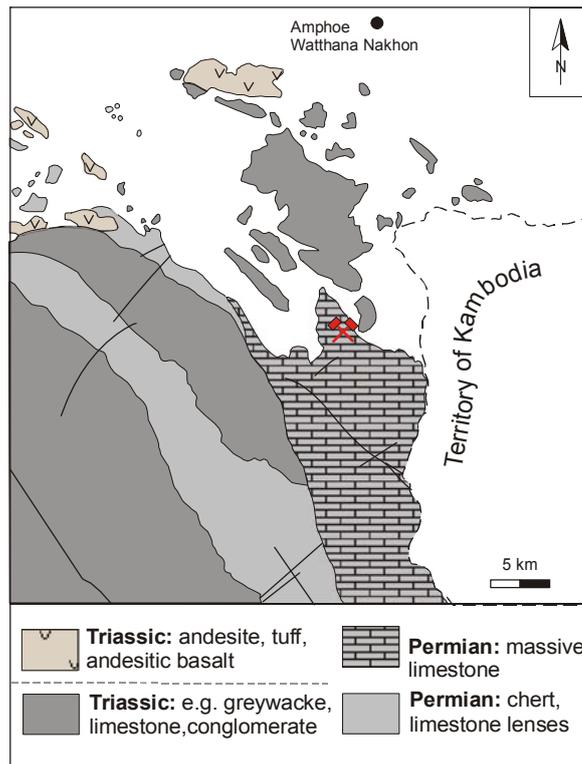


Abb. 3.10: Position der Lagerstätte und Arbeitsgebiete in der Provinz Sra Kaeo. Kartengrundlage: Geological Map of Thailand ND 48-9 (Geological Survey Division 1985).

3.4.9 Carbonatgesteine des Mittleren bis Oberen Palaeozoikums in NW-Thailand

Carbonatgesteine für den Werksteinabbau sind in NW Thailand an das Mittlere bis Obere Palaeozoikum in den Provinzen **Sukhothai**, **Kamphaeng Phet** bzw. **Uttaradit** gebunden (Abb. 3.11). Die als Naturwerkstein in Khamphaeng Phet und Sukhothai genutzten Vorkommen beinhalten überwiegend feinkörnige, lagig aufgebaute, graue und/ oder pinke Marmore, die lokal kataklastisch überprägt sein können. Neben diesen Varietäten wurden in der Provinz Khamphaeng Phet grünliche Silikat-Marmore, untergeordnet auch bläuliche Marmore, gewonnen, deren Vorkommen mittlerweile erschöpft sind.

Der Abbau in der Provinz Kamphaeng Phet konzentriert sich auf Sequenzen der silurisch-devonischen Phran Kratai Gruppe (Abb. 3.11a), die sich in die Khao Khieo, Khao Sawang Marble und Khanu Chert Formation aufgliedern lässt. Eine eindeutige stratigraphische Zuordnung der Abbauvorkommen zu einer der Formationen ist nur schwer möglich, da sich die Lagerstätten im Grenzbereich zwischen der Khao Khieo und der Khao Sawang Marble Formation befinden, die beide Marmor aufweisen können (vgl. geologische Karte NE 47-15, Geological Survey Division 1974). Dennoch könnte aufgrund von Phylliten, die die Lagerstätte der grünen Silikat-Marmore begrenzen und die u. a. kennzeichnend für die Khao Khieo Formation sind, eine Einordnung der Vorkommen in diese Formation erfolgen.

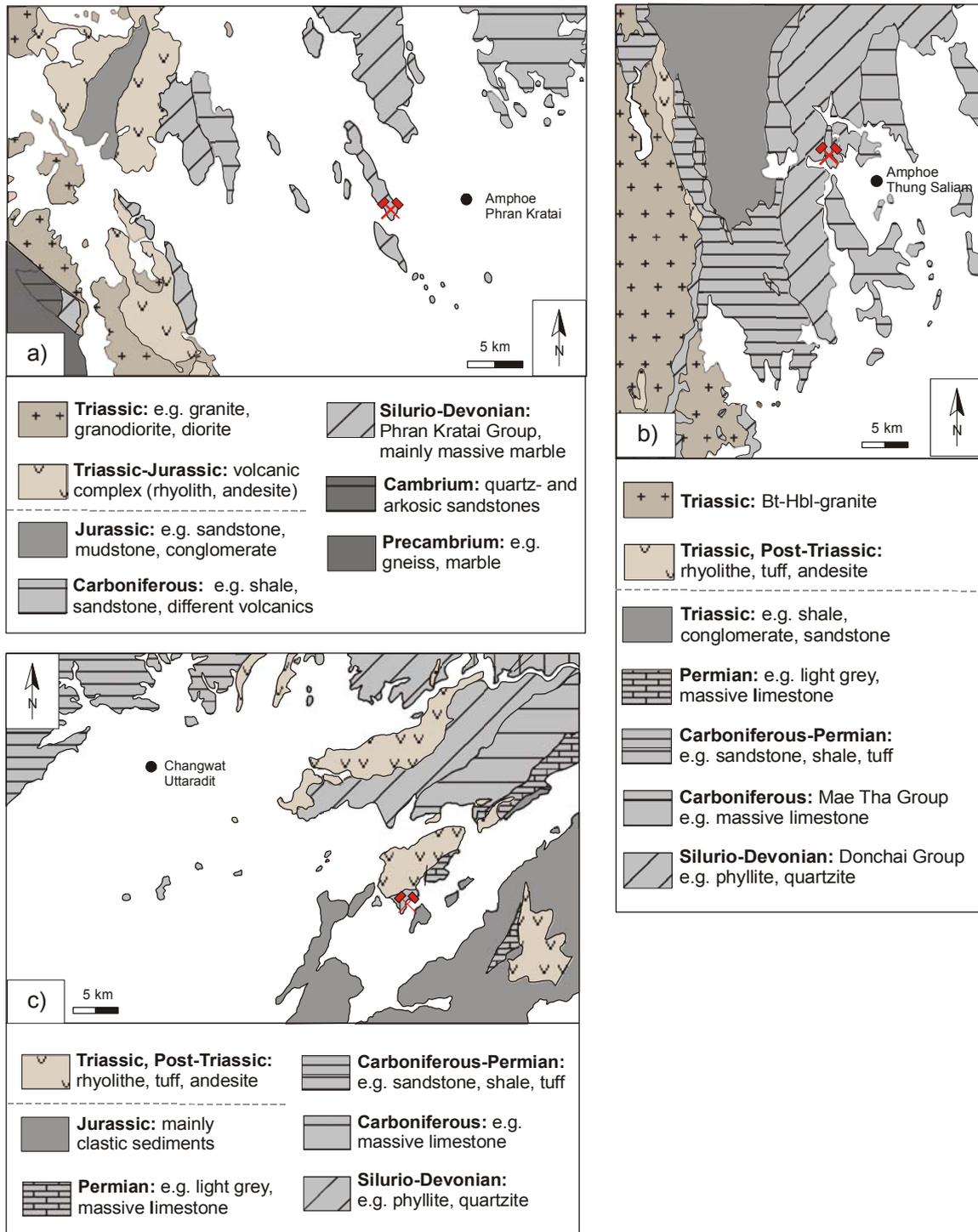


Abb. 3.11: Position der Lagerstätten und Arbeitsgebiete in NW-Thailand. a) Marmorvorkommen in der silurisch-devonischen Phran Kratai Gruppe, Provinz Kamphaeng Phet. Kartengrundlage: Geological Map of Thailand NE 47-15 (Geological Survey Division 1976). b) Marmorvorkommen in einem schmalen Streifen der karbonischen Mae Tha Gruppe, Provinz Sukhothai. Kartengrundlage: Geological Map of Thailand NE 47-11 (Geological Survey Division 1974). c) Marmorvorkommen in permischen Einheiten der Provinz Uttaradit. Kartengrundlage: Geological Map of Thailand NE 47-11 (Geological Survey Division 1974).

In der Provinz Sukhothai erfolgt der Abbau innerhalb eines schmalen Streifens der karbonischen Mae Tha Gruppe, der zwischen silurisch-devonischen Basamenteinheiten der

Donchai Gruppe aufgeschlossen ist (Abb. 3.11b). Die Donchai Gruppe kann als Äquivalent der Phran Kratai Gruppe in Kamphaeng Phet bezeichnet werden, ist jedoch an dieser geographischen Position nicht marmorführend.

Marmorvorkommen in der Provinz Uttaradit treten in der permischen Pha Huat Formation (Ratburi Gruppe) auf (Abb. 3.11c). Die Formation ist in dem Abbaugbiet durch relativ kleine Ausstriche sehr begrenzt vertreten, tritt jedoch etwa 50 km weiter NW' in der Umgebung von Phrae wieder flächendeckend an die Oberfläche. Jeder der kleinen Ausstriche ist in der Nachbarschaft bzw. direkt an hier auftretende Vulkanite gebunden (Abb. 3.11c). Der Abbau beider Marmorvarietäten ist zurzeit aufgrund erschöpfter Vorräte bzw. mangelnder Nachfrage am Markt eingestellt, so dass sich die Gewinnung innerhalb des Vorkommens lediglich auf Kalksteinbänke konzentriert, die dem Marmor auflagern. Die Kalksteine werden für den Verkehrswegebau genutzt.

4. LITHOLOGISCHE CHARAKTERISIERUNG DES WERKSTEINPOTENTIALS

4.1 Dekoreigenschaften

Die Dekoreigenschaften eines Naturwerksteins ergeben sich aus dem makroskopisch sichtbaren Gefüge sowie aus der Farbgebung. Beide Elemente sind von wesentlicher Bedeutung bei der Bewertung eines Werksteinvorkommens (siehe Kap. 7.1.1.1), da vielfach die ästhetischen Eigenschaften darüber entscheiden, welches Gestein beispielsweise in ein Bauvorhaben integriert wird.

4.1.1 Granitoide, Gneise und Hornblendit

Mehrheitlich wird das Naturwerksteinpotential Thailands durch Varietäten mit richtungslos-körniger Struktur repräsentiert. Gesteine mit diesen Gefügemerkmalen treten in den Provinzen Tak, Nakhon Sawan und Nakhon Ratchasima auf. Drei Varietäten aus Tak sind dabei durch ein inequigranulares Gefüge gekennzeichnet, das sich aus der Anordnung grobkörniger K-Feldspäte in einer ansonsten mittelkörnigen Matrix ergibt (Abb. 4.1). Die Größe der K-Feldspäte mit etwa 20-30 mm sowie die Größe der Matrixanteile mit etwa 5 mm sind in allen Lithologien einheitlich. Kennzeichnend für jede Varietät ist lediglich die Farbe der K-Feldspäte, die von grau bis grau-blau reicht bzw. fleisch-farbend oder grau-violet ausgebildet ist. Aufgrund der teilweise sehr weißen Plagioklase kann die Matrix bei einzelnen Varietäten in deutlichem Farbkontrast zu den kräftig eingefärbten K-Feldspäten erscheinen. Zudem sind K-Feldspäte oftmals sehr dicht arrangiert, so dass die Minerale das Gesamtbild einiger Gesteine dominieren und der Farbeffekt damit noch verstärkt wird. Trotz der grundsätzlich fehlenden Vorzugsorientierung der Minerale kann gelegentlich eine Einregelung von Feldspat und Mafiten beobachtet werden.



Abb. 4.1: Richtungslos-körnige Granitoide mit inequigranularem Korngefüge. Die Gesteine definieren sich makroskopisch lediglich über eine differenzierte Farbgebung der Feldspäte. Siehe hierzu auch die entsprechenden Datenblätter in Anhang II.

In der Region Tak treten noch weitere nicht texturierte Varietäten auf, die sich jedoch aufgrund ihrer überwiegend gleichkörnig ausgebildeten Minerale von den übrigen Vertretern der Provinz unterscheiden (Abb. 4.2). Eine dieser Varietäten ist feinkörnig und durch einen hellen Farbton gekennzeichnet (BT-White), der jedoch in Abhängigkeit mafischer Minerale schwanken kann. Das Gestein zeigt gelegentlich grobkörnigere Feldspäte, die sich lokal zu einer Fluidaltextur zusammenfinden und von Schlieren mafischer Minerale begleitet werden. Zu den equigranularen Varietäten zählen weiterhin zwei mittelkörnige Gesteine, deren Dekor durch mehrheitlich grauen Quarz und orangen Feldspat mit Größen um etwa 5 mm gekennzeichnet ist. Beide Lithologien definieren sich über die Farbe der Feldspäte, die mit differenzierter Intensität von schwach Orange (MT-Orange1) bis kräftig Orange (MT-Orange2) ausgebildet sind. Der Granit aus der Provinz Nakhon Sawan (NB-Orange) ist ebenfalls durch gleichkörnige Ausbildung der Minerale und orange Farben gekennzeichnet, unterscheidet sich jedoch von den farblich ähnlichen Einheiten aus Tak durch eine wesentlich feinere Korngröße (cc. 1 mm). Zusätzlich zeigt das Gestein farblosen, selten auch rauchigen bis milchigen Quarz, der mit den Feldspatanteilen eng verwachsen ist. Aufgrund der transparenten Ausbildung des Quarzes assimilieren die Kristalle die orange Farbe der Feldspäte, wodurch der intensiv orange Charakter des Gesteins bekräftigt wird. Die Farbintensität des Gesteins wird darüber hinaus noch durch die Tatsache unterstützt, dass dunkle Gemengteile mit Ausnahme sternförmiger, dunkelgrüner Chlorite nur untergeordnet und optisch kaum sichtbar auftreten.



Abb. 4.2: Richtungslos-körnige Granitoide mit equigranularer Kornstruktur und hellgrauen bzw. orangen Grundtönen. Siehe hierzu auch die entsprechenden Datenblätter in Anhang II.

Zu der Gruppe richtungslos-körniger Einheiten zählen weiterhin dunkle Gesteinstypen, die sich durch einen erheblichen Anteil mafischer Minerale auszeichnen (Abb. 4.3). Eines der Gesteine ist ein Ultramafit aus der Provinz Nakhon Ratchasima (PTC-Black), der aufgrund einer nahezu monomineralischen Zusammensetzung tief schwarz ausgebildet ist. Bemerkenswert ist das Korngrößenspektrum des Gesteins, das von fein- bis riesenkörnig über eine Distanz von wenigen Zentimetern auftreten kann und damit deutliche Schwankungen im Dekor hervorruft. Die farbliche Ausbildung des Gesteins bleibt von den Schwankungen der Korngröße jedoch unberührt. Auffallendes Merkmal sind zudem die zentimetergroßen, weißen bis weiß-rötlichen Feldspäte, die in den Zwickelporen der Hornblendekristalle erscheinen können (Abb. 4.3). Weitere individuelle Besonderheiten des Dekors ergeben sich aus fein verteilten Pyritmineralisationen sowie einer lokal auftretenden Chloritisierung der Amphibole, die zu einer grünlichen Färbung der Minerale führt. Der gleiche Effekt ist gelegentlich auch bei dunklen Granitoiden aus der Provinz Tak zu beobachten (BT-Black). Die Vorkommen dieser Varietät sind im Allgemeinen feinkörnig, wobei auch hier unterschiedliche Korngrößen auftreten können. Die Korngrößenverteilung lässt dabei die Definition von mindestens zwei Sorten zu, an die zudem auch unterschiedliche Anteile heller Feldspäte gebunden sind. Es ergeben sich daraus eine feinkörnige (1-5 mm) Varietät mit wenigen hellen Feldspäten (BT-Black) und eine grobkörnige (5-10 mm) Varietät mit relativ höherem Anteil heller Feldspäte.



Abb. 4.3: Dunkle Gesteine mit hohem Anteil mafischer Minerale. Siehe hierzu auch die entsprechenden Datenblätter in Anhang II.

Texturierte Granitoide, die in Thailand als Naturwerkstein gewonnen werden, bestehen u. a. aus mittelkörnigen, dunkelgrauen (PS-Grey) und feinkörnigen, grau-weißen Gneisen (HH-Grey) (Abb. 4.4). Kennzeichnend für beide Gesteine ist neben der gleichkörnigen Mineralausbildung ein Lagenbau, der sich aus alternierenden Partien felsischer und mafischer Anteile zusammensetzt. Der Lagenbau kann in der Varietät PS-Grey teilweise weniger deutlich ausgebildet sein (Abb. 4.4). Während die Foliation in diesem Gneis eine konstante Orientierung aufweist, sind in dem Gneis HH-Grey lokal kleinere Faltenstrukturen ausgebildet, die das Erscheinungsbild optisch auflockern. Aufgrund der metamorphen Überprägung konnten sich in dem Gestein HH-Grey zudem wenige Millimeter große, rote Granate entwickeln, die der Varietät durch ihr dezentes Auftreten ein sehr ansprechendes

Dekor zuschreiben. Neben diesen Varietäten beinhaltet die Gruppe texturierter Gesteine noch die Lithologien MC-Yellow und SP-Grey (Abb. 4.4). Beide Gesteine sind im Gegensatz zu den lagig aufgebauten Varietäten PS-Grey und HH-Grey durch die Einregelung vereinzelter Minerale, insbesondere Biotit und Feldspat, gekennzeichnet. Die Intensität der Foliation ist in beiden Einheiten sehr variabel und kann mitunter derartig schwach ausgebildet sein, dass eine Vorzugsorientierung der Minerale nicht mehr zu erkennen ist. Beide Gesteine sind darüber hinaus durch das lokale Auftreten von bis zu 12 cm großen Feldspat-Porphyroklasten charakterisiert, die in eine fein- bis mittelkörnige Matrix eingebettet sind. Megakristalle beeinflussen dabei aufgrund ihrer blassen Farben lediglich die Struktur, nicht aber den Grundfarbton der Gesteine, der sich damit ausschließlich über die Matrixanteile definiert. Die Matrixfarbe des SP-Grey ergibt sich aus grauem Feldspat sowie aus einer erheblichen Menge an bläulichem Quarz, der oftmals eine makroskopisch sichtbare Zonierung erkennen lässt. Die Matrixanteile des gelblichen MC-Yellow sind überwiegend weiß, so dass in diesem Fall nicht die Eigenfarbe der Minerale, sondern Alterationserscheinungen an den Feldspäten die Grundfarbe des Gesteins hervorrufen. Feldspat-Porphyroklasten treten darüber hinaus auch in Gesteinen der Provinz Prachuap Khiri Khan auf (Abb. 4.4), in der auch der texturierte Gneis HH-Grey gewonnen wird. Im Vergleich zu den Megakristallen der vorstehend genannten porphyrischen Einheiten liegen jedoch hier die Minerale mit wesentlich geringerer Korngröße vor.

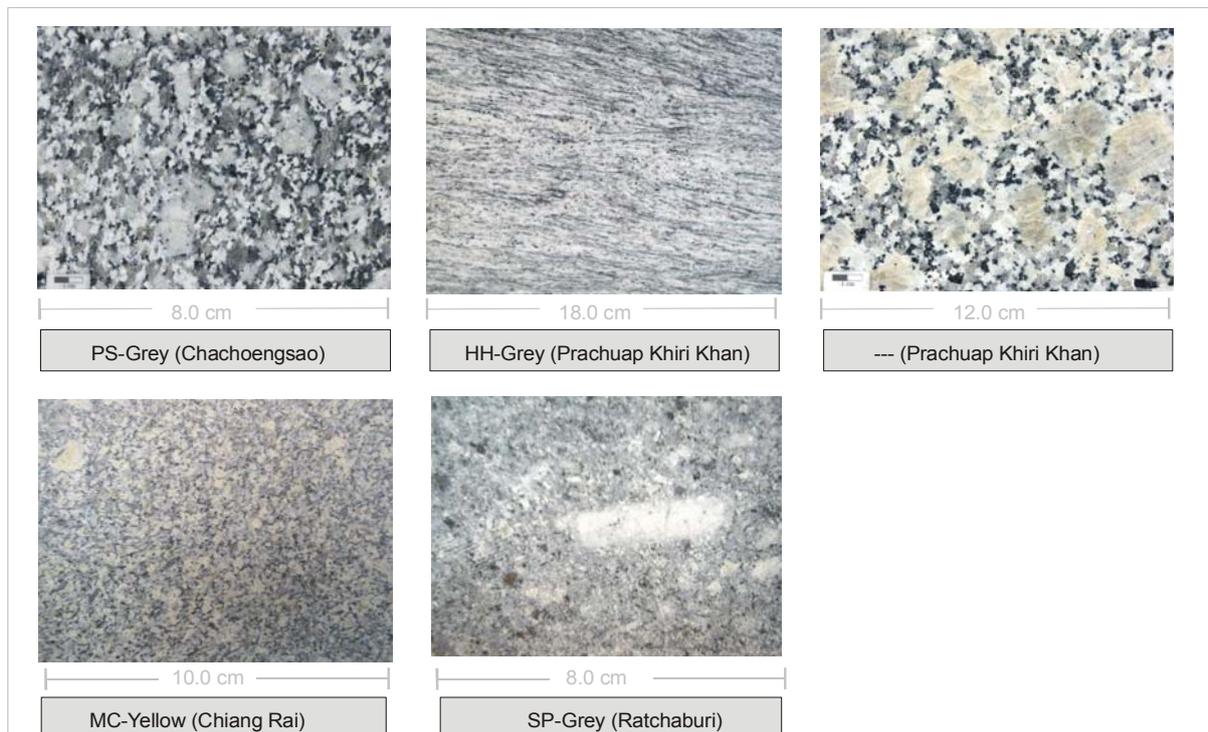


Abb. 4.4: Texturierte Granitoide, bestehend aus equigranularen, fein- bis mittelkörnigen Varietäten und foliierten, porphyrischen Varietäten. Siehe hierzu auch die entsprechenden Datenblätter in Anhang II.

4.1.2 Carbonatgesteine

Die thailändischen Carbonatgesteine sind im Allgemeinen durch eine Vielzahl an Farben, Strukturen und Deformationsmustern gekennzeichnet. Ähnlich wie viele andere international gehandelte Marmore weist der Marmor aus Uttaradit sehr weiße Farbtöne auf (Abb. 4.5). In geringem Ausmaße zeigt das feinkörnige Gestein hellgraue, diffuse Schattierungen, die auf der Oberfläche von Belagsplatten wolkig bis elliptisch in Erscheinung treten und vermutlich auf leichte Verunreinigungen des Mineralbestandes zurückzuführen sind. Die Mehrheit der grauen Verfärbungen ist parallel zueinander ausgerichtet und zeichnet dabei die Foliation des Marmors nach. Einzelne Partien des Gesteins können relativ großflächig hellgrau eingefärbt sein, wobei in diesem Fall vernetzte Zwischenräume auftreten, in denen das rein weiße Dekor des Marmors erhalten bleibt. Die in der Umgebung geförderten riesenkörnigen Marmore zeigen eine eher gräuliche Farbe (Abb. 4.5).

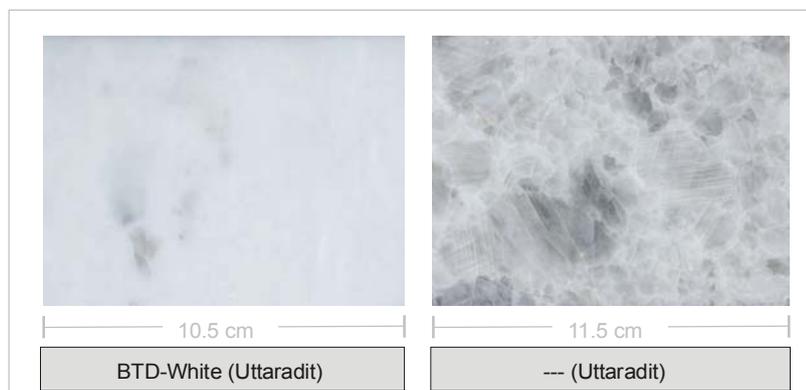


Abb. 4.5: Feinkörnige weiße (links) und riesenkörnige graue Marmore (rechts) der Provinz Uttaradit. Siehe hierzu auch die entsprechenden Datenblätter in Anhang II.

In Bezug auf den weißen Marmor aus Uttaradit sind die Marmore aus Sukhothai und Kamphaeng Phet durch einen ausgeprägteren Lagenbau gekennzeichnet. Die Mehrheit der Varietäten weist dabei ein sehr dichtes Gefüge sowie verschiedene Farbintensitäten und Farbarrangements auf.

Marmor aus Sukhothai ist grundsätzlich in Form einer grauen und pinken Varietät verfügbar, wobei jede Farbe ein großes Spektrum von hellen und dunklen Tönen abdeckt. Die unterschiedlichen Nuancen treten dabei überwiegend alternierend auf. Charakteristisch für den grauen Marmor TS-Grey sind feine dunkelgraue Lagen im Bereich von 2-3 mm Mächtigkeit, die als dünne Streifen über kurze Distanzen bis zu 50 mm Länge auftreten. Hellgraue bis weiße Partien sind in gleicher Weise angeordnet, können darüber hinaus jedoch auch noch als Bleichungszonen entlang von Kleinklüften auftreten. Deutlichstes Merkmal der Varietät ist die Häufigkeit dieser Kleinklüfte, die den metamorphen Lagenbau des Gesteins schneiden und die gleichmäßige Farbabfolge durch einen Versatz der Hell- und Dunkelpartien stören (Abb. 4.6). Das Dekor der pinken Variante TS-Pink ist mit ähnlichen Schattierungen und Mustern ausgebildet (Abb. 4.6), doch können hier zusätzlich zahlreiche Stylolithen

auftreten, die in der Regel einen kräftigeren Rot-Ton aufweisen. Stylolithen können zusammen mit dem Lagenbau eng gefaltet sein. In beiden Varietäten TS-Grey und TS-Pink treten regelmäßig strukturelle und farbliche Abweichungen von den hier beschriebenen Mustern auf, in deren Folge sich pinke Marmore in zwei Subvarietäten und graue Marmore in vier Subvarietäten untergliedern lassen. Darüber hinaus ist eine Mischung der beiden Farben grau und pink möglich, über die sich auf der Grundlage differenzierter Strukturen eine weitere Sorte mit vier Subvarietäten definiert.

Das Dekor der Marmore aus Kamphaeng Phet ist dem der Marmore aus Sukhothai ähnlich, da auch hier vornehmlich graue (PK-Grey) und pinke (PK-Pink) Sorten überwiegen (Abb. 4.6). Marmore aus Kamphaeng Phet zeigen dabei jedoch einen deutlich verschwommeneren Übergang der Farbschattierungen, so dass teilweise wolkige Strukturen im Dekor erscheinen. Darüber hinaus sind die Marmore durch die nur untergeordnet auftretenden Kleinklüfte kompakter ausgebildet, so dass bei den Gesteinen PK-Grey und PK-Pink ein wesentlich massiveres Gesamtbild vorherrscht. Beide Einheiten können lokal als Breckzien vorliegen, die gleichfalls dicht ausgebildet, dann aber durch scharf abgegrenzte Farbkontakte gekennzeichnet sind. Bei einer intensiven Zunahme der Breckziierung wechselt die Farbgebung der Gesteine zu einem gelb-bräunlichen Ton, der eine individuelle Varietät mit ausgeprägtem Rissgefüge darstellt. (Abb. 4.6).



Abb. 4.6: Feinkörnige, graue und pinke Marmore mit intensiv ausgeprägtem Rissgefüge der Provinz Sukhothai (oben links, Mitte) sowie feinkörnige, graue und pinke Marmore der Provinz Kamphaeng Phet (oben rechts, unten links). Die gelb-bräunliche Varietät aus Kamphaeng Phet (unten rechts) zeigt ein intensives, aber ausgesprochen dichtes und gut verheiltes Rissssystem. Siehe hierzu auch die entsprechenden Datenblätter in Anhang II.

Spröde Deformationsmuster sind auch für die überwiegende Mehrheit der Marmore aus Nakhon Ratchasima charakteristisch, bei denen sich aufgrund der sehr variablen metamorphen und tektonischen Überprägung eine noch größere Anzahl an Sorten entwickeln konnte als beispielsweise in der Provinz Sukhothai. Der thailändische Markt erkennt in den Marmoren aus Nakhon Ratchasima bis zu zwölf unterschiedliche Varietäten, von denen allein acht in einer einzigen Lagerstätte gewonnen werden. Zur besseren Übersicht sollen die Sorten an dieser Stelle auf vier Grundtypen mit differenziertem Gefügemuster reduziert werden (Abb. 4.7). Einer der Grundtypen ist ein fein bis mittelkörniger Marmor, der gewöhnlich in weißen bis hellgrauen Farbtönen vorliegt (Abb. 4.7, oben links). Einzelne Partien des Gesteins sind durch gelblich-braune, graue oder hellrote Flecken verfärbt. Als wohl auffälligstes Gefügemerkmal durchzieht ein Netz zahlreicher, gut mineralisierter und grobkörniger Calcitadern das Material, die lokal zu einer farblichen Aufhellung der unmittelbar angrenzenden Marmorpartien führen. Aufgrund erheblicher Hämatitanteile, die an die Ausbildung von Calcitadern gebunden sind, tendieren die Gesteine bei hoher Rissdichte zu rötlichen Grundtönen. Die Vernetzung dieser Adern führt zur Bildung einzelner Marmorclasten, die das initiale Stadium bruchhafter Deformationen und den Übergang zu Breckzienstrukturen repräsentieren.

Durch die Intensivierung dieser spröden Deformationsmuster und durch den zunehmenden Einfluss pigmentierend wirkender Hämatitanteile entwickelt sich ein weiterer Grundtyp, der durch weiße bis graue, fein- bis mittelkörnige Marmorclasten charakterisiert ist (Abb. 4.7 oben rechts). Die einzelnen Fragmente schwimmen in einer feinstkörnigen Matrix aus roten Tonmineralen. Das Material ist durch hohe Schwankungen hinsichtlich der Größe einzelner Marmorfragmente gekennzeichnet (0.5 – 50 cm), die ausgesprochen kantige Formen und einen scharfen Kontakt zur umgebenden Matrix aufweisen. In vielen Fällen zeigen die Clasten lediglich eine schwache Rotation gegeneinander, so dass sich die ursprüngliche Position einzelner Fragmente noch rekonstruieren lässt. Die Farbe der Grundmasse variiert von hellrot über rot-grau bis dunkelrot und ergibt zusammen mit dem Farbkontrast zu den hellen Marmoranteilen ein sehr ansprechendes Dekor.

Der dritte Grundtyp ist durch eine Zunahme in der Korngröße gekennzeichnet und kann hinsichtlich der kataklastischen Gefügemerkmale als eine Übergangsform zwischen beiden vorstehend genannten Varietäten angesehen werden (Abb. 4.7, unten links).

Im Gegensatz zu den häufig sehr wechselhaften Dekors der bisherigen Grundtypen zeigt der vierte Haupttyp (PC-Grey) mit lagig wechselnden Grauschattierungen ein sehr einheitliches Gesamtbild (Abb. 4.7, unten rechts), das lediglich durch feine, ausschließlich rot oder gelb gefärbte Styolithen unterbrochen werden kann. Das Gestein ist zudem wesentlich feinkörniger als die übrigen hier auftretenden Gesteine und stellt ein Bindeglied zwischen den metamorphen und sedimentären Carbonatgesteinen der Region dar (siehe dazu auch die mikroskopischen Befunde in Kap. 4.3.3.1).

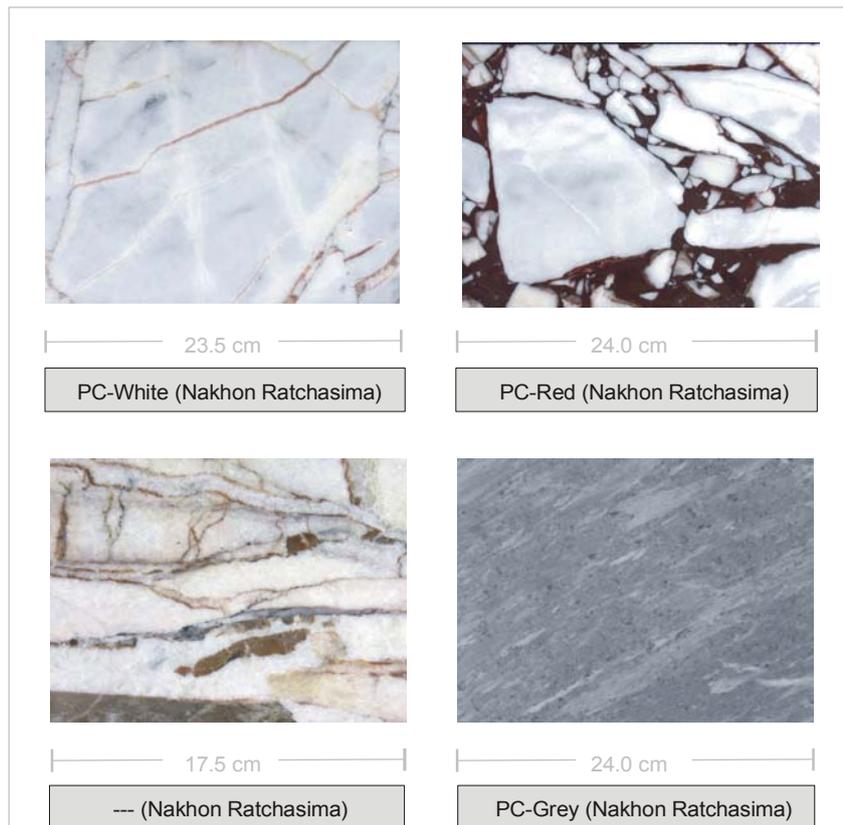


Abb. 4.7: Die vier Grundtypen der untersuchten Marmore aus Nakhon Ratchasima. Oben links: Grundtyp 1. Oben rechts: Grundtyp 2. Unten links: Grundtyp 3. Unten rechts: Grundtyp 4. Siehe hierzu auch die entsprechenden Datenblätter in Anhang II.

Carbonatische Naturwerksteine ohne metamorphe Überprägung werden in der Provinz Nakhon Ratchasima durch graue Kalksteine repräsentiert, die durch die Politur ein dunkelgraues, teilweise tiefschwarzes Dekor erhalten (Abb. 4.8). Gleiches gilt für eine Reihe weiterer Kalksteine aus den Provinzen Saraburi und Sukhothai (Abb. 4.8). Alle Varietäten sind durch mineralisierte Klüfte gekennzeichnet, die oftmals nahezu senkrecht zum sedimentären Lager verlaufen und sich durch weiße Calcitfüllungen von der dunklen Grundmasse abheben. Viele der Klüfte sind als En-echelon Frakturen ausgebildet.



Abb. 4.8: Schwarze Kalksteine mit heller, intensiver Calcitaderung aus den Provinzen Nakhon Ratchasima und Sukhothai.

Die gleichen Kluftelemente treten in hohem Maße bei mikritischen grauen bis blaugrauen und roten Kalksteinen der Provinz Sra Kaeo auf (Abb. 4.9). Der rote Farbton der Gesteine kann lokal unterschiedlich ausgebildet sein, so dass neben kräftigen Rottönen auch Nuancen zwischen rot und braun auftreten. Die mikritischen Anteile sind in Form rundlicher Knollen ausgebildet, die durch Stylolithen voneinander abgegrenzt sind. Neben seiner außergewöhnlichen Farbe ist der Kalkstein mit einem hohen Fossilgehalt ausgestattet, der sich u. a. aus Fusulinen, Brachiopoden und Schwämmen zusammensetzt. Die Komponenten sind überwiegend mit transparentem oder weißem Calcit ausgekleidet, was insbesondere der roten Varietät einen individuellen Farbakzent verleiht.

Mit mehr als 20 verschiedenen Varietäten weisen die Kalksteine der Provinz Tak die wohl größte Sortenvielfalt auf. Die Farben der Gesteine reichen von rosa, grau und dunkelgrau bis hin zu gelb und braun. Viele der Varietäten sind kataklastisch beeinflusst oder reich an Stylolithen und Fossilien. Im Gegensatz zu den Gesteinen aus Sra Kaeo besitzen die Fossilien jedoch die gleiche Farbe wie die umgebende Matrix, so dass die Komponenten optisch kaum zur Geltung kommen. Innerhalb des hier vorliegenden Probensatzes ist eine gelblich braune, kataklastische Varietät (MP-Yellow) aus dem Sortiment vertreten (Abb. 4.9).

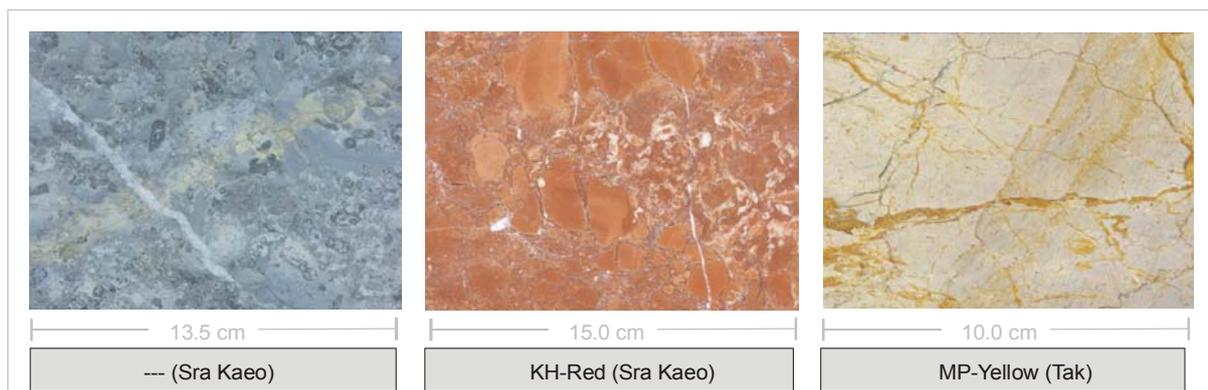


Abb. 4.9: Kalksteine mit unterschiedlichen Farben und Strukturen aus den Provinzen Sra Kaeo und Tak. Siehe hierzu auch die entsprechenden Datenblätter in Anhang II.

4.1.3 Sandsteine

Die thailändischen Sandsteine kennzeichnet in erster Linie eine sehr große Farbvielfalt, die durch weiße, braune und gelbe sowie durch grüne und rote Varietäten zum Ausdruck kommt (Abb. 4.10). Die Varietäten weisen mehrheitlich eine relativ stabile Farbkonstanz auf, obwohl gelegentlich bei einigen Sorten abweichende Farbnuancen entwickelt sein können. Am deutlichsten ist dieses in dem weißen Sandstein dokumentiert, der durch konzentrisch auftretende, rötlich-violette Verfärbungen (so genannte Liesegangsche Ringe) ein völlig abweichendes Dekor erhält.

Die makroskopische Erscheinung und das Dekor der Sandsteine werden neben der Farbe in großem Maße durch Sedimentstrukturen bestimmt. Braune und gelbe Varietäten zeigen jeweils alternierend helle und dunkle Lagen, die sich aus sandigem bzw. tonigem Material

aufbauen und Mächtigkeiten im Millimeterbereich aufweisen. Obwohl weiße Sandsteine durch ähnliche Merkmale ausgestattet sind, ist bei dieser Varietät aufgrund kaum wahrnehmbarer Farbwechsel eine weniger ausgeprägte Internstruktur zu erkennen. Insbesondere bei braunen Gesteinen ergibt sich im Fall einer ungestörten Abfolge der Lamination ein sehr massives, dichtes Erscheinungsbild. Gleiches gilt für gelbe Varietäten, obwohl hier gelegentlich ein höherer Anteil an Makroporen auftritt, der mit gering verfestigten Tonmineralen verfüllt sein kann. Braune, gelbe und weiße Varietäten sind neben horizontaler Schichtung durch Kreuzschichtung differenzierter Intensität gekennzeichnet, die optisch sehr zur Geltung kommt, wenn mit Anschnittseffekten gegen das sedimentäre Lager gearbeitet wird.

Im Gegensatz zu den drei kreuzgeschichteten Sorten sind grüne und rote Sandsteine nahezu ausschließlich durch einen horizontalen Aufbau der Schichtung charakterisiert. Kennzeichnend ist jedoch auch hier die Ausbildung sehr feiner Sand- und Tonlagen, die sich in der Schnittrichtung senkrecht zum Lager durch millimeterdicke Hell-Dunkel-Abschnitte bemerkbar machen können (Abb. 4.10).

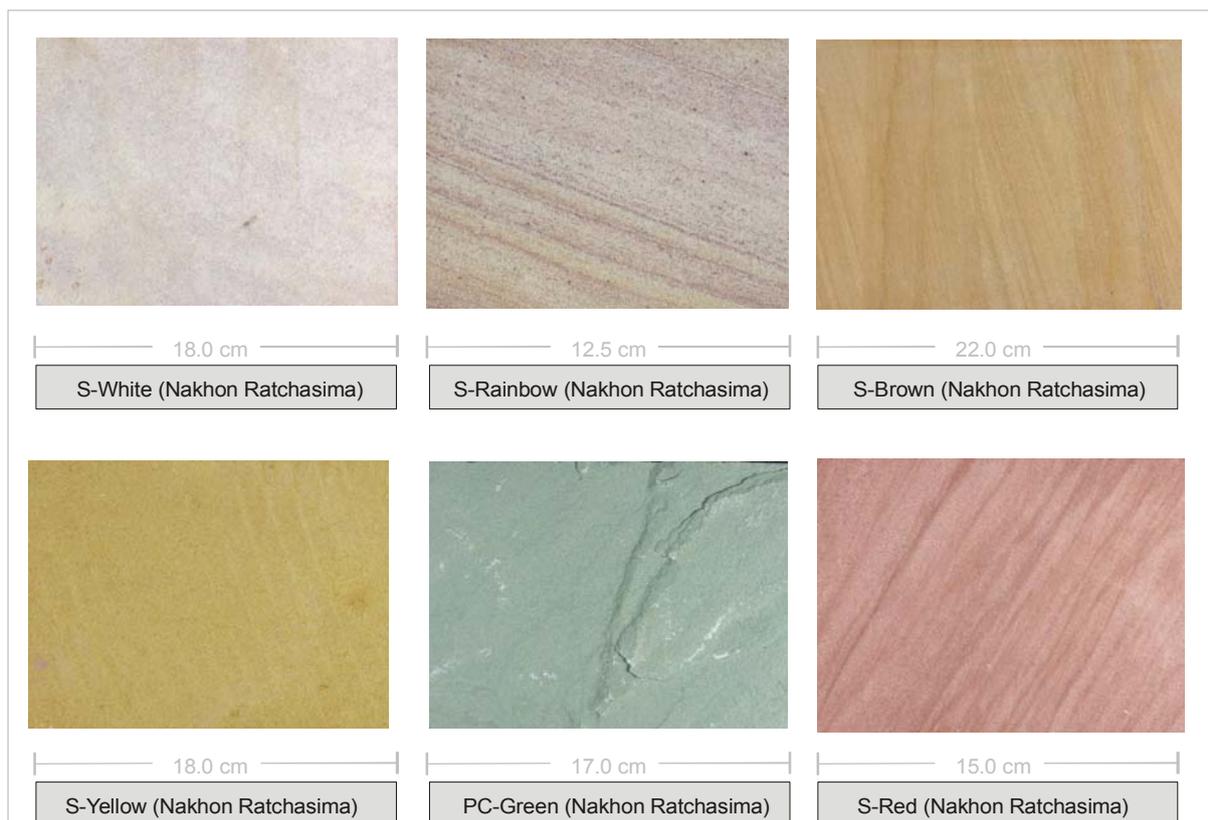


Abb. 4.10: Farblich differenzierte Sandsteine der Provinz Nakhon Ratchasima. Siehe hierzu auch die entsprechenden Datenblätter in Anhang II.

4.2 Mineralogische und chemische Zusammensetzungen

4.2.1 Granitoide, Gneise und Hornblendit

Die Granitoide und Gneise des Probenmaterials kennzeichnet eine hohe Vielfalt an silikatischen und auch nicht-silikatischen Mineralen, die auf primäre Kristallisationen direkt aus der magmatischen Schmelze bzw. auf sekundäre Mineralisationen infolge von Alterationsprozessen und der Modifikation primärer Phasen zurückgehen. Als Hauptkomponenten des Mineralbestandes lassen sich Quarz, Feldspat, Amphibol und Glimmer, hier insbesondere Biotit, identifizieren. Auf der Basis ihres Quarz- K-Feldspat-Plagioklas Verhältnisses kann das magmatische Probenmaterial in der Klassifikation plutonischer Gesteine nach Streckeisen (1976) in Granite, Quarz-Monzonite und Quarz-Monzodiorite untergliedert werden (Abb. 4.11a, S. 50).

Proben mit granitischer Komposition werden dabei von sechs Gesteinen des Tak Batholithen (BN-Pink, BT-Violet, SN-Blue, MT-Orange1, MT-Orange2, BT-White) sowie von den jeweiligen Proben der Provinzen Chiang Rai (MC-Yellow), Nakhon Sawan (NB-Orange), Ratchaburi (SP-Grey), Chachoengsao (PS-Grey) und Prachuap Khiri Khan (HH-Grey) repräsentiert. Im Streckeisen-Diagramm (Abb. 4.11a) befinden sich die Granite im unteren, rechten Teil des Granit-Feldes. Die Gesteine kennzeichnet damit zwar insgesamt ein relativ vergleichbares K-Feldspat- Plagioklas Verhältnis, doch lässt die vertikale Anordnung der einzelnen Datenpunkte wesentliche Unterschiede im Quarz-Feldspat-Verhältnis erkennen. Der Quarzgehalt für Granite des Probenmaterials ist recht weit gestreut und variiert zwischen 21 Vol.-% (BT-Violet) und 35 Vol.-% (NB-Orange). Der Gehalt an Feldspat (nachgewiesen wurden Mikroklin, Orthoklas, Oligoklas und Albit) schwankt dementsprechend und liegt zwischen 50 Vol.-% (MC-Yellow) und 69 Vol.-% (BT-Violet) (Tab. 4.1). In diesem Zusammenhang zeigt sich, dass diejenigen Gesteine mit den niedrigsten Quarzgehalten fast ausnahmslos im Tak Batholithen anstehen.

Der Trend, nachdem die Varietäten aus Tak vergleichsweise niedrige Quarzgehalte aufweisen, bestätigt sich durch die Vertreter der Quarz-Monzonite (BT-Blue1, BT-Blue2), die ebenfalls ausschließlich im Tak Batholithen auftreten. Die Varietäten liegen dabei mit Quarzanteilen um etwa 17 Vol.% im oberen Bereich des für die Lithologien charakteristischen Feldes im Streckeisendiagramm, so dass die Gesteine deutliche Affinitäten zu den relativ quarzarmen Graniten des Batholithen, beispielsweise BT-Violet und BN-Pink, aufweisen. Die Varietäten BT-Blue1 und BT-Blue2 weisen mit etwa 70 Vol.-% nahezu gleiche Gehalte an Feldspat auf (Tab. 4.1), wobei sich die Zusammensetzung der Minerale leicht unterscheidet. Während beide Lithologien durch das Auftreten von Mikroklin und Oligoklas als dominante Feldspatvarietät charakterisiert sind, ergänzen in der Lithologie BT-Blue2 geringe Mengen an Orthoklas den Mineralbestand. Darüber hinaus zeigen beide Gesteine leichte Unterschiede in dem Verhältnis K-Feldspat- Plagioklas. Eine entsprechende Verwandtschaft deutete sich bereits in den sehr ähnlich ausgebildeten Makrogefügen der Gesteine an.

Tab. 4.1: Mineralogische Zusammensetzung der Granitoide, Gneise und des Hornblendits auf der Grundlage röntgenographischer Analysen (RDA). Angaben in Vol.-%.

	Quarz	K-Feldspat	Plagioklas	Biotit	Amphibol	Serizit	Chlorit	Andere
Granitoide								
BT-White	24.9	26.2	36.5	5.8	-	4.6	1.3	Actinolith
BT-Black	6.6	6.6	40.5	8.8	24.0	8.2	5.9	Rutile, F-Apt
BT-Violet	21.2	38.4	30.4	1.3	0.8	7.3	1.2	-
BT-Blue1	16.6	38.3	32.6	3.0	1.8	6.7	1.6	-
BT-Blue2	17.1	34.2	36.0	6.4	-	4.1	1.5	Actinolith
BN-Pink	24.9	32.5	30.5	3.6	0.5	7.3	-	Rutile
SN-Blue	34.0	21.8	29.2	5.1	-	7.7	1.6	Rutile
MT-Orange1	30.5	34.2	26.7	-	-	6.4	2.2	Rutile
MT-Orange2	29.9	31.7	32.7	-	-	4.5	0.6	Rutile
NB-Orange	35.4	31.1	32.9	-	-	-	-	Hematite
MC-Yellow	31.3	21.9	28.4	10.7	-	5.5	1.1	Actinolith
SP-Grey	29.9	35.0	25.8	9.2	-	5.4	1.6	-
Gneise								
PS-Grey	32.3	22.1	33.7	6.5	-	6.5	-	-
HH-Grey	30.4	24.2	39.9	2.0	-	3.6	-	-
Hornblendit								
PTC-Black	-	-	3.7	-	90.3	-	4.0	Diopsid, Pyrit

Aufgrund ihrer Ableitung von basischen Magmen sind der Quarz-Monzodiorit BT-Black und der Hornblendit PTC-Black durch deutlich niedrigere Werte bzw. durch eine vollständige Abstinenz der Quarzphase gekennzeichnet. Den Monzodiorit kennzeichnet darüber hinaus ein ausgesprochen hoher Feldspatgehalt (Orthoklas und Albit) von 47 Vol.-% (Tab. 4.1), womit sich die Lithologie nur unwesentlich von einigen feldspatarmen Graniten unterscheidet. Der mit Abstand niedrigste Gehalt an Feldspäten (Albit) konnte mit 4 Vol.-% für den Hornblendit nachgewiesen werden (Tab. 4.1).

Alle Gesteine sind in unterschiedlichem Ausmaß durch mafische Minerale gekennzeichnet. Amphibol tritt in der Suite granitischer und monzonitischer Proben nur sehr untergeordnet in Erscheinung und umfasst dabei weniger als 1 Vol.-% der Gesamtzusammensetzung. Das Mineral beteiligt sich jedoch mit 24 Vol.-% maßgeblich an dem Aufbau des Monzodiorits und dominiert fast ausschließlich die Mineralogie des Hornblendits, der 90 Vol.-% Hornblende aufweist und damit nahezu monomineralisch aufgebaut ist. Den Monzodiorit kennzeichnet darüber hinaus ein Biotitgehalt von etwa 9 Vol.-%. Biotit ist in den übrigen Varietäten meist deutlich weniger vertreten, wobei dennoch einige Lithologien wie beispielsweise die texturierten Granite SP-Grey oder MC-Yellow ähnlich hohe bzw. mit 11 Vol.-% noch höhere Werte aufweisen können (Tab. 4.1).

Neben dem Hauptmineralbestand kennzeichnet alle Varietäten ein recht hoher Anteil an Sekundärmineralen. Neben Serizit, der aus der Alteration von Feldspäten hervorgeht und daher in fast jeder Varietät zu finden ist, tritt Chlorit mit unterschiedlicher Intensität auf.

Chlorit geht auf die Alteration mafischer Minerale zurück, so dass die sehr amphibolreichen Gesteine BT-Black und PTC-Black die höchsten Gehalte der Mineralphase aufweisen. Beide mafischen Gesteine sind zudem Pyrit-führend. Weiterhin können in den Lithologien Rutil und Hämatit, untergeordnet auch Aktinolith und Calcit, auftreten. Einzelne Varietäten enthalten darüber hinaus signifikante Mengen an Epidot, Zircon und Titanit (Tab. 4.1).

Die geochemische Komposition magmatischer Gesteine beschränkt sich auf eine relativ begrenzte Anzahl an Oxiden (Tab. 4.2). Die SiO₂-Werte der vorliegenden Lithologien demonstrieren eine große Streubreite, die eine Klassifikation der Gesteine in ultrabasische, basische und saure Einheiten erlaubt (Abb. 4.11b). Die sehr quarzreiche Varietät NB-Orange zeigt dabei mit 76.8 Gew.-% die höchsten SiO₂-Gehalte an und befindet sich bereits außerhalb des vorgegebenen Feldes für saure Einheiten, die den größten Anteil des Probeninventars ausmachen. Der mafische Monzodiorit BT-Black und der Hornblendit PTC-Black definieren die niedrigsten Werte und repräsentieren damit die basischen (53 Gew.-% SiO₂) bzw. ultrabasischen (41 Gew.-% SiO₂) Varietäten. Der SiO₂-Gehalt, der wohl als aussagekräftigster Wert hinsichtlich der Klassifikation silikatischer Gesteine gewertet werden darf, liegt bei granitoiden Gesteinen im Allgemeinen in einer Größenordnung um etwa 60 - 78 Gew.-% (Wimmenauer 1985), so dass die vorliegenden Gesteine durchaus übliche Werte aufweisen.

Tab. 4.2: Chemische Zusammensetzung der Granitoide, Gneise und des Hornblendits auf der Grundlage röntgenographischer Analysen (RFA). Angaben in Gew.-%.

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	H ₂ O	CO ₂	Summe
Granitoide													
BT-White	69.7	0.31	14.8	3.12	0.08	0.37	1.88	3.61	4.89	0.07	0.64	0.10	99.57
BT-Black	53.0	0.96	15.7	8.07	0.13	6.82	7.59	2.64	2.68	0.35	1.45	0.06	99.45
BT-Violet	69.3	0.31	15.1	2.2	0.10	0.54	1.91	3.91	5.20	0.10	0.61	0.15	99.43
BT-Blue1	66.4	0.33	16.3	3.16	0.09	0.66	1.84	3.83	6.07	0.11	0.71	0.08	99.58
BT-Blue2	66.4	0.39	16.0	3.29	0.08	0.76	1.95	3.51	6.11	0.12	0.70	0.07	99.38
BN-Pink	69.7	0.34	14.8	2.5	0.10	0.74	2.06	3.33	5.12	0.11	0.54	0.12	99.46
SN-Blue	72.6	0.26	13.9	2.63	0.06	0.63	1.78	2.84	4.14	0.10	0.79	0.07	99.80
MT-Orange1	73.9	0.16	13.4	1.58	0.05	0.22	1.00	3.42	5.12	0.04	0.64	0.07	99.60
MT-Orange2	74.7	0.10	13.2	1.22	0.06	0.14	0.76	3.71	4.97	0.03	0.52	0.13	99.54
NB-Orange	76.8	0.07	12.1	1.17	0.01	0.09	0.57	3.65	4.35	0.02	0.50	0.20	99.53
MC-Yellow	68.0	0.59	14.2	3.86	0.06	2.09	2.66	2.54	4.41	0.16	0.84	0.07	99.48
SP-Grey	71.9	0.42	13.5	2.48	0.04	0.56	1.54	2.39	5.80	0.09	0.67	0.09	99.48
Gneise													
PS-Grey	73.3	0.16	14.2	1.72	0.04	0.42	1.97	3.59	3.61	0.05	0.61	0.05	99.72
HH-Grey	74.8	0.15	13.7	1.30	0.07	0.25	0.93	3.20	4.89	0.07	0.35	0.07	99.78
Hornblendit													
PTC-Black	41.4	1.92	14.4	11.92	0.12	13.09	11.88	2.18	0.64	0.03	1.56	0.15	99.29

Während Al_2O_3 in granitischen Gesteinen gewöhnlich in einer Größenordnung zwischen 10 und 20 Gew.-% auftritt, sollten sich alle übrigen Hauptbestandteile unter dem Grenzwert von etwa 10 Gew.-% einfinden (Hurlbut & Klein 1977). Auch diese Rahmenwerte lassen sich für die hier untersuchten Lithologien mit Ausnahme des Hornblendits PTC-Black bestätigen.

Über den SiO_2 -Gehalt lassen sich die Lithologien zudem in Kombination mit den $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ Werten in alkalische und kalkalkalische Varietäten gliedern (Abb. 4.11b). Auffallend dabei ist, dass die Tak-Varietäten nahezu ausnahmslos als Alkali-Granite qualifiziert werden können, während die übrigen Granitoide Kalkalkali-Signaturen aufweisen.

Unter Berücksichtigung weiterer Komponenten wird darüber hinaus deutlich, dass einige der Tak Granitoide sehr deutliche Gemeinsamkeiten aufweisen. Dies gilt insbesondere für die bläulichen Granite BT-Blue1 und BT-Blue2, für die Granite BT-Violet und BN-Pink sowie für die orangen Granite MT-Orange1 und MT-Orange2. Die Gemeinsamkeiten lassen sich durch die gleichen Plutone erklären, aus denen die drei Paare jeweils stammen. Obwohl die Proben SN-Blue, BT-White und BT-Black aus teilweise denselben Plutonen stammen, lassen sich die Lithologien aufgrund erheblicher Abweichungen in den entsprechenden Signaturen nicht in dieses Schema einordnen.

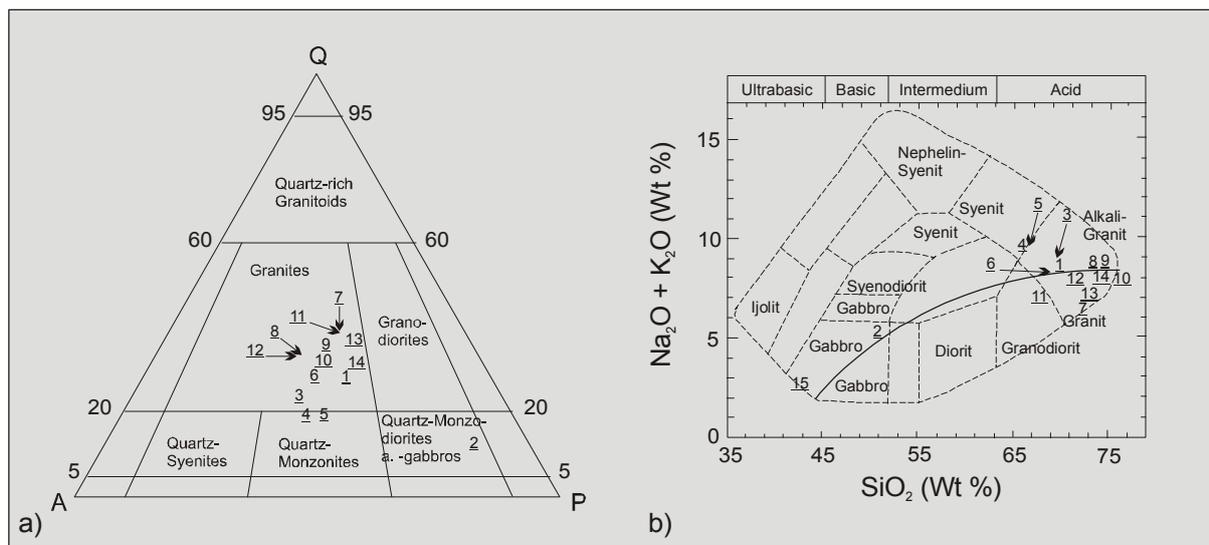


Abb. 4.11: a) Position der Granitoide und Gneise in der Klassifikation plutonischer Gesteine nach Streckeisen (1976). b) Position der Granitoide, Gneise und des Hornblendits im TAS-Diagramm. Die Lithologien lassen sich auf der Basis ihres SiO_2 -Anteils in ultrabasische, basische und saure Varietäten untergliedern. 1. BT-White, 2. BT-Black, 3. BT-Violet, 4. BT-Blue1, 5. BT-Blue2, 6. BN-Pink, 7. SN-Blue, 8. MT-Orange1, 9. MT-Orange2, 10. NB-Orange, 11. MC-Yellow, 12. SP-Grey, 13. PS-Grey, 14. HH-Grey, 15. PTC-Black.

4.2.2 Carbonatgesteine

Die untersuchten Carbonatgesteine sind im Allgemeinen durch sehr ähnliche mineralogische Zusammensetzungen gekennzeichnet, die von Calcit als Hauptgemengteil

dominiert werden. Der Calcitgehalt variiert bis auf eine Ausnahme zwischen 96 und 100 Vol. % (Tab. 4.3), so dass die Einheiten nach Moshhammer & Lobitzer (1998) als reine bis höchst reine Carbonatgesteine ausgewiesen werden können.

Tab. 4.3: Mineralogische Zusammensetzung der Marmore und Kalksteine auf der Grundlage röntgenographischer Analysen (RDA). Angaben in Vol.-%.

	Calcit	Dolomit	Quarz	Hämatit	Tonminerale
Marmore					
PK-Pink	100.0	-	-	-	-
PK-Grey	100.0	-	-	-	-
BTD-White	100.0	-	-	-	-
TS-Grey	96.1	3.7	-	-	-
TS-Pink	96.3	2.4	-	-	-
PC-Red	86.5	0.4	5.7	0.7	6.1
PC-White	99.8	-	0.2	-	-
PC-Grey	97.9	2.0	0.2	-	-
Kalksteine					
MP-Yellow	100.0	-	-	-	-
KH-Red	96.7	0.5	2.5	0.4	-

Bei den höchst reinen Marmoren handelt es sich um die vier Varietäten BTD-White, PK-Pink, PK-Grey sowie um die Varietät PC-White, die neben Calcit noch eine zu vernachlässigende Menge an Quarz in der mineralogischen Zusammensetzung führt. In denjenigen Marmoren, die durch einen geringeren Calcitgehalt gekennzeichnet sind (TS-Grey, TS-Pink, PC-Grey), ergänzen mehrheitlich 2 - 4 Vol.-% Dolomit den Mineralbestand. Die vergleichsweise hohen Gehalte an Dolomit in den Proben TS-Grey und TS-Pink machen sich auch in der chemischen Zusammensetzung bemerkbar, da beide Gesteine mit 0.9 bzw. 1.3 Gew.-% MgO die höchsten Konzentrationen dieser Verbindung aufweisen (Tab. 4.4).

Den wohl größten Unterschied in der Mineralogie zeigt die Probe PC-Red, die eine vergleichsweise hohe Menge an Quarz und Tonmineralen einlagert (Tab. 4.3). Tonminerale treten in der Varietät in Form von Dickit auf, der durch 0.7 Vol.-% Hämatit seine rötliche Farbe erhält. Aufgrund der Abhängigkeit der Daten vom Grad der Breckziierung dieser Varietät handelt es sich bei der hier angegebenen Zusammensetzung lediglich um einen Richtwert, der in anderen Gesteinspartien relativ höhere oder niedrigere Calcit- bzw. Dickitgehalte aufweisen kann.

Die beiden Kalksteine setzen sich aus 100 Vol.-% (MP-Yellow) bzw. aus etwa 97 Vol.-% (KH-Red) Calcit zusammen. Die Dolomitkomponente in dem Gestein KH-Red tritt mit 0.5 Vol.-% kaum in Erscheinung, so dass Quarz und Hämatit den übrigen Mineralbestand repräsentieren. Trotz der sehr niedrigen Dolomitgehalte weist die Probe eine der höchsten MgO Konzentrationen unter den Carbonatgesteinen auf (Tab. 4.4). Der Grund dafür könnte mit der tektonischen Überprägung der Lithologie in Verbindung stehen, da sich MgO

vorzugsweise in der näheren Umgebung von Störungen und Rissen anreichern kann (Bentz & Martini 1968).

Tab. 4.4: Chemische Zusammensetzung der Marmore und Kalksteine auf der Grundlage röntgenographischer Analysen (RFA). Angaben in Gew.-%.

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	H ₂ O	CO ₂	Summe
Marmore													
PK-Pink	<0.1	<0.008	0.1	0.04	0.00	0.34	55.26	<0.1	0.01	0.01	0.43	44.01	100.2
PK-Grey	<0.1	<0.008	0.1	0.03	<0.004	0.11	55.48	<0.1	0.00	0.01	0.34	44.14	100.2
BTD-White	<0.1	<0.008	0.1	<0.2	<0.004	0.13	55.54	<0.1	<0.02	0.01	0.30	44.13	100.2
TS-Grey	<0.1	<0.008	0.1	<0.2	<0.004	1.25	54.02	<0.1	<0.02	0.01	0.24	44.41	100.0
TS-Pink	<0.1	<0.008	0.3	<0.2	<0.004	0.91	54.26	<0.1	0.05	0.03	0.27	44.05	99.9
PC-Red	7.7	<0.008	2.7	0.79	0.01	0.33	48.76	<0.1	<0.02	0.04	0.99	38.54	92.2
PC-White	<0.1	<0.008	0.1	<0.2	<0.004	0.27	55.45	<0.1	<0.02	0.01	0.20	44.28	100.3
PC-Grey	<0.1	<0.008	0.1	<0.2	<0.004	0.86	54.70	<0.1	<0.02	0.05	0.23	44.38	100.3
Kalksteine													
MP-Yellow	<0.1	<0.008	0.2	<0.2	0.01	0.29	55.09	<0.1	<0.02	0.01	0.31	44.08	100.0
KH-Red	3.2	0.05	1.3	<0.2	0.02	1.64	51.33	<0.1	0.09	0.03	0.71	41.37	96.5

4.2.3 Sandsteine

Die Häufigkeit eines bestimmten Minerals in klastischen Sedimenten ist abhängig von dessen Verfügbarkeit im Liefergebiet sowie von der mechanischen und chemischen Stabilität gegenüber dem Einfluss von Verwitterung und Alteration. Quarz gilt im Allgemeinen als eine der stabilsten Phasen unter sedimentären Bedingungen (Tucker 2001). Das Mineral tritt in den vorliegenden Proben mit unterschiedlicher Häufigkeit auf und kann dabei teilweise den Mineralbestand einer Varietät vollkommen dominieren. Basierend auf ihren spezifischen Anteilen an Quarz und Feldspat zeigen die Gesteine S-Brown, S-Yellow, S-White und S-Rainbow die Zusammensetzung von Subarkosen mit Tendenz zu Quarz-Areniten, während sich die Gesteine S-Red und PC-Green als Arkosen nach Pettijohn et al. (1987) und McBride (1963) qualifizieren (Tab. 4.5).

Quarz variiert in der Mineralogie der Subarkosen zwischen 88 bis 94 Vol.-% (Tab. 4.5). In den Gesteinen treten zusätzlich Tonminerale in Form von Kaolinit und Illit auf, die bis zu 12 Vol.-% des Mineralbestandes ausmachen und sowohl auf detritischen Ursprung als auch auf Alteration von Feldspat zurückzuführen sind. Die geringen Unterschiede in dem Quarzgehalt der Proben erklären sich vermutlich durch das gemeinsame Auftreten innerhalb einer stratigraphischen Formation (Phra Wihan Formation) sowie aus der geographische Nähe der Abbaugelände zueinander (vgl. Kap. 3.4.7).

Der Quarzgehalt in den beiden Arkosen beträgt mit 44 bzw. 47 Vol.-% lediglich die Hälfte der in den Subarkosen nachgewiesenen Anteile (Tab. 4.5). Während im Gegensatz zu den Subarkosen keines der Gesteine Kaolinit als Tonkomponente beinhaltet, ist Illit mit Anteilen von 11 bzw. 16 Vol.-% recht deutlich vertreten. Feldspat (nachgewiesen wurden Mikroklin, Oligioklas und Albit) ist mit einer Häufigkeit von 33 bzw. 41 Vol.-% vertreten. Im Rahmen der Feldspatkomponente ist eine deutliche Dominanz von Plagioklas zu erkennen, was recht ungewöhnlich ist (Tucker 2001), da das Mineral im Vergleich zu K-Feldspat eine geringere chemische Stabilität aufweist und damit bereits im Liefergebiet der Verwitterung unterliegen sollte. Darüber hinaus sind es gerade die K-Feldspäte, die übergeordnet in kontinentalen Basamenteinheiten, also im Ausgangsmaterial klastischer Sedimente, auftreten (Tucker 2001). In der Varietät PC-Green sind die Minerale Calcit (2.8 Vol.-%) und Chlorit (4.1 Vol.-%) vertreten, wobei letzteres wohl für die grünliche Färbung des Sandsteins verantwortlich ist. Für beide Minerale können post-sedimentäre bzw. syn-diagenetische Bildungsbedingungen angenommen werden. Gleiches gilt für die geringen Anteile an Hämatit, die mit 1.4 Vol.-% in der roten Varietät S-Red nachgewiesen wurden. Die geochemische Komposition der Gesteine ist zusammenfassend in Tabelle 4.6 dargestellt.

Tab. 4.5: Mineralogische Zusammensetzung der Sandsteine auf der Grundlage röntgenographischer Analysen (RDA). Angaben in Vol.-%.

	Quarz	K-Feldspat	Plagioklas	Kaolinit	Illit	Calcit	Andere
Subarkosen							
S-Brown	93.6	-	-	3.9	2.6	-	-
S-Yellow	91.4	-	-	5.0	3.6	-	-
S-White	87.9	-	-	5.9	6.2	-	-
S-Rainbow	92.4	-	-	3.9	3.7	-	-
Arkosen							
PC-Green	43.5	8.4	25	-	16.1	2.8	4.1 (Chlorit)
S-Red	47.0	5.6	34.9	-	11.2	-	1.4 (Hämatit)

Tab. 4.6: Chemische Zusammensetzung der Sandsteine auf der Grundlage röntgenographischer Analysen (RFA). Angaben in Gew.-%.

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	H ₂ O	CO ₂	Summe
Subarkosen													
S-Brown	92.5	0.47	3.4	1.68	<0.004	0.08	0.08	<0.1	0.30	0.06	1.20	0.05	99.82
S-Yellow	90.3	0.52	5.3	1.26	<0.004	0.10	0.07	<0.1	0.38	0.07	1.65	0.06	99.71
S-White	91.2	0.39	5.6	0.22	<0.004	0.12	0.07	<0.1	0.56	0.04	1.50	0.05	99.75
S-Rainbow	92.5	0.26	4.4	0.59	<0.004	0.08	0.07	<0.1	0.35	0.03	1.26	0.05	99.59
Arkosen													
PC-Green	72.7	0.42	12.4	3.50	0.07	1.67	1.68	3.09	1.78	0.10	1.65	0.85	99.91
S-Red	78.0	0.36	11.5	2.03	0.02	0.51	0.48	4.14	1.46	0.08	1.06	0.04	99.68

4.3 Mikrogefüge

Die untersuchten Gesteine demonstrieren eine große Variabilität hinsichtlich ihrer Mikrogefügeelemente. Es kann jedoch festgestellt werden, dass sich einige Varietäten sehr gleichen und verwandte bzw. ähnliche Gefügemerkmale aufweisen. In Bezug auf Gemeinsamkeiten und Unterschiede soll im Folgenden eine Untergliederung des Probeninventars entsprechend der Hauptgefügemerkmale, hier insbesondere der Textur und des Korngefüges, vorgenommen werden.

4.3.1 Referenzsystem

Eine Grundvoraussetzung für die Ermittlung räumlich orientierter Gefügeelemente und ihre Korrelation mit richtungsabhängigen gesteintechnischen Eigenschaften ist ein geeignetes Referenzsystem, in dem die wesentlichen Gefügeparameter eines Gesteins Berücksichtigung finden. In der vorliegenden Arbeit wurde ein universales Referenzsystem gewählt, das sich auf die makroskopisch sichtbaren Elemente eines Gesteins, hier die Foliation und die Lineation bezieht und das durch drei Richtungsvektoren bzw. Raumachsen (x , y und z) definiert ist. Die Lineation ist in diesem System parallel zur x -Achse ausgerichtet, während die Foliationsfläche von den zwei Achsen x und y als xy -Ebene aufgespannt wird (Abb. 4.12). In einigen Fällen lassen sich bei dem vorliegenden Probenmaterial weder Foliation noch Lineation erkennen, so dass hier das Referenzsystem entsprechend der Probengeometrie gewählt wurde. Alle Polfiguren (Projektion auf die untere Hemisphäre) in dieser Arbeit beziehen sich auf die Orientierung dieses Referenzsystems.

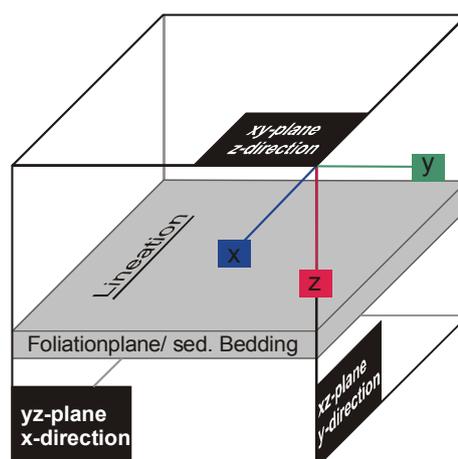


Abb. 4.12: Referenzsystem für die gefügekundliche und gesteintechnische Charakterisierung des Probenmaterials. In diesem Referenzsystem verläuft die Lineation eines Gesteins parallel zur x -Achse. Die Foliationsfläche wird durch die Vektoren x und y aufgespannt und steht senkrecht zur z -Achse.

4.3.2 Granitoide und Gneise

Eine Gliederung der magmatischen Lithologien soll an dieser Stelle über die Zunahme der Anisotropieanteile erfolgen. Hierbei ermöglicht die Ausrichtung der Minerale nach der Kornform eine Klassifikation des Probeninventars entsprechend drei unterschiedlicher Gefügetypen (Abb. 4.13). Eine Übersicht zum weiteren Gefüge- und Strukturinventar der Lithologien ist in Tabelle 4.7 zusammengestellt.

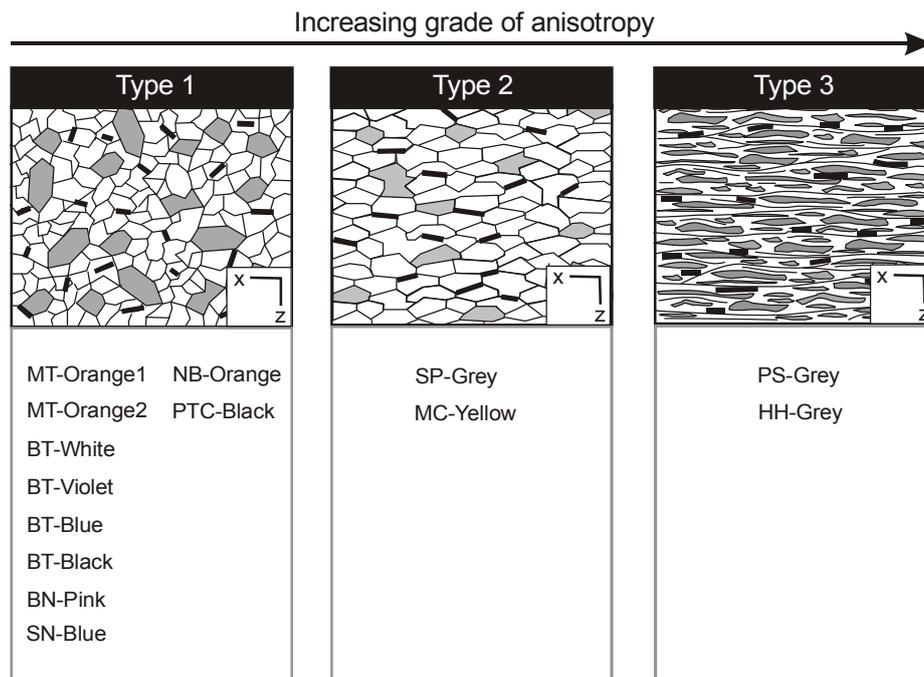


Abb. 4.13: Schematische Darstellung idealisierter Gefügetypen auf der Grundlage zunehmender Anisotropieanteile für die untersuchten Granitoide und Gneise. Gefügetyp 1: Kennzeichnend für Gesteine ohne erkennbare Gefügeanisotropien. Die Minerale zeigen keinerlei Vorzugsrichtungen. Gefügetyp 2: Kennzeichnend für Gesteine mit schwacher bis mittlerer Anisotropie, die sich durch die Einregelung einzelner Mineralkörner definiert. Gefügetyp 3: Kennzeichnend für Gesteine mit ausgeprägten Gefügeanisotropien. Die Gesteine zeigen einen Lagenbau und eine deutliche Ausrichtung der Minerale.

Der Gefügetyp 1 steht für Gesteine mit nahezu isotropem Korngefüge (vgl. Abb. 4.13). Das Gefügemuster gilt als repräsentativ für die Proben aus Tak, Nakhon Sawan und Nakhon Ratchasima, da in keiner der Lithologien eine bevorzugte Ausrichtung der Minerale beobachtet werden kann.

Bei den mafitarmen, equigranularen Gesteinen MT-Orange1 und MT-Orange2 ergibt sich die fehlende Vorzugsorientierung bereits aus dem Habitus der Minerale Quarz und Feldspat, der überwiegend isometrisch ausgebildet ist und daher nahezu gleiche Längen der Kristallachsen aufweist. Obwohl sich viele der übrigen Gesteine aus Tak durch Minerale mit einem ungleichen Längenverhältnis der Kristallachsen, etwa durch leistenförmige Feldspäte, prismatische Amphibole oder plattige Glimmer auszeichnen, kann auch hier keine

Einregelung nach der Kornform erkannt werden. Gleiches gilt für die riesenkörnigen Hornblenden der Probe PTC-Black.

Bei dem Gestein NB-Orange ist die isotrope Ausbildung der Minerale auf eine skelettartige Verwachsung der Minerale Quarz und Feldspat zurückzuführen, die durch ihre ausgesprochen geschwungenen, lobaten Korngrenzen ein granophyrisches Korngefüge definieren (vgl. Anhang II). Das Korngefüge ist dabei derart klar ausgebildet, dass sich die filigranen Strukturen sogar makroskopisch noch deutlich abzeichnen. In vielen Fällen kann mikroskopisch die simultane Auslöschung vereinzelter Quarzkristalle beobachtet werden, so dass davon auszugehen ist, dass einige individuell erscheinende Quarze auf die Bildung größerer Einzelkörner zurückgehen. Nach Fenn (1986) ist die Bildung granophyrischer Strukturen in einer zeitgleichen Kristallisation der Mineralphasen begründet, wobei die Einflussfaktoren den spezifischen Wachstums- und Diffusionsraten der magmatischen Schmelze zuzuschreiben sind. Lentz & Fowler (1992) nehmen an, dass eine langsame Diffusion von Al^{3+} in Richtung wachsender Feldspäte zu einer Anreicherung von Si^{4+} in der Schmelze führt, was letztlich eine lokale Sättigung mit Quarz hervorruft. Bei der Kristallisation von Quarz wird die Schmelze erneut mit Al^{3+} gesättigt, was wiederum Feldspatkristallisation und damit ein rhythmisches Ausscheiden beider Mineralphasen hervorruft.

Die Gesteine der Region Tak zeichnen sich durch Mikrostrukturen aus, die mit unterschiedlicher Intensität eine bruchhafte, untergeordnet auch eine duktile Verformung der Lithologien andeuten. Eine Ausnahme bildet dabei der Monzodiorit BT-Black, der im Gegensatz zu den übrigen Granitoiden keine nennenswerten Deformationsmuster aufweist.

Durch das Auftreten von Rissgefügen, die in Plagioklasen als submagmatische Rissbildungen interpretiert werden können, lässt sich für die entsprechenden Tak Granitoide bereits eine sehr leichte syn-genetische Deformation während der Platznahme feststellen. Submagmatische Rissbildungen können sich entwickeln, wenn lediglich ein geringer Anteil an Schmelze in der Magmakammer verbleibt und die Minerale bereits mehrheitlich auskristallisiert sind. In diesem Stadium kommt es entlang feiner Bruchstrukturen zur Kristallisation von Mineralen der Restschmelze, was bei mehreren Tak Graniten, beispielsweise BT-Blue und BT-Violet, durch die Bildung von Quarz und polygonalen Plagioklas-Aggregaten belegt ist. Da die Rissgefüge in ihrer Mehrheit vollständig verheilt sind, ist anzunehmen, dass sich die Strukturen nur untergeordnet auf die mechanischen Eigenschaften der Lithologien durchpausen werden.

Die Einheiten aus Tak kennzeichnen jedoch auch post-genetische Verformungen von schwacher bis mittlerer Intensität. Die Strukturen sind überwiegend in einer spröden Überprägung einzelner Minerale dokumentiert und beinhalten u. a. die Ausbildung von Rissystemen in Quarz (Abb. 4.14a). Rissysteme in Quarz sind in nahezu allen Varietäten mehr oder weniger intensiv entwickelt, treten jedoch besonders deutlich bei den orangen Granitoiden MT-Orange1 und MT-Orange2 sowie bei dem Granit BT-Blue in Erscheinung, wo sie ausgesprochen schlecht verheilt sind und dementsprechend kritische Schwachstellen im Mineralverband darstellen. Gleiches gilt für die Anlegung von Knickfalten in Feldspäten der Varietät BT-Blue (Abb. 4.14b). Entlang der Faltenachse können bei mechanischer Beanspruchung Risse initiiert werden, entlang derer schließlich ein Versatz der

Faltenschenkel einsetzen kann. Es ist davon auszugehen, dass diese Strukturen einen weitaus größeren Einfluss auf das gesteintechnische Verhalten der Varietäten haben dürften, als beispielsweise submagmatische Rissbildungen.

Jede quarzführende Lithologie des Gefügetypes 1, also alle Gesteine mit Ausnahme des Hornblendits PTC-Black, zeigt eine undulöse Auslöschung der Mineralphase. In den Varietäten MT-Orange1, MT-Orange2, BT-White und BT-Violet ist darüber hinaus eine schachbrettartige Auslöschung der Quarze entwickelt (Abb. 4.14c), die im Vergleich zu undulöser Auslöschung eine stärkere Überprägung der Gesteine signalisiert. Diese Überprägung ist bei den Varietäten MT-Orange1 und MT-Orange2 zudem durch Migrationsprozesse entlang der monophasen Quarzkontakte belegt (Abb. 4.14d). In vielen der Varietäten ist die beginnende Ausbildung von Myrmekiten dokumentiert. Die Strukturen sind als äußerst kleine Verwachsungen von Plagioklas und Quarz zu erkennen, wobei Quarz tropfenförmige, manchmal verzweigte Körper im Feldspat bildet.

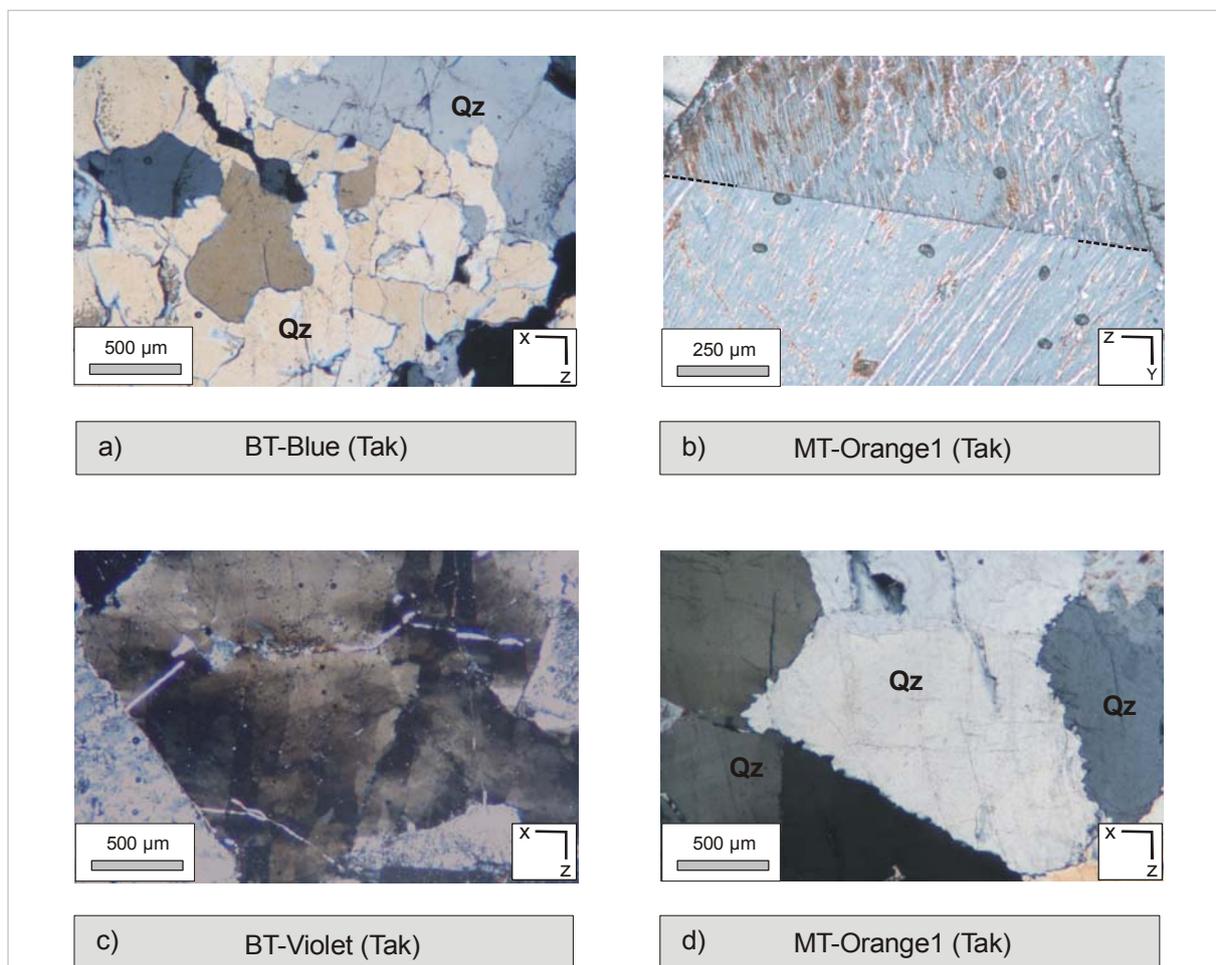


Abb. 4.14: Deformationsmuster der Proben mit nahezu isotropen Korngefügen. a) Inter- und transgranulare Risse in Quarz aufgrund spröden Materialverhaltens während sehr schwacher tektonischer Überprägung. b) Knickfalten in Feldspat, der bei sehr schwacher Deformation ebenfalls mit bruchhafter Verformung reagiert. Die Faltenachse ist an den jeweiligen Enden durch gestrichelte Linien gekennzeichnet. c) So genannte Schachbrettmuster in Quarz, die auf eine zunehmende Intensität der Verformung deuten. d) Migrationsprozesse in Form von so genanntem „Bulging“. Die Strukturen treten entlang monophaser Kontaktflächen auf und ergeben sich dort aus einer unterschiedlichen Dichte von Fehlstellen im Kristallgitter der benachbarten Quarzkörner. Die hier dargestellte Ausbildung kennzeichnet den Beginn der Migrationsprozesse und ist in ihrer Intensität im Vergleich zu anderen Lithologien des Tak Batholithen als relativ schwach einzustufen.

Der Gefügetyp 2 grenzt sich gegenüber dem Gefügetyp 1 durch zunehmende Anisotropieanteile ab (vgl. Abb. 4.13) und ist charakteristisch für die beiden porphyrischen, leicht texturierten Gesteine SP-Grey und MC-Yellow. Das Richtungsgefüge der zwei Varietäten wird jeweils durch eine Foliation bestimmt, bei der einzelne, individuelle Minerale nach der Kornform eingeregelt sind („continuous foliation“ nach Powell 1979, Borradaile et al. 1982). In beiden Varietäten zählen zu diesen Mineralen die plattig ausgebildeten Biotite, die mit ihren parallel zueinander angeordneten (001)-Basisflächen die Foliation aufbauen. In unterschiedlichem Ausmaß treten auch Feldspäte als foliationsbildende Minerale auf. Während die länglichen Körner in der Varietät MC-Yellow sowohl als Matrixkomponente als auch als Porphyroklasten eine bevorzugte Orientierung aufweisen, zeigen in der Varietät SP-Grey lediglich die Porphyroklasten eine eindeutige Richtungsabhängigkeit.

Das Gefüge der schwach texturierten Varietät SP-Grey ist zudem durch eine Vielzahl feinkörniger Quarzkristalle definiert, die vereinzelt zwischen größeren Mineralen arrangiert oder in diese als Sekundärmineralisationen eingewachsen sind. Die Beziehung zu den größeren, überwiegend stark suturierten Altkörnern sowie die Ausbildung polygonaler Korngrenzen mit Kristallgrenzen im Winkel um 120° deuten dabei auf eine statische Rekristallisation der Mineralphase (Abb. 4.15a), die im Allgemeinen im Anschluss an ein Deformationsereignis auftritt (siehe Vernon 2004). Ähnliche Mineralneubildungen definieren das Korngefüge der Varietät MC-Yellow, wobei die Rekristallite hier wesentlich gleichkörniger ausgebildet sind und in Form zusammenhängender, parallel ausgerichteter Bänder zwischen größeren Quarzkristallen vorliegen (Abb. 4.15b). Die teilweise gestreckte Ausbildung der feinkörnigen Quarze und die Orientierung der Minerale parallel zur Foliation könnten bereits auf eine dynamische Rekristallisation der Varietät während eines synkinematischen Zeitpunkts verweisen (siehe Vernon 2004).

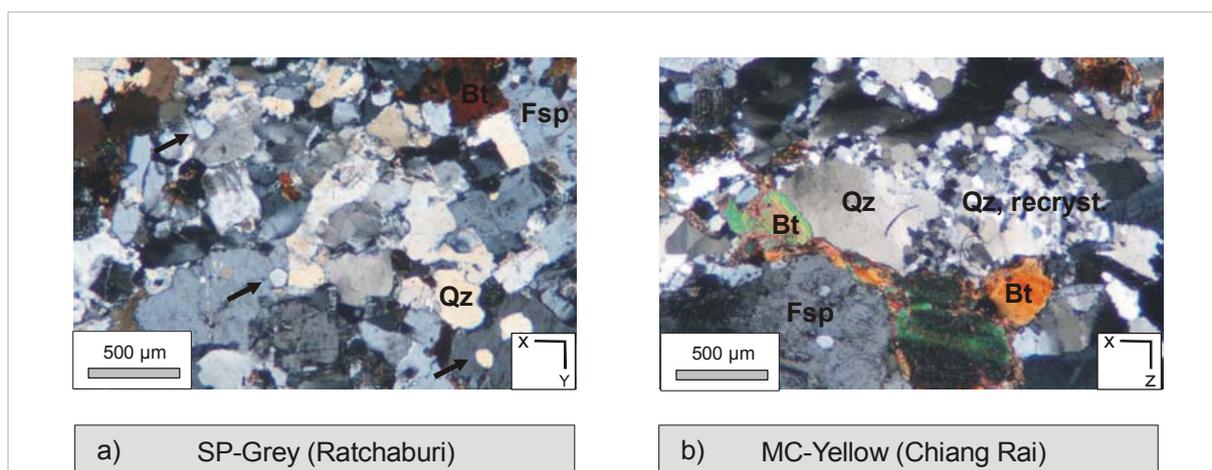


Abb. 4.15: Durch Rekristallisation gekennzeichnete Korngefüge der zunehmend anisotropen Varietäten. a) Statische Rekristallisation mit polygonalen Quarzkörnern in dem Gestein. b) Dynamische Rekristallisation mit neugebildeten Quarzanteilen in Form kohärenter Kornaggregate, die oftmals als Bänder die Foliation nachzeichnen.

Der Gefügetyp 3 zeigt die höchsten Anisotropieanteile (vgl. Abb. 4.13) und ist demnach kennzeichnend für die texturierten bzw. stark texturierten Gneise PS-Grey und HH-Grey (Abb. 4.16a, b). Die beiden Gesteine zeigen ebenfalls eine deutlich ausgebildete Foliation, die im Gegensatz zu den vorstehend genannten Varietäten SP-Grey und MC-Yellow nicht durch einzelne Minerale, sondern durch alternierende Lagen aufgebaut wird („spaced foliation“ nach Powell 1979, Borradaile et al. 1982). Auffallend ist in diesem Zusammenhang, dass die Foliation des Gesteins PS-Grey durch zwei Vorzugsorientierungen gekennzeichnet ist. Die durchgehenden Quarz-Feldspat-Biotit-Lagen werden von feineren Biotit-Lagen im Winkel von 120° gekreuzt („conjugate foliation“ nach Powell 1979, Borradaile et al. 1982) (Abb. 4.16a).

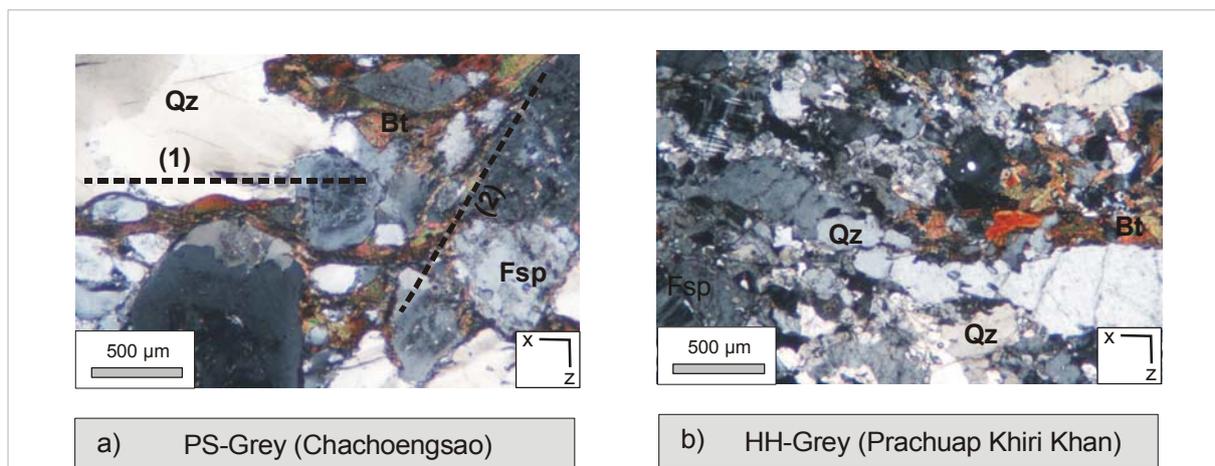


Abb. 4.16: Korngefüge der deutlich anisotropen Varietäten. a) Probe PS-Grey mit zwei unterschiedlichen Vorzugsrichtungen (gestrichelte Linien), die sich im Winkel von 120° schneiden. Während eine Richtung (1) durch alternierende Lagen von Quarz-Feldspat-Aggregaten und Biotiten definiert wird, ist die andere Richtung (2) lediglich anhand eingeregelter Biotite nachzuvollziehen. Biotite schmiegen in beiden Richtungen an die Grenzflächen der benachbarten Kristalle. b) Probe HH-Grey mit gestreckten Quarzkörnern parallel zur x-Richtung. An die größeren Quarzkristalle grenzen vielfach kleinere rekristallisierte Körner.

Wie der foliierte Granit MC-Yellow zeigt auch der Gneis PS-Grey mit ausgelenkten Quarzneubildungen Anzeichen einer dynamischen Rekristallisation (Abb. 4.17). Während des Deformationsprozesses konnten sich bei dem Gestein neokristalline Quarze entwickeln, die vollständig um Feldspäte „fließen“ und die mechanisch schwächere Phase ummanteln. Die gleichen „Fließstrukturen“ zeigen in dem Gestein aber auch deformierte Biotite, die sich ebenfalls an Kristallgrenzen schmiegen (Abb. 4.16a) und hierbei Einzelkörner oder polymineralische Aggregate vollständig umhüllen können.

Die Rekristallisation der Quarzphase belegt in diesem Zusammenhang, dass die texturierten Gesteine der Gefügetypen 2 und 3 relativ hochgradigen Deformationsprozessen unterlagen und weitaus stärker überprägt sind als die Lithologien des Tak Batholithen (Gefügetyp 1). Im Gegensatz zu den Granitoiden der Region Tak, die überwiegend bruchhafte Verformungen anzeigen, sind die Varietäten des Gefügetyps 2 und 3 durch duktile Deformationen charakterisiert, die aufgrund des eher plastischen Materialverhaltens auch deutlich weniger Rissysteme zulassen.

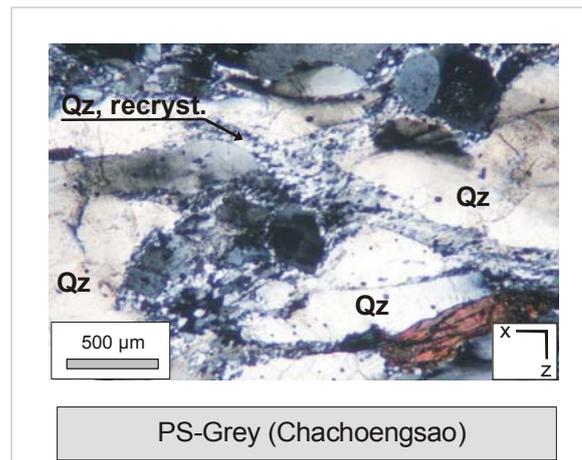


Abb. 4.17: Feinstkörnige, gestreckte Quarz-Rekristallite als Indikation für eine dynamische Rekristallisation des Gesteins PS-Grey. Die feinstkörnigen Phasen können dabei vollständig größere Minerale wie beispielsweise Feldspäte ummanteln.

Tab. 4.7: Struktur- und Gefügemerkmale der beprobten Granitoide und Gneise. Abkürzungen: Porphy. = Porphyroklasten, Qz. = Quarz, Fspt. = Feldspat, Plag. = Plagioklas, GBMR = Grain Boundary Migration Rekristallisation.

	Korngröße [mm]		Foliation	Hauptdeformationsmuster
	Matrix	Porphy.		
Granitoide				
BT-White	3-4	-	nicht erkennbar	Schachbrettmuster in Qz, Myrmekite, Bulging
BT-Black	1-5	-	nicht erkennbar	Undulöse Auslöschung in Qz
BT-Violet	1-5 (20)	-	nicht erkennbar	Schachbrettmuster in Qz, intragranulare Risse
BT-Blue	2-5 (30)	-	nicht erkennbar	Undulöse Auslöschung in Qz, Knickfalten in Fspt., Myrmekite, inter-, intra- und transgranulare Risse
BN-Pink	1-5 (15-30)	-	nicht erkennbar	Schachbrettmuster in Qz; inter-, trans- und intragranulare Risse, teilweise netzartig aufgesprengt
SN-Blue	5 (40)	-	nicht erkennbar	Undulöse Auslöschung und Deformationslamellen in Qz, duktil verformte Plag.-lamellen, intragranulare Risse
MT-Orange1	5	-	nicht erkennbar	Schachbrettmuster in Qz; Bulging; inter-, intra- und transgranulare Risse, Knickfalten in Fspt.
MT-Orange2	5	-	nicht erkennbar	Schachbrettmuster in Qz; Bulging; inter-, intra- und transgranulare Risse, Knickfalten in Fspt.
NB-Orange	1-2	-	nicht erkennbar	-
MC-Yellow	2-4	120	in Form orientierter Einzelkörner	Rekristallisierte Qz, GBMR, Bulging, Myrmekite
SP-Grey	2-10 (20)	120	in Form orientierter Einzelkörner	Rekristallisierte Qz, Myrmekite; Bulging
Gneise				
PS-Grey	5-10	-	in Form engständiger Bänderung	Rekristallisierte Qz, Deformationlamellen in Qz, Myrmekite
HH-Grey	3-5	-	in Form engständiger Bänderung	Rekristallisierte Qz; Schachbrettmuster in Qz; Myrmekite; 2 Rissgenerationen, von denen die ältere intensiver ausgebildet und entlang der jüngeren versetzt
Hornblendit				
PTC-Black	3-20 (700)	-	nicht erkennbar	-

4.3.3 Carbonatgesteine

4.3.3.1 Marmore

Eine Gliederung der metamorphen Carbonatgesteine kann über die Einteilung in verschiedene Korngefügetypen vorgenommen werden. Hinsichtlich der Kornform, dem Korngrenzengefüge sowie der Korngrößenverteilung lassen sich die Mikrogefüge der Marmore in die in Abbildung 4.18 schematisch dargestellten Gefügetypen einteilen. Weitere Struktur- und Gefügemerkmale der Gesteine sind in Tab. 4.8 zusammengefasst.

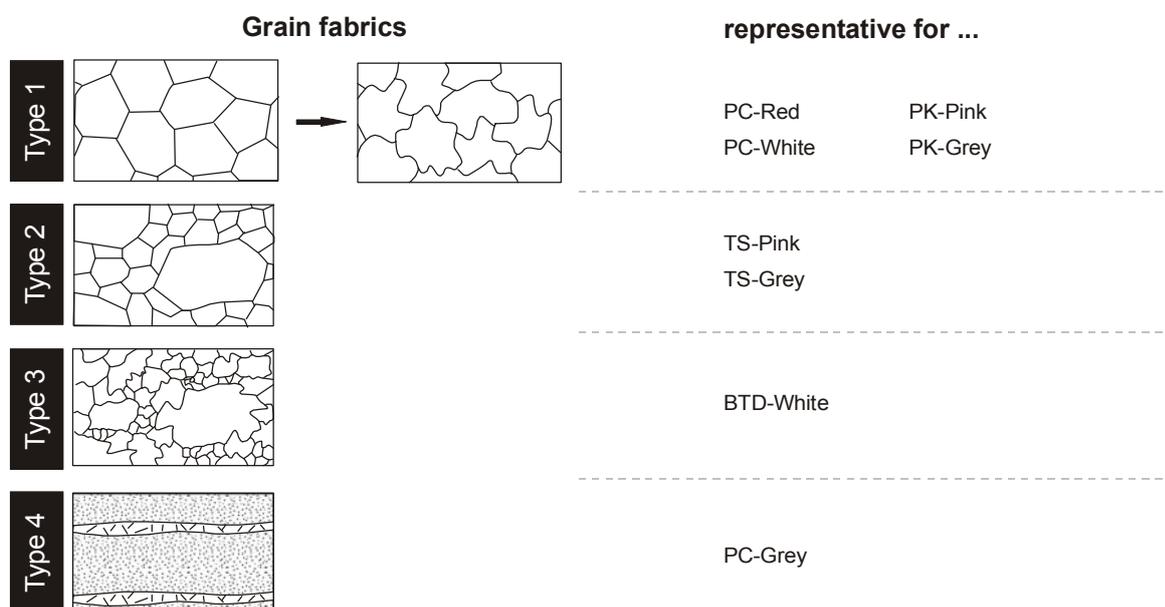


Abb. 4.18: Schematische Darstellung idealisierter Korngefügetypen für die untersuchten Marmore.

Der Gefügetyp 1 beinhaltet equigranulare Gesteine mit polygonalen Korngrenzen (vgl. Abb. 4.18). Am deutlichsten ist dieses Gefüge bei den kataklastisch überprägten Varietäten PC-Red und PC-White aus Nakhon Ratchasima ausgebildet, die im mikroskopischen Skalenbereich ein granoblastisches Gefüge infolge statisch rekristallisierter Calcitkörner aufweisen (Abb. 4.19a). Die Kornaggregate in beiden Lithologien weisen einen mittleren Korndurchmesser von etwa 400 μm auf und zeichnen sich infolge der vollständig equilibrierten Korngrenzen durch sehr gerade und geschlossene Kontaktflächen aus. Die Ausbildung der Kristallgrenzen ist auf einen Erholungsprozess zurückzuführen, in dessen Rahmen es zu einer Reduktion der Korngrenzenflächen kam (Paschier & Trouw 1996). Lokal zeigt der Mineralbestand erhebliche Variationen in der Kristallgröße von wenigen Mikrometern bis 1 mm. In diesen heterogenen Bereichen liegt eine geringere Anzahl geschlossener Korngrenzen vor, da die Mehrheit des Mineralbestands leicht alteriert und durch suturierte Kontakte geprägt ist. Bei stärker suturierten Körnern sind darüber hinaus Poren mit einer Größe bis zu 300 μm an den Triple-Punkten einiger Korngrenzen entwickelt.

Die Körner kennzeichnet ein deutlicher Anteil intragranularer Risse, die mit dem Auftreten opaker Minerale vergesellschaftet sind.

Die Marmore PK-Pink und PK-Grey aus Kamphaeng Phet können demselben Gefügetyp zugeordnet werden (vgl. Abb. 4.18), da auch hier equigranulare Körner das Mikrogefüge dominieren. Trotz der gleichkörnigen Ausbildung der Minerale zeigen die Gesteine jedoch wesentliche Unterschiede zu den oben angeführten Marmoren. So liegen in der Varietät PK-Pink mehrheitlich stärker verzahnte Korngrenzen vor, die ein vollständig equilibriertes Korngrenzengefüge mit linear verlaufenden Kornrändern nur noch untergeordnet erkennen lassen. Im Fall der Varietät PK-Grey sind die Kontakte lokal durch Ansätze interlobater Strukturen gekennzeichnet und zudem stärker suturiert. Weitere Unterschiede belegt die Orientierung der Calcit-Kristalle, die in den Varietäten PC-Red und PC-White mikroskopisch keine Vorzugsorientierung erkennen lassen, in den Varietäten PK-Pink und PK-Grey jedoch parallel zur xy-Ebene eingeregelt sind. Durch die Einregelung definieren die Kornaggregate ein lepidoblastisches Mikrogefüge. Beide Varietäten aus Kamphaeng Phet sind darüber hinaus durch wesentlich feinere mittlere Korngrößen gekennzeichnet, die mit etwa 80 bis 100 μm eher denen der Marmorvarietäten TS-Pink und TS-Grey aus Sukhothai gleichen.

Obwohl bei den Gesteinen TS-Pink und TS-Grey ebenfalls eine gerade Ausbildung der Korngrenzen zu erkennen ist (Abb. 4.19b), müssen die Lithologien aufgrund ihrer ungleichmäßigen Korngrößenverteilung dem inequigranular polygonalen Gefügetyp 2 zugeordnet werden (vgl. Abb. 4.17). Die unterschiedliche Korngrößenverteilung ist dabei weniger auf individuelle Einzelkörner im Mineralbestand, sondern auf die Abgrenzung von zwei verschiedenartigen Gefügebereichen zurückzuführen. Dies ist zum einen eine feinkörnige homogene Matrix, in der orientierte Calcitkristalle parallel zur xy-Ebene auftreten. Zum anderen sind dies netzartig gespannte Adern, die in Abständen von wenigen Millimetern erscheinen und vollständig mit etwas größerem Calcit in der Größenordnung um 100 bis 120 μm mineralisiert sind. Der Übergang dieser Partien zu der feinerkörnigen Matrix ist graduell entwickelt, so dass bei einer hohen Rissdichte die Unterscheidung zwischen primären und sekundären Mineralbestand kaum noch möglich ist. Die durchschnittlich 400 μm breiten Adern sind durch zwei unterschiedliche Richtungen gekennzeichnet, die senkrecht zueinander und diagonal zur Foliation des Gesteins ausgerichtet sind.

Das Mikrogefüge der weißen Varietät BTD-White ist durch eine ungleichkörnige, seriate Korngrößenverteilung gekennzeichnet. Der Marmor repräsentiert damit ein individuelles Gefügemuster (Gefügetyp 3), das sich deutlich von den übrigen Varietäten abhebt (vgl. Abb. 4.18). Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal ist die wesentlich geringere mittlere Korngröße von etwa 40 μm . Der Marmor erscheint im makroskopischen und mikroskopischen Skalenbereich durchaus grobkörniger, doch wird die mittlere Korngröße durch die hohe Anzahl kleinerer Körner (Abb. 4.19c) signifikant herabgesetzt. Die Korngrenzengeometrie ist stark buchtig bis verzahnt, was insbesondere für den Bestand der etwa 100 bis 125 μm großen Altkörner gilt. Daraus resultiert ein interlobates Kornaggregat, das auf Korngrenzenmigration als bedeutenden gefügeprägenden Deformationsprozess hinweist. Während die Kornform der Neukörner keine dominante Orientierung erkennen lässt, sind die größeren Altkörner parallel zur xy-Ebene ausgerichtet.

Im Gegensatz zu den vorstehend angeführten metamorphen Carbonatgesteinen zeigt die grau gebänderte Varietät PC-Grey sowohl metamorphe als auch sedimentäre Strukturen (Gefügetyp 4, vgl. Abb. 4.18). Mit der Lithologie liegt somit ein Bindeglied zwischen Marmoren und Kalksteinen vor. Als ein deutliches sedimentäres Merkmal können die lokal auftretenden, vollständig mit Calcit ausgekleideten Fossilreste gewertet werden, die in eine feinstkörnige Grundmasse eingebettet sind. Metamorphe Gefügemerkmale treten häufig in Form von grobkörnigeren Lagen hervor, die sich aus rekristallisierten, bis zu 100 μm großen Calcitkörnern zusammensetzen (Abb. 4.19d). Die Lagen sind selten durchgehend ausgebildet und erstrecken sich mehrheitlich nur über wenige Millimeter. Die rekristallisierten Partien sind makroskopisch als dunkel graue Strukturen im Dekor des Gesteins erkennbar und zeichnen vermutlich einen Teil der ursprünglichen sedimentären Schichtung nach. An vielen dieser Abschnitte lassen sich im mikroskopischen Skalenbereich duktile Deformationen des Gesteins nachvollziehen, da die neu gebildeten Aggregate regelmäßig durch horizontale Scherungen verformt sind.

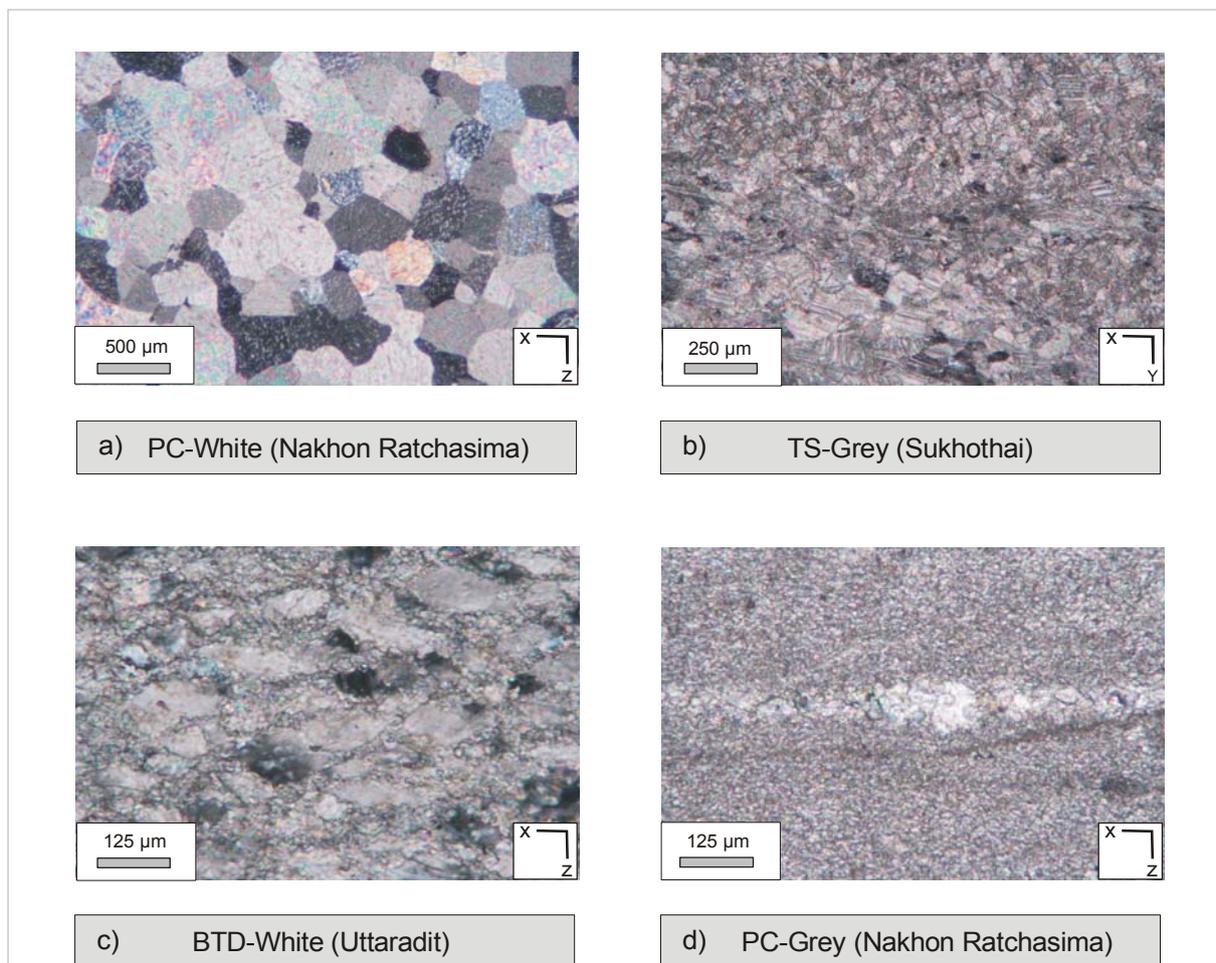


Abb. 4.19: Verschiedene Gefügetypen der untersuchten Marmore. a) Gefügetyp 1 mit equigranularer Korngrößenverteilung und polygonaler Korngrenzengeometrie. b) Gefügetyp 2 mit inequigranularen Kristallen und polygonalen Kontaktflächen. c) Gefügetyp 3 mit seriater Korngrößenverteilung und interlobaten Korngrenzen. d) Gefügetyp 4 als Übergangsform zwischen Marmoren und Kalksteinen. Kennzeichnend sind die rekristallisierten Lagen, die parallel ausgerichtet und von einer feinstkörnigen Matrix umgeben sind.

Da sich die Orientierung der Calcitkristalle auf verschiedene gesteintechnische Eigenschaften der Marmore, insbesondere auf deren thermisches Dehnungsverhalten auswirken können, wurden an den Marmoren des Probenmaterials Texturmessungen vorgenommen, die das räumliche Verteilungsmuster der kristallographischen Achsen charakterisieren sollen. Die Quantifizierung der Gesamttextur erfolgte mittels Neutronentexturanalyse, da Neutronen das gesamte Probenvolumen durchdringen und somit auch in grobkörnigeren Naturwerkstoffen mit Korngrößen $>100\ \mu\text{m}$ eine statistisch ausgewogene Texturanalyse ermöglichen (siehe Leiss & Ullemeyer 1999). Texturmessungen sind eine äußerst hilfreiche Voraussetzung für die Modellierung anisotroper physikalischer Gesteinseigenschaften und erlauben eine erste Prognose des Materialverhaltens unter ausschließlicher Betrachtung des intrinsischen Gefügeanteils. Ausgewertet wurden die Basisfläche (006), die a-Achse $\langle 110 \rangle$, die Spalthomboederfläche $\{104\}$ und die Zwillingsfläche $\{012\}$ der Calcitkristalle (Abb. 4.20).

Die Texturmessungen zeigen, dass die Marmore insgesamt eine deutliche Orientierung der kristallographischen Achsen aufweisen. Die c-Achsen sind überwiegend (sub-)parallel zur z-Richtung angeordnet und demonstrieren mehrheitlich ein einfaches Polpunktmaximum. Mit Ausnahme der Probe PC-White zeigen alle Gesteine mit dieser Verteilung der Achsen eine makroskopisch deutlich erkennbare Foliation, die in der x- und y-Richtung aufgespannt wird. Die c-Achsen in diesen Gesteinen sind damit senkrecht zur Foliation, also parallel zur z-Richtung ausgerichtet. Die Verteilung der c-Achsen in der Probe PC-White ist ebenfalls einfach ausgebildet. Die Achsen sind dabei jedoch nicht parallel zur z-Richtung angeordnet, was sich vermutlich aus dem Umstand ergibt, dass das Gestein makroskopisch keinerlei erkennbare Vorzugsorientierungen aufweist. Die Probenahme konnte daher nicht unter vollständiger Berücksichtigung des externen Referenzsystems erfolgen. Das Doppelmaximum der c-Achsen bei der Probe TS-Grey ist eventuell auf tektonische Bewegungen zurückzuführen (siehe dazu auch Leiss & Ullemeyer 1999), da die Lagerstätte lokal durch eine intensiv ausgeprägte Scherzone beeinflusst wird.

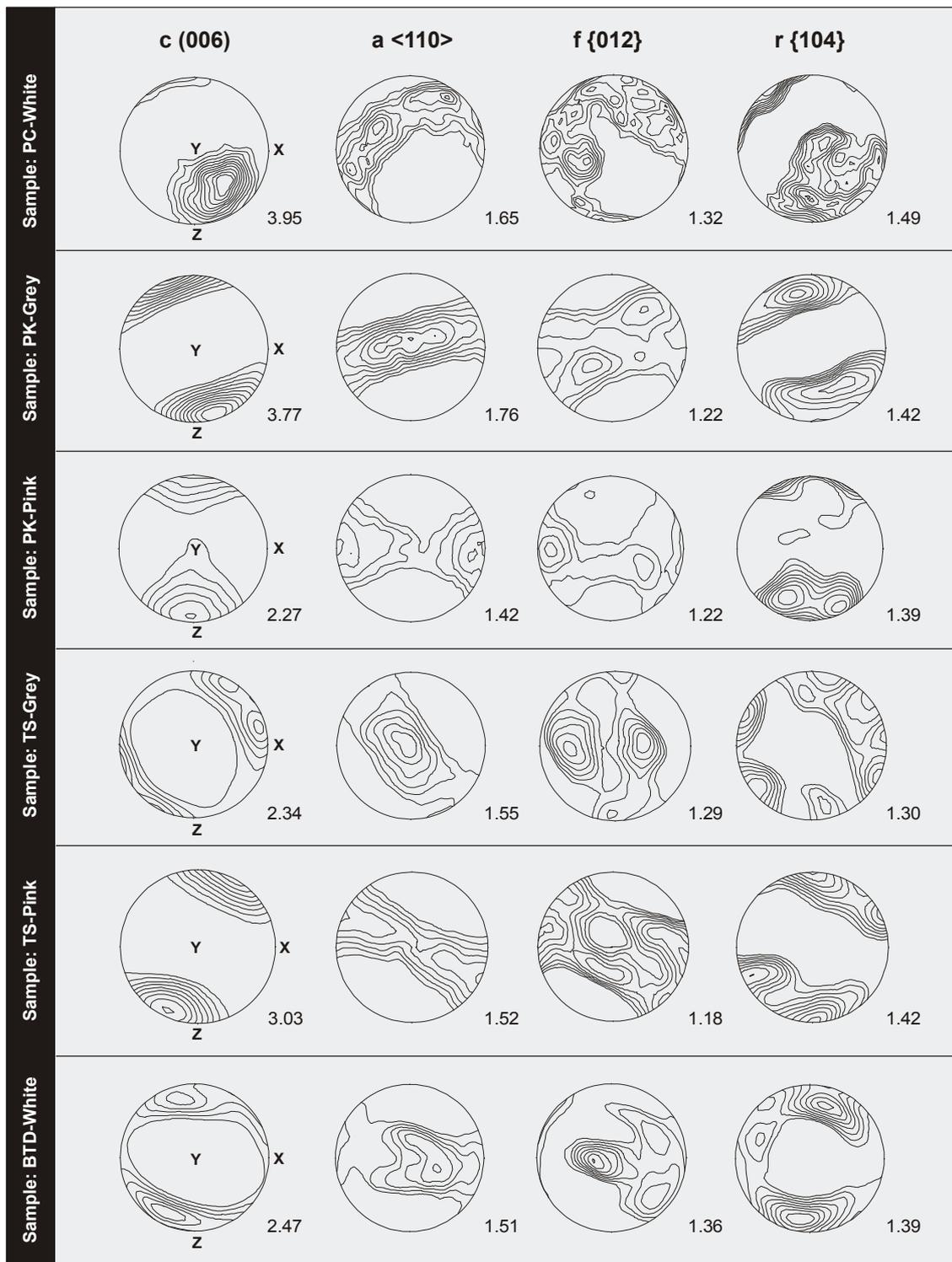


Abb. 4.20: Polpunktdarstellungen der Texturmessungen und deren Intensität für die untersuchten Marmore. Die Messungen wurden am Texturdiffraktometer SV7 des Instituts für Festkörperforschung, Forschungszentrum Jülich (Deutschland), durchgeführt. Anwendung fanden dabei zylindrische Proben in den Dimensionen 30 x 30 mm. Zum methodischen Hintergrund der quantitativen Texturanalyse sei an dieser Stelle auf Autoren wie beispielsweise Wenk et al. (1987), Ullemeyer et al. (1988) oder Leiss & Ullemeyer (1999) verwiesen. Weitere Erläuterungen zur Abbildung im Text dieses Kapitels.

4.3.3.2 Kalksteine

Eine Typisierung der beiden Kalksteine KH-Red und MP-Yellow soll im Folgenden über den relativen Anteil der Hauptbestandteile vorgenommen werden. Nach Folk (1959, 1962) bestehen Carbonatgesteine aus Komponenten bzw. Partikeln, aus Mikrit oder Sparit sowie untergeordnet aus Biolithit (Abb. 4.21). Gemäß dieser Einteilung lassen sich die zwei Proben unter Berücksichtigung ihrer relativen Anteile an Komponenten und dem relativen Anteil von Mikrit und Sparit am Gesamtgestein als „Packed biomicrite“ (KH-Red) und „Micrite“ (MP-Yellow) ausweisen (vgl. Abb. 4.21).

Over 2/3 time mud matrix					Subequal spar & mud matrix	Over 2/3 time spar matrix			
% allochems	0 - 1 %	1 - 10 %	10 - 50 %	Over 50 %		Sorting poor	Sorting good	Rounded & abraded	Devoid of allochems
Fossils	Micrite	Fossiliferous micrite	Sparse biomicrite	Packed biomicrite	Poorly washed biosparite	Unsorted biosparite	Sorted biosparite	Rounded biosparite	Sparite
	Micrite		Biomicrite		Biosparite				
Intraclasts	Micrite	Intraclast-bearing micrite	Intramicroite		Intrasparite				
		Oolite-bearing micrite	Oomicrite		Oosparite				
Pelletiferous micrite		Pelmicrite		Pelsparite					

Abb. 4.21: Klassifikationsschema für karbonatische Gesteine nach Folk (1959, 1962) und Anstey & Chase (1974). Die Komponenten (so genannte Allochemie) sind dabei in vier Gruppen eingeteilt: Fossilien, Intraclaste, Ooide und Pelloide. Die beiden Kalksteine KH-Red und MP-Yellow qualifizieren sich anhand ihrer Komponenten- und Mikritanteile als „Packed Biomicrite“ bzw. „Micrite“.

Die Klassifikation der Probe KH-Red als „Packed biomicrite“ ergibt sich aus dem extrem hohen Anteil an Fossilien, der lokal bis zu 80% des Gesamtgesteins beträgt sowie aus der mikritischen Grundmasse, in die diese Fossilien eingebettet sind (Abb. 4.22a). Auffallend ist der ausgesprochen gute Zustand der Bioklasten, die in vielen Fällen vollständig erhalten sind und in einer Größe von bis zu mehreren Zentimetern vorliegen können (Tab. 4.8). Die Hohlräume der Komponenten sind gänzlich mit Calcit mineralisiert, so dass primäre Poren wie etwa Fossilkammern oder sekundäre Poren wie etwa Partikellösungsporen (vgl. Dunham 1962, Füchtbauer 1988) nicht erkannt werden konnten. Die Einteilung der Probe MP-Yellow als „Micrite“ ergibt sich aus der Abstinenz von fossilen Überresten und aus der vollkommen

mikritischen Grundmasse des Gesteins, die allerdings mit sparitisch gefüllten Rissen durchsetzt ist (Abb. 4.22b).

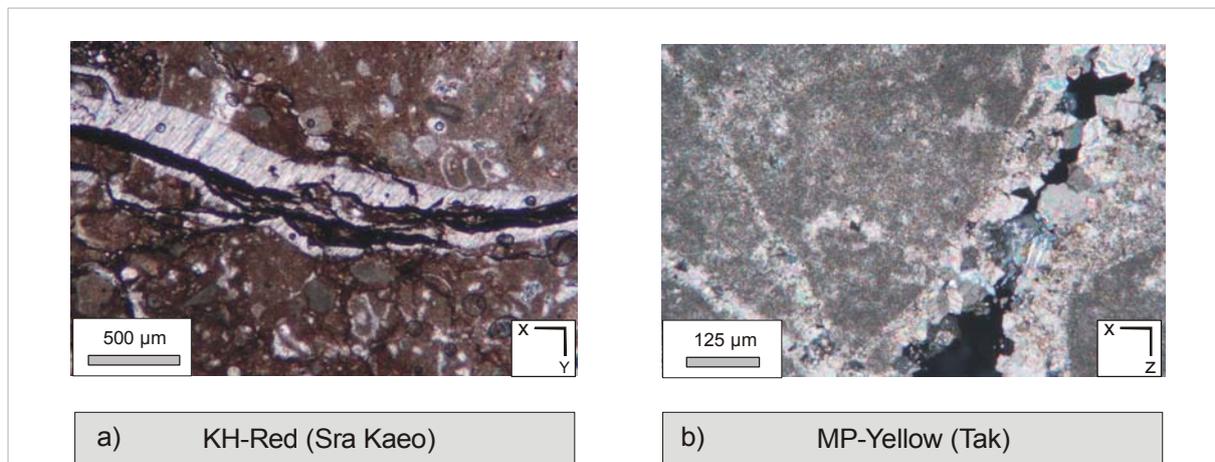


Abb. 4.22: Risse und Stylolithen in den Proben KH-Red und MP-Yellow. a) Mit faserigen Calcitkristallen und mikritischen Kalkpartikeln versiegelter Riss der Probe KH-Red. b) Mit sparitischem Calcit mineralisierte, teilweise offene Risse der Probe MP-Yellow.

Tab. 4.8: Wesentliche Struktur- und Gefügemerkmale der beprobten Marmore und Kalksteine. Abkürzungen: Def. phase = Deformationsphase.

	Korngröße		Foliation/ Schichtung	Art der Deformation
	Matrix [µm]	Bioklasten [mm]		
Marmore				
PK-Pink	80-100	-	deutlich in Form schlierenartiger Bänderung	duktil
PK-Grey	80-100	-	deutlich in Form schlierenartiger Bänderung	duktil
BTD-White	40	-	deutlich	nicht erkennbar
TS-Grey	80-100	-	deutlich in Form engständiger Bänderung	1. Def. phase duktil 2. Def. phase spröde
TS-Pink	80-100	-	deutlich in Form engständiger Bänderung	1. Def. phase duktil 2. Def. phase spröde
PC-Red	400	-	nicht erkennbar	spröde/ kataklastisch
PC-White	400	-	nicht erkennbar	spröde
PC-Grey	mikritisch	1	deutlich in Form engständiger Bänderung	duktil
Kalksteine				
MP-Yellow	mikritisch	-	nicht erkennbar	spröde/ kataklastisch
KH-Red	mikritisch	<20	nicht erkennbar	spröde

Kennzeichnend für beide Proben KH-Red und MP-Yellow ist eine hohe Anzahl von Rissen und Stylolithen. Die Öffnung der Risse scheint dabei in der Varietät KH-Red sehr langsam

und teilweise durch reine Zugkräfte erfolgt zu sein, da vereinzelt faseriger, senkrecht zu den Rissen gewachsener Calcit auftritt, der beide Seiten der Rissflächen dekoriert (Abb. 4.22a). Rissysteme des Gesteins KH-Red sind bis auf wenige Ausnahmen (z.B. Abb. 4.22a) vollständig versiegelt, womit ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal zu der Varietät MP-Yellow gegeben ist. Risse in dieser Lithologie sind im Allgemeinen zwar ebenfalls mineralisiert, doch können immer wieder offene Poren in den zentralen Bereichen der sparitisch verheilten Mikroklüfte (Abb. 4.22b) oder auch im Verlauf von Stylolithen auftreten. Ein Großteil des Porenraums kann dabei auf Lösungsprozesse zurückgeführt werden.

4.3.4 Sandsteine

Die Ergebnisse aus der mikroskopischen Analyse der Sandsteine sind in Tabelle 4.9 zusammengefasst. Die Gesteine sind durch mittlere Korngrößen in einem Bereich zwischen 60 und 250 μm gekennzeichnet (Tab. 4.9, Abb. 4.23), so dass die Einheiten insgesamt als sehr feinkörnig bis feinkörnig ausgewiesen werden können (nach Blair & McPherson 1999). Die beiden Gesteine S-Brown und S-Yellow repräsentieren dabei die feinkörnigsten Varietäten (<110 μm) (Abb. 4.23a, b). Während im Vergleich dazu die beiden Varietäten PC-Green und S-Red etwas gröber entwickelt sind (<160 μm) (Abb. 4.23c, d), erweisen sich die Lithologien S-White und S-Rainbow als diejenigen Sandsteine mit den größten Partikeln (<200 μm bzw. <250 μm) (Abb. 4.23e, f). Die Varietät S-Rainbow erscheint dabei erheblich gröber als die rein weiße Varietät S-White, wobei nicht eindeutig geklärt werden kann, ob es sich dabei lediglich um zufällige Schwankungen oder um ein grundsätzliches lithologisches Merkmal handelt, das zur Unterscheidung der Varietäten herangezogen werden kann.

Im Vergleich untereinander sind die Sandsteine durch teilweise differenzierte Korngefüge gekennzeichnet, was insbesondere für die Sortierung, Zu- und Abrundung der Körner gilt (Tab. 4.9). Bei Mineralen der Sandsteine PC-Green und S-Red lässt sich durch die relativ geringe Zurundung eine deutliche Einregelung nach der Kornform beobachten (Abb. 4.23c, d). Die gestreckte Form der Körner erlaubt dabei eine bevorzugte Ausrichtung der Längsachsen, was insbesondere für den relativ hohen Anteil an Glimmern zutrifft, der mit seinen Basalflächen die sedimentäre Schichtung nachzeichnet bzw. definiert. In den übrigen Lithologien S-Brown, S-Yellow, S-White und S-Rainbow ist die Ausrichtung der Minerale weniger deutlich ausgeprägt, da die Körner im Allgemeinen etwas stärker zugerundet sind und dadurch keine so deutliche Anisotropie mehr zu erkennen ist (Abb. 4.23a-b, e-f).

Neben der Textur ist die Schichtung der Gesteine noch anhand von Korngrößendifferenzierungen dokumentiert, die üblicherweise durch sehr dünne alternierende Tonlagen sowie durch mehrere Zentimeter mächtige Bereiche mit Lagen mittel- bis grobkörniger Minerale nachvollzogen werden können. Viele der größeren Körner in den Varietäten S-White und S-Rainbow zeigen dabei eine vergleichsweise schlechte Zurundung, was zusammen mit der generell gröber ausgebildeten Kornfraktion in beiden Gesteinen auf relativ kurze Transportwege hindeutet. In den Gesteinen S-White und S-Rainbow treten oftmals ungewöhnlich große Körner auf, die mit mehr als 500 μm etwa das Doppelte des repräsentativen Korndurchmessers erreichen.

Als typische Art der Kornkontakte können in absteigender Reihenfolge der Häufigkeit planare Kontakte, konkav-konvexe Kontakte und suturierte Kontakte identifiziert werden (Tab. 4.9). Die Minerale der untersuchten Sandsteine sind infolge der Diagenese dicht gepackt, so dass sich bei einigen Proben zumindest im mikroskopischen Skalenbereich nur eine relativ geringe Anzahl an Hohlräumen bilden konnte. Dies gilt insbesondere für die sehr feinkörnigen Varietäten S-Brown und S-Yellow sowie für die Varietäten PC-Green und S-Red. Bei der Probe S-Red sind es eventuell auch die kantigeren Formen der Kristalle, die eine dichte Verschachtelung des Mineralbestandes zulassen. Bei den offenen Poren der Sandsteine dominieren Zwickelporen, die teilweise über dünne Porenschläuche miteinander verbunden sind. Nur selten sind längliche Poren entlang der Schichtung angeordnet.

Neben der Polarisationsmikroskopie wurde zur qualitativen Beschreibung von Besonderheiten des Gefügeinventars die optische Kathodolumineszenz-Mikroskopie eingesetzt. Dabei wirkt auf das zu untersuchende Mineral ein Elektronenstrahl ein, durch den ein Kristall zur Lumineszenzerscheinung im Bereich des sichtbaren Lichts angeregt wird (siehe Nickel 1978, Zinkernagel 1978, Marshall 1988). Mit der Methode können intrakristalline Strukturen sichtbar gemacht werden, die ansonsten unter dem Polarisationsmikroskop verborgen bleiben. Im Fall der vorliegenden Sandsteine wird deutlich, dass der Porenraum bis zu einem gewissen Grad durch silikatische Anwachsäume geschlossen wird, die gleichzeitig für die Bindung der detritischen Körner verantwortlich sind. Diese silikatischen Anwachsäume können in jeder Lithologie, wenn auch mit unterschiedlicher Intensität, nachgewiesen werden (Tab. 4.9, Abb. 4.24a-f). Neben silikatischem Zement ist der Porenraum vollständig oder zumindest in den Randpartien mit Tonmineralen oder Fe-(hydr)oxiden ausgekleidet. In der Varietät PC-Green können Poren zudem vollständig mit Calcit gefüllt sein (Abb. 4.24f). Während die einzeln auftretenden Tonminerale wohl kaum zur Festigung des Korngefüges, eher zu dessen Destabilisierung beitragen, dürfte bei den Carbonatmineralisationen von einem positiven Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften ausgegangen werden.

Tab. 4.9: Wesentliche Struktur- und Gefügemerkmale der beprobten Sandsteine.

	Korngröße [µm]	Kornbindung	Korngefüge			
			Sortierung	Abrundung	Zurundung	Kontakte
S-Brown	60-100	silikatisch	gut	kanten- gerundet	gering bis mittel	überwiegend planar
S-Yellow	80-110	silikatisch	gut	gerundet	gering bis mittel	überwiegend planar
S-White	130-200	silikatisch	mäßig	kanten- gerundet	gering bis mittel	überwiegend planar
S-Rainbow	160-250	silikatisch	mäßig	kanten- gerundet	gering bis mittel	überwiegend planar
PC-Green	100-160	silikatisch/ carbonatisch	gut	gerundet	gering	überwiegend planar
S-Red	100-130	silikatisch	gut	kanten- gerundet	gering	überwiegend planar

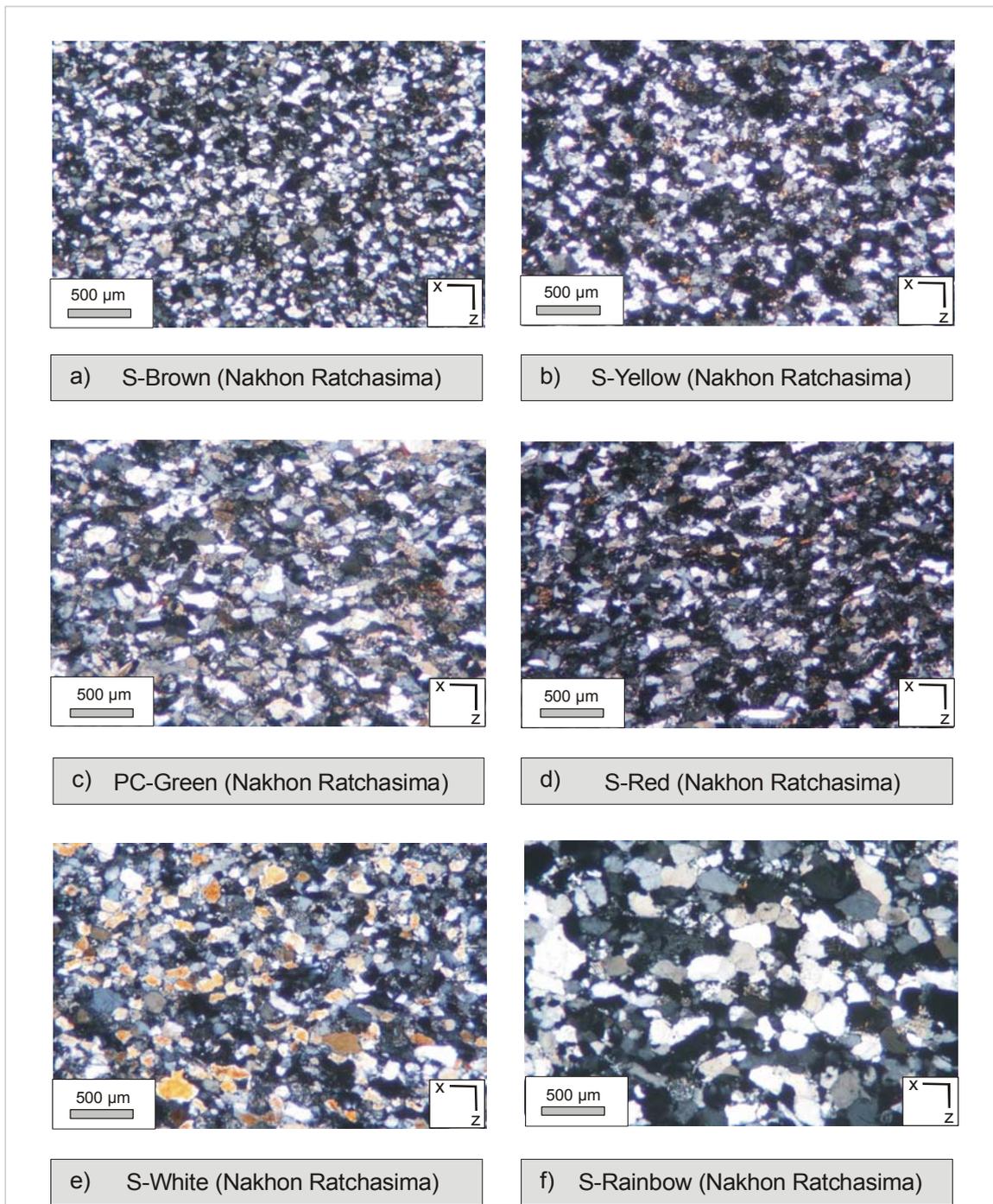


Abb. 4.23: Mikrogefüge der untersuchten Sandsteine. a) und b) Brauner und gelber Sandstein mit sehr feiner mittlerer Korngröße bis 110 µm. c) und d) Grüner und roter Sandstein mit sehr feiner mittlerer Korngröße bis 160 µm. e) und f) Weißer Sandstein und die weiße Sandsteinvarietät Rainbow mit feiner mittlerer Korngröße bis 250 µm. Weitere Erläuterungen im Text dieses Kapitels.

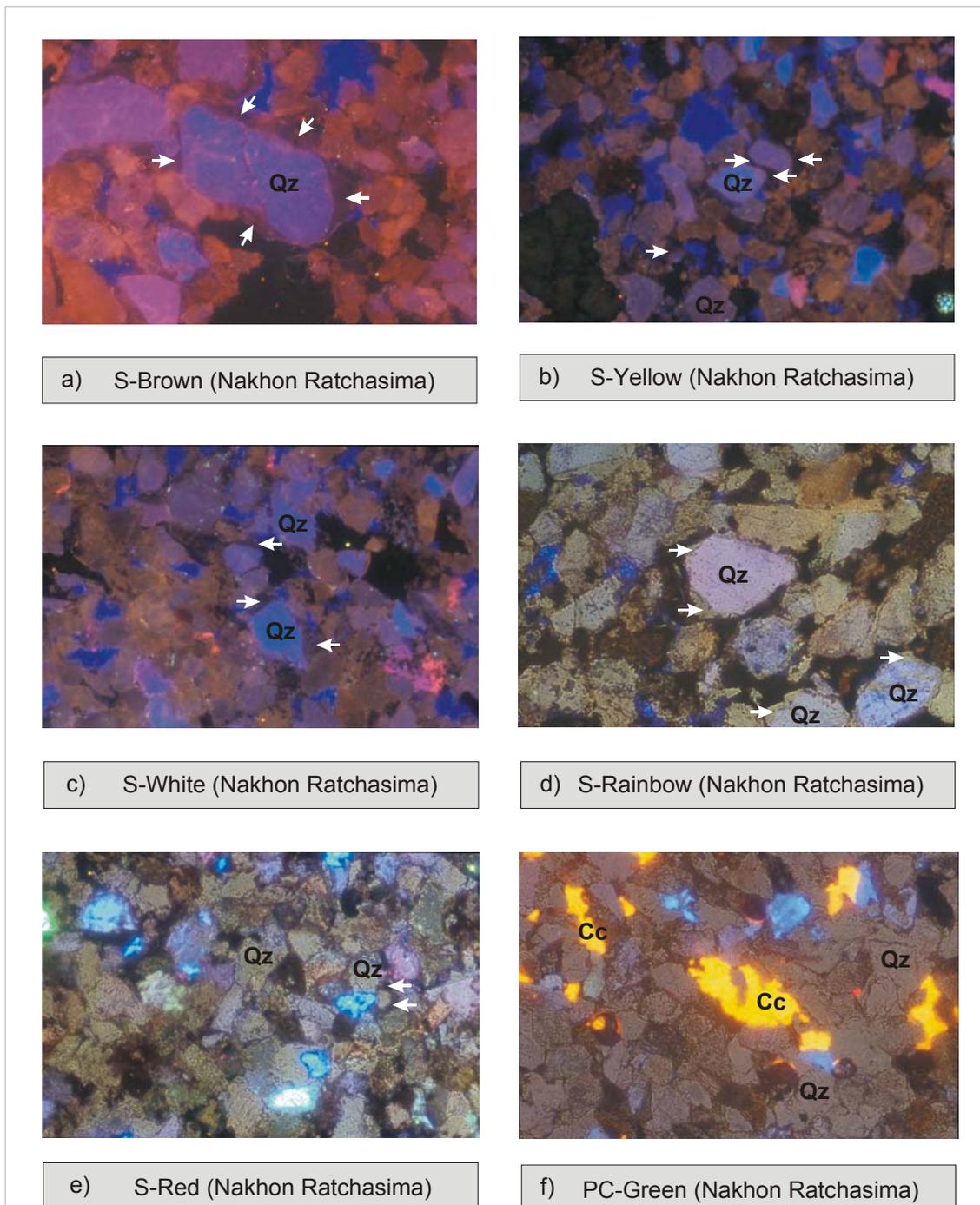


Abb. 4.24: Kathodolumineszenz-Eigenschaften der untersuchten Sandsteine. Erläuterungen im Text dieses Kapitels.

Ergänzend zur gefügekundlichen Typisierung sollen die Sandsteine an dieser Stelle kurz aufgrund ihrer jeweils typisch genetisch-faziellen Ausbildung voneinander abgegrenzt bzw. zusammengefasst werden. Eine solche Typisierung kann auf der Grundlage ganz bestimmter Schichtungsmerkmale, etwa Horizontalschichtung oder Schrägschichtung, erfolgen, deren spezifische Ausbildung Aussagen über die räumliche und zeitliche Entwicklung eines Ablagerungsraums zulässt. Dieses so genannte Konzept der fluviatilen Architekturelement-Analyse (nach Miall 1978, 1985, 1996) basiert auf einer zwei- bis dreidimensionalen

Erfassung einer Sedimentabfolge. Im Rahmen dieser Methode werden aktuogeologische Sedimentationsprozesse, Transporteigenschaften strömenden Wassers sowie die Genese von Sedimentstrukturen herangezogen, um fluviatile Paläoablagerungsräume zu rekonstruieren (Hjulström 1939; Allen 1983; Simons et al. 1965; Harms & Fahnestock 1965; Reineck & Singh 1980). Eine ausführliche Erläuterung der im Folgenden angeführten Architekturelemente findet sich bei Miall (1996), in sehr übersichtlicher Zusammenfassung auch bei Weber (2000).

In den Varietäten S-White und S-Rainbow, vorzugsweise jedoch in den Varietäten S-Brown und S-Yellow, treten neben Horizontalschichtungen auch verstärkt planare Schrägschichtungen auf. Das Auftreten von planaren Schrägschichtungen, deren Basis sich wie im vorliegenden Fall auch teilweise an das Top einer unterlagernden Schicht anschmiegt, deutet auf das Architekturelement DA („downward accretion“, Miall 1996) hin, das einfach bis komplex zusammengesetzte Sandflächen bezeichnet, die innerhalb sanddominierender Rinnensysteme gebildet wurden. Lokal treten in den Abfolgen der vier Varietäten auch trogförmige Schrägschichtungen auf, die ebenfalls auf flussabwärts migrierende Sandflächen deuten können (Weber 2000). Trogförmige Schrägschichtungen sind darüber hinaus jedoch auch kennzeichnend für den Architekturtyp CH („channel“, Miall 1996), der für Ablagerungen als Rinnenkörper im aktiven Bereich eines Flusssystems sprechen würde.

Während die Proben S-Brown, S-Yellow, S-White und S-Rainbow demnach im Einflussbereich der Fließrinnen zur Ablagerung kamen, verweisen Sandsteine PC-Green und S-Red durch ihren ausschließlich horizontalen und teilweise feinlaminaren Aufbau auf Sedimentationsbedingungen abseits der aktiven Fließrinnen. Nach Miall (1996) würden die Gesteine das Architekturelement CS („crevasse splay“) charakterisieren, das typisch für Mittel- bis Feinsande aus Durchbruchsfächern ist. Die Ablagerung der beiden Varietäten geht somit auf Hochwässer zurück, die den Uferdamm eines Flusses durchbrochen und sich fächerartig auf der Überflutungsebene ausgebreitet haben. Für dieses Szenario sprechen darüber hinaus weitere Argumente, wie beispielsweise die häufige Einlagerung von Tonklasten an der Basis vieler Schichten der Varietät S-Red, die Einschaltung fossiler Pflanzenhäcksel in der Varietät PC-Green sowie die glimmerreichen Zwischenlagen in beiden Varietäten (vgl. Weber 2000).

5. GESTEINSTECHNISCHE CHARAKTERISIERUNG DES PROBENMATERIALS

Die Ermittlung der gesteintechnischen Eigenschaften und der Verwitterungssensibilität eines Abbauproduktes gehört zum festen Bestandteil der Lagerstättenbewertung. Zeichnen sich bereits während der Erkundungsphase für eine potentielle Lagerstätte nachteilige Materialeigenschaften in gewissen Bereichen des Erkundungsgebietes ab, können gegebenenfalls alternative Regionen für den Abbau angesteuert oder im Extremfall das Abbauvorhaben an gewählter Stelle ganz aufgegeben werden.

Um die vorliegenden Naturwerksteine hinsichtlich ihrer Verwitterungssensibilität zu bewerten, wurden im Rahmen dieser Arbeit verschiedene gesteintechnische Untersuchungen durchgeführt. Neben der Bestimmung der Dichte, der Porenraumeigenschaften (Porosität, Porenradienverteilungen, Wasseraufnahme, Wassertransportverhalten) sowie elastischen Eigenschaften (statischer E-Modul, Ultraschallanalytik) konzentrieren sich die Untersuchungen auf mechanische Eigenschaften, was die Bestimmung von Druckfestigkeiten, Biege- und Spaltzugfestigkeiten sowie Abriebfestigkeiten beinhaltet. Ferner wurden die Dehnungseigenschaften in Abhängigkeit der Temperatur (thermische Dehnung) und der Feuchte (hygrische Dehnung) für das Probenmaterial ermittelt.

Ähnlich wie bei anderen Laboruntersuchungen auch ist die Auswahl des Probenmaterials von großer Bedeutung für die Versuchsdurchführungen und Ergebnisse. Bei der Probennahme wurde daher sorgfältig beachtet, dass das ausgesuchte Material repräsentativ für das Abbauprodukt ist und ein angemessenes Verhältnis von Probenvolumen und Korngrößen vorliegt. Um zu gewährleisten, dass alle hier ermittelten Ergebnisse mit Daten anderer Laboratorien vergleichbar sind, wurde die Bewertung des Probenmaterials unter Berücksichtigung höchster europäischer Standards durchgeführt.

5.1 Dichte, Porenraumeigenschaften und Wasseraufnahmeverhalten

5.1.1 Die Bedeutung der Kennwerte in der bautechnischen Anwendung

Die Dichte eines zu verwendenden Baustoffs gilt als ein Standardparameter bei der Materialcharakterisierung und ist entscheidende Grundlage für die Berechnung der Statik von Gebäuden, für die Berechnung des Eigengewichts einzelner Gebäudeteile (siehe Reinsch 1991, Prinz 1997) oder auch für logistische Fragestellungen wie etwa die Berechnung von Transportgewichten. Darüber hinaus werden Angaben zur Dichte häufig mit mechanischen Kennwerten wie etwa der Druckfestigkeit korreliert, um mittels relativ einfacher Untersuchungen (s. Kap. 5.2.2) erste Ableitungen zum Verhalten des Baustoffes unter destruktiven Bedingungen ableiten zu können.

Die Untersuchung des Porenraumes eines Naturwerksteins ist entscheidend, wenn Aussagen über sein Verwitterungspotential gemacht werden sollen, da der Porenraum derjenige Ort im Gestein ist, von dem Verwitterungsprozesse vornehmlich ausgehen.

Während der Volumenanteil der Porosität am Gesamtgestein sowie die Geometrie und die räumliche Anordnung der Poren einen wesentlichen Einfluss auf die gesteintechnischen Eigenschaften besitzen (vgl. Smorodinov et al. 1970, Kelsall et al. 1986), beeinflusst die Porengröße in erster Linie den Wassertransportmechanismus (siehe Fitzner 1969, Fitzner & Sneath 1982, Poschlo 1990, Weiss 1992, Ruedrich 2003, Sousa et al. 2005) und trägt zur chemischen und physikalischen Verwitterung bei, wenn Lösungen oder chemische Reaktanten durch den Porenraum migrieren und dort den Mineralbestand angreifen. Wichtige Kennwerte wie beispielsweise Porosität, Porenradienverteilung oder Wasserdampfdiffusionskoeffizienten geben zudem Auskunft über die Aufnahmegeschwindigkeit und Eindringtiefe, mit denen Schadstoffe aus der Luft oder aus dem Wasser aufgenommen werden.

5.1.2 Methodik

Die Dichte eines Materials lässt sich einerseits in die Matrixdichte (ρ_{Matrix}) und andererseits in die Rohdichte (ρ_{Roh}) untergliedern. Während die Angabe der Rohdichte eines Materials unter Berücksichtigung des Porenraums erfolgt, bezieht sich die Matrixdichte eines Materials lediglich auf dessen Komponenten und schließt somit den Porenraum aus. Die Matrixdichte gibt daher erste Hinweise auf die mögliche Zusammensetzung eines Gesteins. So lassen sich beispielsweise calcitische und dolomitische Marmore bereits anhand ihrer Matrixdichten unterscheiden, da die Hauptbestandteile der Lithologien Calcit bzw. Dolomit durch unterschiedliche Mineraleigenschaften gekennzeichnet sind (vgl. Ruedrich 2003).

Rohdichte und Matrixdichte wurden in der vorliegenden Arbeit durch Auftriebswägung nach dem Archimedes-Prinzip (Monicard 1980) an Würfelproben mit Kantenlängen zwischen 65 und 100 mm durchgeführt (Gleichungen 1 und 2). Bei dieser Methode sind die Variablen zur Bestimmung der Dichte (i) das Probengewicht unter trockenen Bedingungen (m_t), (ii) das Probengewicht unter nassen Bedingungen (m_n) sowie (iii) das Probengewicht unter Wasser (m_{au}). Für die Bestimmung des Nassgewichts und des Auftriebsgewichts wurde demineralisiertes Wasser zur Sättigung des Porenraums herangezogen. Die vollständige Wassersättigung erfolgte dabei durch eine vorherige Evakuierung der Proben.

<i>Gleichung 1:</i>	$\rho_{\text{Roh}} = \frac{m_t}{m_n - m_{\text{au}}}$	ρ_{Roh} [g/cm ³] = Rohdicht ρ_{Matrix} [g/cm ³] = Matrixdichte m_t [g] = Trockengewicht m_n [g] = Nassgewicht m_{au} [g] = Auftriebsgewicht
<i>Gleichung 2:</i>	$\rho_{\text{Matrix}} = \frac{m_t}{m_t - m_{\text{au}}}$	

Die Porosität eines Gesteins definiert sich durch das Verhältnis des Porenvolumens (bspw. Poren, Risse, etc.) zu dem Volumen des Gesamtgesteins und errechnet sich aus den gleichen Variablen wie die Roh- und Matrixdichte. Die durch Anwendung der Gleichung 3 erhaltene Prozentangabe des Hohlraumvolumens versteht sich als effektive Porosität, also als Porosität

einschließlich des zusammenhängenden Porenraums, der für Fluide oder Gase zugänglich ist. Isolierte Poren werden daher bei der effektiven Porosität nicht berücksichtigt. Grundsätzlich gilt, dass jede Zunahme der Porosität das Verwitterungsverhalten eines Gesteins beeinträchtigt. Der Kennwert muss daher als einer der einflussreichsten Faktoren gewertet werden, die zu Schäden am Naturwerkstein und am Bauwerk führen.

Gleichung 3:
$$\Phi = \frac{m_n - m_t}{m_n - m_{au}} \cdot 100 \quad \Phi \text{ [%]} \quad = \text{effektive Porosität}$$

Die Größe der einzelnen Porenräume wird über den Porenradius angegeben, der von dem kreisäquivalenten Radius einer idealisierten zylindrischen Pore abgeleitet wird. Da die meisten der in der Natur vorkommenden Poren jedoch eine unregelmäßige, komplexe Geometrie aufweisen, berücksichtigen die Untersuchungen lediglich den kleinsten Durchmesser einer Porenöffnung oder eines Risses, den so genannten Poreneintrittsradius. Die Methode der Porenradienverteilung (siehe Brakel et al. 1981) basiert auf der Washburn-Gleichung (Gleichung 4). Dieser Funktion liegt die Gesetzmäßigkeit zu Grunde, dass jeder kapillare Porenradius durch einen bestimmten Druck charakterisiert ist, der aufgebracht werden muss, um eine Flüssigkeit in die Kapillarpore einzubringen (Doveton 1987). Die Gleichung gilt für jede nicht-benetzende Flüssigkeit mit einem Kontaktwinkel $\theta > 90^\circ$. Die Analyse der Poreneintrittsradien erfolgte in der vorliegenden Arbeit mittels Quecksilber-Injektionen in zylindrische Proben (\emptyset 12.5 mm/40 mm). Als technisches Inventar stand ein „Porosimeter 2000“ (Fa. Carlo Elba) zur Verfügung, das einen Druckaufbau bis 2000 bar ermöglicht.

Gleichung 4:
$$r = \frac{2\sigma_{Hg} \cdot \cos\theta}{p}$$

r [μm] = Kapillarradius
 $2\sigma_{Hg}$ [mN/m] = Oberflächenspannung (480)
 θ [°] = Kontakwinkel (141.3)
 p [kPa] = Druck

Die Bestimmung der Wasseraufnahme erfolgte mittels zweier unterschiedlicher Methoden, die je nach Porosität des Probenmaterials zur Anwendung kamen. Bei Lithologien mit einer relativ hohen Porosität wurde die Wasseraufnahme durch die Auftriebswägung ermittelt, bei der kubische Probekörper mit Kantenlängen von 65 mm in Anlehnung an prEN 1925 in ein Wasserbad getaucht wurden. Beim Kontakt des porösen Mediums mit Wasser beginnt gleichzeitig die Absorption der Flüssigkeit in Richtung des Gesteinsinneren. Durch Rotation des Würfels werden bei der Untersuchung die gefügebedingten Richtungsabhängigkeiten des Gesteins berücksichtigt. Das Wasseraufnahmeverhalten wird anschließend anhand des w -Wertes angegeben, der die Absorption der Flüssigkeit über eine definierte Grundfläche nach Gleichung 5 beschreibt.

Gleichung 5:
$$w = \frac{m_w}{\sqrt{t}}$$

w [kg/m² · √h] = Wasseraufnahmekoeffizient
 m_w [kg/m²] = absorbierte Wassermenge
 t [h] = Zeit

Der w-Wert ist eine zuverlässige Charakterisierung des Wasseraufnahmeverhaltens für hoch poröse Medien wie etwa Sandsteine, eignet sich allerdings weniger gut für niedrig poröse Gesteine (freundl. Mitteilung J. Rüdlich). Aus diesem Grund wurde das Wasseraufnahmeverhalten der Granitoide und Carbonatgesteine über die Wasserdampfdiffusion ermittelt, ebenfalls unter Berücksichtigung der drei orthogonalen Raumrichtungen. Für die Durchführung der Untersuchung wurden scheibenförmige Probekörper (Ø 40 mm/ 5 mm) als Abdichtung auf einer mit Wasser gefüllten Teflon-Autoklave fixiert. Anschließend wurde durch Wiegen der Autoklaven die Menge des Wassers gemessen, die während einer bestimmten Zeit durch die scheibenförmige Probe in die Atmosphäre diffundiert ist. Die Ergebnisse der Wasserdampfdiffusion werden über den Koeffizienten μ angegeben, der sich nach Gleichung 6 berechnet.

Gleichung 6:
$$\mu = \frac{\delta_L \cdot P_s \cdot \Delta a \cdot A \cdot t}{s \cdot i}$$

μ	[-]	= Widerstandszahl der Dampfdiffusion
δ_L	[kg/Pa·m·s]	= Wasserdampf-Diffusionsleitkoeffizient
P_s	[Pa]	= Partialdruck der gesättigten Luft
Δa	[-]	= Differenz der relativen Luftfeuchte
A	[m ²]	= Fläche der Probe
t	[h]	= Zeit
s	[m]	= Schichtdicke der Probe
i	[kg/m ² ·s]	= Wasserdampf-Diffusionsstrondichte

5.1.3 Dichte, Porenraumeigenschaften und Wasseraufnahme des Probenmaterials

Die Dichte sowie die Porenraumeigenschaften und die Wasseraufnahme der untersuchten Lithologien sind in Tabelle 5.1 zusammengefasst. Die Matrixdichten der Granitoide liegen zwischen 2.60 g/cm³ (NB-Orange) und 2.88 g/cm³ (BT-Black), die der Gneise bei 2.64 g/cm³ (HH-Grey) bis 2.67 g/cm³ (PS-Grey). Im Allgemeinen zeigen die untersuchten Granitoide und Gneise nur geringfügig niedrigere Rohdichten, die bei einzelnen Gesteinen bis zu maximal 0.4 Vol.-% von der Matrixdichte abweichen können. Die aus der Auftriebswägung ermittelten Porositäten der Gesteine bewegen sich innerhalb eines Spektrums von 0.39 und 1.72 Vol.-%. Beide Extremwerte werden dabei durch den Monzodiorit BT-Black (Minimalwert) und den Granit NB-Orange (Maximalwert) repräsentiert. Die Porositäten bewegen sich im unteren Bereich der für Granitoide üblichen Werte, die nach Peschel (1983) bis 6.9 Vol.-% betragen können. Auffallend ist der mittlere Porenradius der Gesteine NB-Orange und BT-Black, der bei dem hochporösen Granit (NB-Orange) lediglich 0.036 μm , bei dem dichten und niedrigporösen Monzodiorit (BT-Black) dagegen 0.469 μm beträgt. Beide Werte für die mittleren Porenradien definieren die Grenzen des gesamten Spektrums, das für die Granitoide und Gneise gemessen wurde. Für die Gesteine ergeben sich teilweise hohe Sättigungsbeiwerte bis 0.98, die beispielsweise von der Probe NB-Orange erreicht werden. Das Wasseraufnahmeverhalten der Granitoide und Gneise ist anhand der Widerstandszahlen für die Wasserdampfdiffusion (μ) in Tabelle 5.2 zusammengefasst.

Tab. 5.1: Dichte, Porenraumcharakteristik und Sättigungsbeiwert des Probenmaterials.

	Matrixdichte [g/cm ³]	Rohdichte [g/cm ³]	Porosität [Vol.-%]		mittlerer Porenradius [μm]	Sättigungs- beiwert
			<i>Auftrieb</i>	<i>Hg</i>		
Granitoide						
BT-White	2.66	2.64	0.59	0.49	0.046	0.83
BT-Black	2.88	2.87	0.39	0.05	0.469	0.93
BT-Violet	2.66	2.64	0.79	0.44	0.051	0.79
BT-Blue	2.66	2.64	0.91	0.37	0.065	0.60
BN-Pink	2.66	2.65	0.50	n/a	n/a	0.96
SN-Blue	2.67	2.65	0.85	n/a	n/a	0.82
MT-Orange1	2.62	2.60	0.76	0.35	0.054	0.73
MT-Orange2	2.61	2.58	0.91	0.35	0.062	0.68
NB-Orange	2.60	2.56	1.72	1.70	0.036	0.98
MC-Yellow	2.67	2.64	0.83	n/a	n/a	0.82
SP-Grey	2.65	2.64	0.46	n/a	n/a	0.83
Gneise						
PS-Grey	2.67	2.65	0.71	0.50	0.036	0.81
HH-Grey	2.64	2.62	0.97	0.76	0.066	0.68
Hornblendit						
PTC-Black	3.17	3.16	0.55	0.30	0.163	0.83
Marmore						
PK-Pink	2.70	2.68	0.63	1.08	0.024	n/a
PK-Grey	2.69	2.68	0.60	0.37	0.013	0.92
BTD-White	2.71	2.70	0.39	0.16	0.183	0.60
TS-Grey	2.71	2.69	0.88	1.20	0.030	0.85
TS-Pink	2.69	2.66	1.21	2.52	0.059	0.87
PC-Red	2.71	2.69	0.57	0.62	0.165	0.56
PC-White	2.70	2.69	0.46	0.30	0.149	0.52
PC-Grey	2.72	2.69	0.15	n/a	n/a	0.61
Kalksteine						
MP-Yellow	2.71	2.70	0.52	0.44	0.07	0.74
KH-Red	2.72	2.71	0.33	0.19	0.193	0.65
Subarkosen						
S-Brown	2.66	2.38	10.52	9.25	0.144	0.57
S-Yellow	2.66	2.30	13.47	11.79	0.135	0.49
S-White	2.65	2.10	20.93	9.39	0.131	0.26
S-Rainbow	2.65	2.32	12.60	10.48	0.428	0.49
Arkosen						
PC-Green	2.73	2.53	7.23	7.68	0.053	0.85
S-Red	2.65	2.28	13.81	13.13	0.236	0.68

Tab. 5.2: Wasseraufnahmeverhalten des Probenmaterials für Granitoide, Gneise, Carbonatgesteine und den Hornblendit, dargelegt anhand der Widerstandszahl der Wasserdampfdiffusion (μ). Für die Sandsteine gibt der w-Wert das Wasseraufnahmeverhalten an.

	Widerstandszahl der Wasserdampfdiffusion (μ)				w-Wert			
	x-Richtung	y-Richtung	z-Richtung	Anisotropie	x-Richtung	y-Richtung	z-Richtung	Anisotropie
Granitoide								
BT-White	2905.25	2753.52	2788.66	5.2	-	-	-	-
BT-Black	4016.61	3225.03	2847.93	29.1	-	-	-	-
BT-Violet	4730.44	4669.98	4582.74	3.1	-	-	-	-
BT-Blue	2872.87	4439.84	3326.80	35.3	-	-	-	-
BN-Pink	n/a	n/a	n/a	n/a	-	-	-	-
SN-Blue	n/a	n/a	n/a	n/a	-	-	-	-
MT-Orange1	4086.43	3878.48	3644.04	10.2	-	-	-	-
MT-Orange2	4483.43	4374.87	4080.68	9.0	-	-	-	-
NB-Orange	2745.92	2431.71	2408.20	12.3	-	-	-	-
MC-Yellow	n/a	n/a	n/a	n/a	-	-	-	-
SP-Grey	n/a	n/a	n/a	n/a	-	-	-	-
Gneise								
PS-Grey	3303.15	4091.79	2002.77	51.1	-	-	-	-
HH-Grey	1209.88	1241.13	1318.01	8.2	-	-	-	-
Hornblendit								
PTC-Black	2573.80	3135.55	2732.39	17.9	-	-	-	-
Marmore								
PK-Pink	7601.08	5508.15	7541.99	27.5	-	-	-	-
PK-Grey	3294.57	4013.57	5250.58	37.3	-	-	-	-
BTD-White	3980.74	22008.17	8307.48	81.9	-	-	-	-
TS-Grey	3043.93	4557.08	2831.49	37.9	-	-	-	-
TS-Pink	2251.30	1663.86	2326.08	28.6	-	-	-	-
PC-Red	1508.05	2109.11	1984.46	28.5	-	-	-	-
PC-White	2503.49	2583.57	2922.09	14.3	-	-	-	-
PC-Grey	n/a	n/a	n/a	n/a	-	-	-	-
Kalksteine								
MP-Yellow	1140.00	1458.58	1168.66	21.8	-	-	-	-
KH-Red	6952.01	12442.54	29172.06	76.2	-	-	-	-
Subarkosen								
S-Brown	-	-	-	-	11.51	3.06	5.11	73.4
S-Yellow	-	-	-	-	6.15	3.53	7.48	52.8
S-White	-	-	-	-	5.18	3.78	7.39	48.8
S-Rainbow	-	-	-	-	12.97	1.33	3.32	89.7
Arkosen								
PC-Green	-	-	-	-	-	3.77	4.47	-
S-Red	-	-	-	-	8.79	4.88	2.83	67.8

Den Hornblendit PTC-Black charakterisieren aufgrund seiner nahezu monomineralischen Zusammensetzung die höchsten aller gemessenen Matrix- und Rohdichten (3.17 bzw. 3.16 g/cm³). Die relativ geringen Porositätswerte von 0.55 Vol.-% sind mit denen anderer Granitoide oder auch Carbonatgesteine vergleichbar. Der mittlere Porenradius des Materials beträgt 0.163 µm. Der Sättigungswert liegt bei 0.83 (Tab. 5.1).

Die Dichten der Carbonatgesteine sind aufgrund der recht ähnlichen mineralogischen Zusammensetzungen sehr einheitlich, so dass die Werte für die Matrixdichte nur geringfügig zwischen 2.69 g/cm³ und 2.72 g/cm³ schwanken. Die Porositäten befinden sich mehrheitlich in einem Bereich zwischen 0.39 Vol.-% (BTD-White) und 1.21 Vol.-% (TS-Pink). Lediglich der Marmor PC-Grey, der in der vorliegenden Arbeit aufgrund seiner sehr geringen metamorphen Überprägung als Bindeglied zwischen den Marmoren und Kalksteinen gewertet wird, zeigt geringere Porositäten (Tab. 5.1). Die Werte der Probe PC-Grey liegen dabei noch unterhalb der entsprechenden Angaben für reine Kalksteine, die ein Hohlraumvolumen von 0.33 Vol.-% (KH-Red) bzw. 0.55 Vol.-% (MP-Yellow) aufweisen. Der mittlere Porenradius der Marmore bewegt sich zwischen 0.013 und 0.183 µm, der der Kalksteine zwischen 0.070 und 0.193 µm. Der Sättigungsbeiwert der Carbonatgesteine liegt bis auf wenige Ausnahmen, die durch die Marmore TS-Grey, TS-Pink und PK-Pink sowie durch den Kalkstein MP-Yellow repräsentiert werden, unter 0.70. Das Wasseraufnahmeverhalten der Granitoide und Gneise ist mittels der Widerstandszahlen für die Wasserdampfdiffusion (μ) in Tabelle 5.2 zusammengefasst.

Die Matrixdichten der Sandsteine liegen überwiegend bei 2.65 bzw. 2.66 g/cm³, wobei die Probe PC-Green eine deutlich höhere Matrixdichte anzeigt (Tab. 5.1). Die Rohdichten variieren zwischen 2.10 g/cm³ (S-White) und 2.53 g/cm³ (PC-Green). Mit Ausnahme der Probe PC-Green, die eine Porosität von nur 7.23 Vol.-% kennzeichnet, konnte bei den Sandsteinen ein Hohlraumvolumen über 10 Vol.-% (bis maximal 20.9 Vol.-%) nachgewiesen werden. Die Hohlräume der Gesteine sind durch Poren charakterisiert, deren mittlerer Radius eine Größe zwischen 0.053 und 0.428 µm aufweist. Mit Ausnahme der Varietät PC-Green zeigen die Sandsteine einen Sättigungsbeiwert unter 0.70. Das Wasseraufnahmeverhalten der Sandsteine ist anhand der w-Werte in Tabelle 5.2 dargestellt.

5.2 Ultraschallanalytik

5.2.1 Hintergrund der Untersuchungen

Bei der Erkundung eines Abbaugbietes muss gewährleistet sein, dass frisches Gesteinsmaterial, bei bereits existierenden Lagerstätten vorzugsweise Material von Abbauwänden, für die gesteintechnischen Untersuchungen herangezogen wird. Dies ist vor allem deshalb notwendig, da sich die Festigkeiten eines Gesteins signifikant reduzieren, wenn das Material Verwitterungserscheinungen aufweist (vgl. Geological Society 1995).

Der Zustand eines Gesteins kann mittels Ultraschallanalytik quantifiziert werden. Die Messung der Ultraschallwellen (s. Kap. 5.2.2) ist eine zerstörungsfreie Messmethodik, die

sich daher auch hervorragend für den Einsatz in der Baudenkmalpflege und Qualitätskontrolle eignet. Durch die verwitterungsbedingte Reduktion von Ultraschallwellengeschwindigkeiten gibt das Verfahren direkte Hinweise den Umfang einer Gesteinsschädigung (siehe dazu auch Köhler 1991, Weiss et al. 2001).

5.2.2 Methodik

Die Ultraschallanalytik wird im Allgemeinen dazu herangezogen, den Verwitterungsgrad von Gesteinen zu quantifizieren, der auf die Lockerung des Korngefüges bzw. auf das Aufbrechen der interkristallinen Kornstrukturen zurückgeführt werden kann (Köhler 1991, Weiss et al 2001). Die Methodik basiert auf der Annahme, dass Variationen in den Geschwindigkeiten der Kompressionswellen mit der Porosität und der Dichte eines Materials verbunden sind, was konsequenterweise mit dem Verwitterungsstadium eines Gesteins korreliert werden kann.

In der vorliegenden Arbeit wurden die Geschwindigkeiten der Kompressionswellen (V_p in km/s) an kubischen Probekörpern mit Kantenlängen zwischen 65 und 100 mm ermittelt. Die Messungen wurden an trockenem und wassergesättigtem Probenmaterial durchgeführt, da in letzterem Fall der Einfluss des Porenraums (offene Poren, Risse) auf die Kompressionswellengeschwindigkeiten deutlich reduziert werden kann. Der Effekt resultiert aus der wesentlich schnelleren Ausbreitung von Kompressionswellen in Wasser ($V_{p, \text{Wasser}} = 1.5 \text{ km/s}$; $V_{p, \text{Luft}} = 0.3 \text{ km/s}$). Bei den wassergesättigten Proben wird das Porenvolumen daher zu großen Teilen eliminiert. Die Laufzeiten der Kompressionswellen dieser Proben können daher den intrinsischen V_p -Werten gleichgesetzt werden, die durch die mineralogische Komposition und durch die Textur, also die räumliche Orientierung der (an)isotropen Kristalle, hervorgerufen werden (vgl. Siegesmund et al. 1993, Siegesmund 1996).

5.2.3 Kompressionswellengeschwindigkeiten des Probenmaterials

Die Geschwindigkeiten der Kompressionswellen (V_p) sind für das Probenmaterial in Tabelle 5.3 zusammenfassend dargestellt.

Tab. 5.3: Laufzeiten der Kompressionswellen für das Probenmaterial, gemessen in trockenem und wassergesättigtem Zustand.

	V_p-Daten (trocken) [km/s]				V_p-Daten (nass) [km/s]			
	<i>x-Richtung</i>	<i>y-Richtung</i>	<i>z-Richtung</i>	<i>Anisotropie</i>	<i>x-Richtung</i>	<i>y-Richtung</i>	<i>z-Richtung</i>	<i>Anisotropie</i>
Granitoide								
BT-White	5.192	5.120	5.131	1.4	5.468	5.461	5.292	3.2
BT-Black	5.628	5.567	5.528	1.7	5.890	5.762	5.718	2.9
BT-Violet	5.086	5.232	5.224	2.8	5.657	5.648	5.699	0.9
BT-Blue	5.010	5.125	4.957	3.3	5.759	5.788	5.762	0.5
MT-Orange1	5.112	5.070	5.092	0.8	5.759	5.761	5.701	1.0
MT-Orange2	5.041	5.000	4.947	1.9	5.744	5.730	5.599	2.5
NB-Orange	4.876	5.091	4.952	4.2	4.979	5.091	4.900	3.8
MC-Yellow	4.606	4.645	4.645	0.8	5.363	5.473	5.627	4.7
SP-Grey	5.326	5.211	5.292	2.2	5.456	5.417	5.439	0.7
Gneise								
PS-Grey	4.656	4.393	4.004	14.0	5.399	5.245	5.297	2.9
HH-Grey	4.980	4.796	4.701	6.6	5.569	5.614	5.652	1.5
Hornblendit								
PTC-Black	5.908	6.315	6.192	6.4	6.080	6.315	6.389	4.8
Marmore								
PK-Pink	5.99	6.29	5.87	6.6	-	-	-	-
PK-Grey	6.297	6.247	5.708	9.4	6.378	6.325	5.773	9.5
BTD-White	6.038	6.369	5.696	10.6	6.533	7.194	6.019	16.3
TS-Grey	6.224	6.049	6.144	2.8	6.224	6.125	6.222	1.6
TS-Pink	5.582	5.522	5.417	3.0	5.773	5.715	5.532	4.2
PC-Red	5.767	5.640	5.917	4.7	6.042	5.976	6.213	3.8
PC-White	5.284	5.168	5.082	3.8	6.198	6.377	6.086	4.6
PC-Grey	6.144	6.206	6.056	2.4	6.383	6.285	6.212	2.7
Kalksteine								
MP-Yellow	5.440	5.355	5.500	2.6	5.941	6.007	5.857	2.5
KH-Red	5.935	5.788	5.841	2.5	6.006	5.970	5.952	0.9
Subarkosen								
S-Brown	4.346	4.305	4.238	2.5	4.546	4.536	4.461	1.9
S-Yellow	3.947	4.067	3.756	7.6	4.128	4.313	4.017	6.9
S-White	3.954	3.947	3.689	6.7	4.179	4.273	4.082	4.5
S-Rainbow	4.081	3.940	3.782	7.3	4.371	4.174	4.157	4.9
Arkosen								
PC-Green	3.597	3.879	3.009	22.4	4.098	3.972	3.919	4.4
S-Red	3.054	2.861	2.579	15.6	3.563	3.456	3.339	6.3

Bei frischen Granitoiden sollten unter trockenen Bedingungen die V_P -Geschwindigkeiten über 5 km/s liegen (Iliev 1967) (Tab. 5.4), was im vorliegenden Fall für die Mehrheit der granitoiden Proben zutrifft. Deutlich unter diesem Grenzwert liegt der Granit MC-Yellow sowie beide Gneise HH-Grey und PS-Grey (Tab. 5.3). Neben der erhöhten Porosität dieser Proben kann der Kopplungsgrad der Mineralkörner, also eine Zunahme der Rissdichte, für eine Verringerung der Laufzeiten verantwortlich sein (Schön 1983), so dass an dieser Stelle nicht auszuschließen ist, dass die drei Proben eventuell durch eine beginnende Entfestigung des Mineralbestandes gekennzeichnet sind. Zudem zeigen die Gesteine bei einem Vergleich zwischen den Werten aus trockenen und nassen Messbedingungen deutliche Unterschiede in den Laufzeiten (bspw. $\Delta_{VP} = 0.951$ km/s für die z-Richtung der Probe HH-Grey). Wesentlich schnellere Laufzeiten mit Werten über 5.5 km/s bzw. über 6.0 km/s konnten für die mafischen Gesteine BT-Black und PTC-Black ermittelt werden, was sich zum einen aus der sehr niedrigen Porosität, vornehmlich jedoch aus dem höheren Anteil an relativ dichter Hornblende ergibt.

Tab. 5.4: Beziehung zwischen Ultraschallgeschwindigkeiten und dem Verwitterungsgrad für Granite nach Iliev (1967).

Verwitterungsgrad	V_P [km/s]	Verwitterungskoeffizient
frisch	5.0>	0
wenig verwittert	4.0 - 5.0	0.0 - 0.2
mäßig verwittert	3.0 - 4.0	0.2 - 0.4
stark verwittert	2.0 - 3.0	0.4 - 0.6
sehr stark verwittert	<2.0	0.6 - 1.0

Die V_P -Werte der vorliegenden Marmore reichen von 5.082 km/s (PC-White, z-Richtung) bis 6.369 km/s (BTD-White, y-Richtung). Die Gesteine definieren damit einen Bereich, in dem auch die V_P -Daten der Kalksteine angesiedelt sind (Tab. 5.3). Wie bei Graniten kann auch bei Marmoren der Grad der Gesteinsschädigung aus den Laufzeiten der Kompressionswellen abgeleitet werden. Köhler (1991) gründete dazu aus umfassenden Messungen der Kompressionswellengeschwindigkeiten für Carrara Marmore eine Schadensklassifikation, die sich in fünf Schadensklassen gliedert (Tab. 5.5). Aufgrund der insgesamt hohen V_P -Daten der vorliegenden Carbonatgesteine (>5.0 km/s) können die Lithologien gemäß dieser Klassifikation mit der Schadensklasse „0“, also mit ausgesprochen frischem Zustand, ausgewiesen werden.

Tab. 5.5: Schadensklassifikation auf der Basis von V_P -Werten für Marmore nach Köhler (1991).

Schadensklasse	V_P [km/s]	Zustand	Porosität [%]
0	>5.0	frisch	<0.5
I	3.0 - 5.0	zunehmend porös	1.3 - 0.5
II	2.0 - 3.0	absandend	3.0 - 1.3
III	1.5 - 2.0	brüchig	5.3 - 3.0
IV	<1.5	zerfallen	>5.3

Mit V_p -Werten zwischen 2.579 km/s (S-Red, z-Richtung) und 4.346 km/s (S-Brown, x-Richtung) liegen die Laufzeiten der Kompressionswellen bei Sandsteinen deutlich unter 5 km/s (Tab. 5.5). Dies impliziert jedoch nicht, dass es sich bei den Lithologien um vorgeschädigtes Material handelt. Die niedrigeren V_p -Daten gehen hier in erster Linie auf die natürlich bedingten, höheren Porositäten sowie auf den Gehalt an u. a. detritisch auftretenden Tonmineralen zurück.

Innerhalb aller beprobten Lithologien ist vereinzelt eine deutliche Richtungsabhängigkeit der P-Wellengeschwindigkeiten zu erkennen. Ursachen dieser Richtungsabhängigkeit ergeben sich durch eine Einregelung nach der Kornform, der Anisotropie der gesteinsbildenden Kristalle, der Anordnung von Mikrorissen oder einer stofflichen Bänderung (Duerrast et al. 1999). Dies erklärt, weshalb in der Gruppe der Granitoide und Gneise gerade die texturierten Gneise HH-Grey und PS-Grey mit $A = 6.6 \%$ bzw. $A = 14.0 \%$ die höchsten Anisotropien im trockenen Zustand aufweisen. In beiden Fällen werden die Ultraschalleigenschaften also durch die gefüge- bzw. strukturbedingte Anisotropie des Materials beeinflusst. Gleiches gilt für die deutlich lagig aufgebauten Marmore PK-Pink und PK-Grey sowie für den stark texturierten Marmor BTD-White, die mit Anisotropien bis zu $A = 10.6 \%$ die höchsten Richtungsabhängigkeiten innerhalb der Gruppe der Carbonatgesteine aufweisen. Bei den Sandsteinen zeigen ebenfalls diejenigen Gesteine die höchsten Richtungsabhängigkeiten, die sich durch höhere Anteile an Glimmern auf den Schichtflächen, also orientiert auftretenden Mineralen, ausweisen.

Aus den vorliegenden Geschwindigkeiten der Kompressionswellen lässt sich als wohl wesentlichste Aussage ableiten, dass das Probenmaterial mehrheitlich in frischem Zustand vorliegt und auch keine signifikanten Gesteinsschädigungen zu erkennen sind. Da es sich bei den Proben um repräsentatives Material der Lagerstätten handelt, beinhaltet das Ergebnis, dass in den hier untersuchten thailändischen Lagerstätten bis auf wenige Ausnahmen vollkommen unverwitterte Produkte gefördert werden.

5.3 Mechanische Eigenschaften

5.3.1 Die Bedeutung der Kennwerte in der bautechnischen Anwendung

Die mechanischen Eigenschaften eines Naturwerksteins charakterisieren das Material hinsichtlich seiner Verwendbarkeit am Bauwerk. Bauteile aus Naturwerkstein, die wie Fassadenplatten oder freitragende Treppenstufen zwischen einzelnen Aufnahmevorrichtungen eingebaut sind, werden in vielen Fällen senkrecht zu ihrer größten Oberfläche belastet. Die Materialien, die für einen solchen Zweck herangezogen werden, müssen u. a. eine hohe Biegefestigkeit aufweisen. Gleiches gilt für Platten aus Naturwerkstein, die als Bodenbelag über einem meist weicheren Substrat verlegt sind und die auf sie einwirkenden Kräfte über eine größere Oberfläche verteilen müssen. Druckfestigkeiten und Spaltzugfestigkeiten quantifizieren darüber hinaus den Zusammenhalt des Korngefüges in einem Gestein und geben dem Bauingenieur und Architekten auf diese Weise wesentliche Eckdaten für die

statische Planung eines Bauvorhabens mit Naturwerksteinen (siehe z.B. Purtak 2001). Abriebfestigkeiten kennzeichnen ein Material hinsichtlich seiner Resistenz gegenüber Abrasivkräften, was beispielsweise eine entscheidende Rolle bei dem potentiellen Einsatz eines Abbauproduktes als Bodenbelag spielt. Bei der Abriebfestigkeit handelt es sich um einen Kennwert, der üblicherweise zu einem späteren Zeitpunkt der Explorationsphase getestet wird und nicht unmittelbar darüber entscheidet, ob das Lagerstättenmaterial für den Abbau geeignet ist oder nicht (Smith 1999). Eine Ausnahme liegt sicherlich dann vor, wenn die Erkundung gezielt auf Material ausgerichtet ist, welches als Pflasterstein im Verkehrswegebau eingesetzt werden soll.

Bauplanern und Architekten muss bewusst sein, dass gerade die Festigkeiten eines natürlichen Baustoffes aufgrund der teilweise inhomogenen Strukturen und Texturen immer wieder Abweichungen aufweisen und in Abhängigkeit des Gesteinsgefüges stark schwanken können. Um kostenintensive Ausbesserungen und Schäden am Bauwerk aufgrund von Materialversagen zu vermeiden, müssen diese Richtungsabhängigkeiten bei der Bewertung der Werksteine unbedingt berücksichtigt werden. Aus diesem Grund veranlasst zudem die Materialprüfung nach DIN EN 1926 eine Berücksichtigung der textuellen Vorzeichnungen eines Gesteins. In Anlehnung an diese Vorgaben wurden die zu untersuchenden Proben daher in verschiedenen Richtungen parallel und senkrecht zu den Gefügeelementen getestet (Abb. 5.1). In Bezug auf die Gefügeabhängigkeit der mechanischen Gesteinseigenschaften wurden bereits umfangreiche Arbeiten an Marmoren (Siegesmund et al. 1999, Koch 2005), Sandsteinen (Koch & Siegesmund 2001) sowie an Granitoiden (Strohmeyer & Siegesmund 2002, Strohmeyer 2003) durchgeführt.

Bei den mechanischen Eigenschaften werden im Folgenden zur besseren Übersicht und für einen Vergleich mit Referenzwerten anderer Lithologien lediglich die Mittelwerte der aus den drei Raumrichtungen ermittelten Werte angeführt. Die jeweiligen Anisotropieanteile werden ausführlicher im Rahmen einer qualitativen Bewertung in Kapitel 7.1 diskutiert.

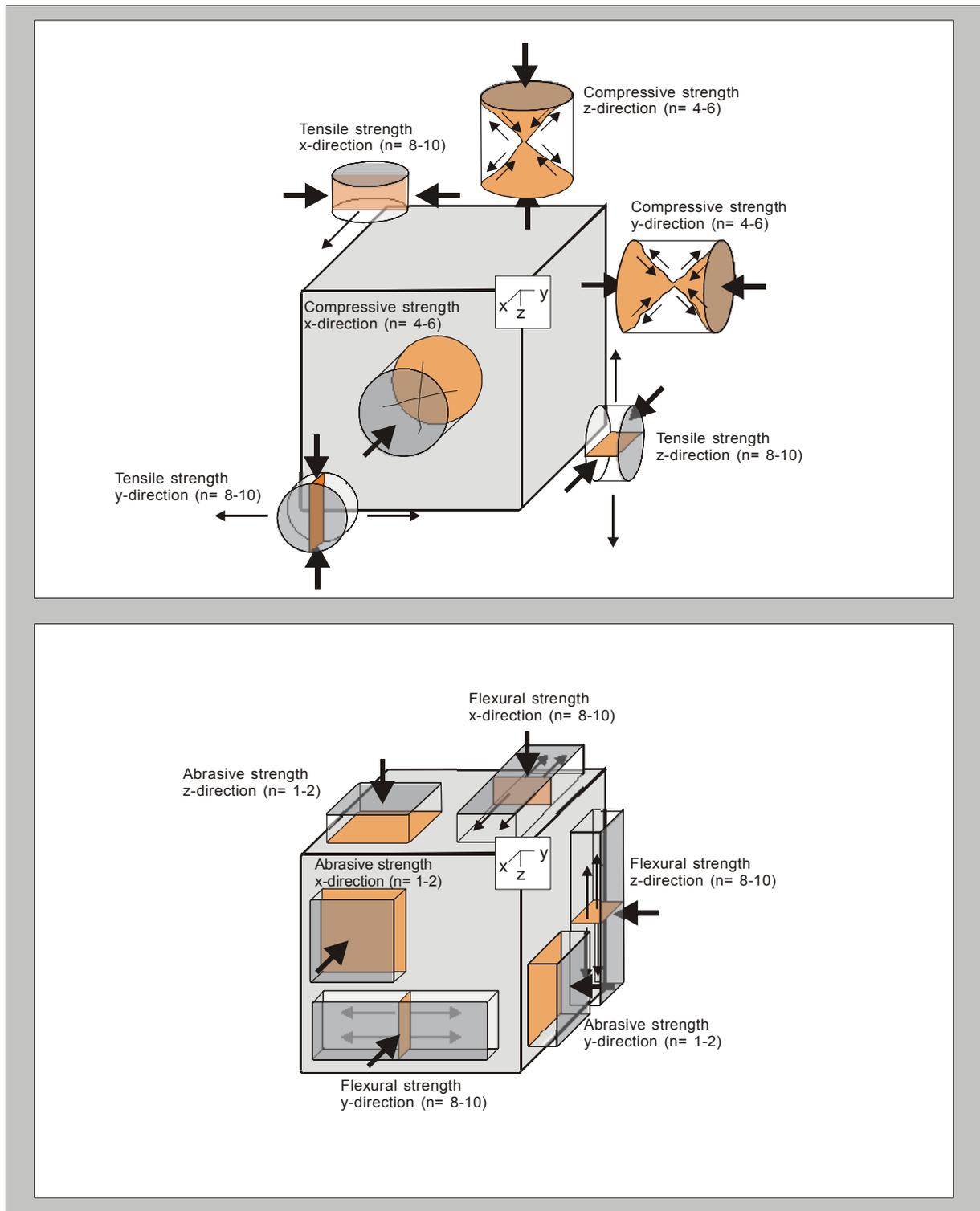


Abb. 5.1: Orientierung der Probekörper für die Druck- und Spaltzugfestigkeiten (oben) bzw. Biegezug- und Abriebfestigkeiten (unten) in Bezug auf die orthogonalen Raumrichtungen x, y und z (nach Strohmeyer 2003). Dicke Pfeile kennzeichnen die Orientierung der Kräfte während der jeweiligen Versuche, dünne Pfeile die Spannungsrichtungen im Probekörper. Orange Farben zeichnen die Prozesszonen nach, an denen die Spannungen zum Materialversagen führen (siehe ergänzend hierzu auch Abbildung 5.2). In Klammern ist die Anzahl der Probekörper (n) angegeben, die für ein Gestein pro Richtung getestet wurden.

5.3.2 Methodik

Die Bestimmung der Druckfestigkeiten erfolgte in Anlehnung an DIN EN 1926 und wurde an zylindrischen Testkörpern mit einem Längen-Höhen-Verhältnis von 1:1 vorgenommen (\varnothing 50 mm/ 50 mm). Obwohl die Dimensionen konform mit der DIN EN 1926 sind, empfiehlt die Norm entweder kubische oder zylindrische Proben mit 70 mm Höhe. Aufgrund der Tatsache, dass es sich bei den vorliegenden Proben jedoch immer noch um vergleichsweise niedrig poröse Gesteine handelt, sollten keine signifikanten Änderungen infolge der kleineren Probendimensionen auftreten (vgl. Stephenson & Traindafilidis 1974).

Die Durchführung des Versuchs sieht vor, dass die Probekörper parallel zur Mantelfläche des Zylinders bis zum Bruch der Probe belastet werden (Abb. 5.2a). Das Gesteinsversagen erfolgt dabei durch eine Kombination von Zugrissen und Scherrissen (Abb. 5.2a). Eine entscheidende Rolle spielen dabei diejenigen Minerale mit der geringsten mechanischen Festigkeit (Strohmeier 2003). Da während des Versuchs kein umschließender Druck auf die Mantelfläche des Probekörpers einwirkt, handelt es sich bei den Ergebnissen um die einaxiale Druckfestigkeit des Materials (σ_{ucs} , unconfined compressive strength). Der Wert für die einaxiale Druckfestigkeit errechnet sich aus der maximalen Bruchlast und der Stirnfläche des Zylinders nach Gleichung 7. Die Kraftzunahme während des Versuchs beträgt 1000 N/s.

Gleichung 7:
$$\sigma_{ucs} = \frac{F}{A}$$

σ_{ucs}	[MPa]	= einaxiale Druckfestigkeit
F	[kN]	= maximale Bruchlast
A	[cm ²]	= Stirnfläche des Probekörpers

Die Spaltzugfestigkeit (σ_t) des Probenmaterials wurde mittels des „Brasil-Tests“ ermittelt, in dessen Verlauf scheibenförmige bzw. zylindrische Prüfkörper durch eine Streifenlast längs zweier gegenüberliegender, gerader Mantellinien bis zum Bruch durch Spalten der Probe belastet werden (Abb. 5.2b). Aufgrund der auftretenden Kompressionskräfte gibt der Test die indirekte Spaltzugfestigkeit an. Ein Querschnitt durch die Belastungsfläche der Probe zeigt jedoch, dass lediglich in der Kontaktzone zwischen dem Probekörper und der Testvorrichtung die Horizontalspannung als Druckspannung entwickelt ist. Mehr als 70% des Probendurchmessers werden durch Zugspannungen kontrolliert, die senkrecht zur Belastungsrichtung auftreten (Abb. 5.2b).

Die Durchführung des Tests erfolgte in Anlehnung an die Empfehlung Nr. 10 des Arbeitskreises 19 „Versuchstechnik Fels“ (Gartung 1985) sowie in Anlehnung an die DIN 22024. Bei dem Test wurde eine Belastungsrate von 30 N/s gewählt, was in Bezug auf die Probendimension einer Spannungszunahme von 0.024 MPa/s entspricht. Aus der Maximalkraft während des Versagens der Probe kann zusammen mit den Prüfkörperabmessungen die Spaltzugfestigkeit nach Gleichung 8 berechnet werden.

$$\text{Gleichung 8: } \sigma_{SZ} = \frac{2 \cdot F}{d \cdot l \cdot \pi}$$

σ_{SZ}	[MPa]	= Spaltzugfestigkeit
F	[kN]	= maximale Bruchlast
l	[cm]	= Höhe des Probekörpers
d	[cm]	= Durchmesser des Probekörpers

Die Biegezugfestigkeit (σ_{BZ}) des Probenmaterials wurde in Anlehnung an DIN EN 12372 ermittelt. Die Norm sieht dabei vor, prismatische Probekörper (Länge x Breite x Höhe = 150 x 50 x 25 mm) zwischen zwei Auflagern zu platzieren und entlang der Mittellinie zu belasten (Abb. 5.2c). Durch die Belastung des Probekörpers in nur einer Richtung werden auf der konvexen Seite des Materials (Unterseite) Zugspannungen initiiert, während auf der konkaven Seite (Oberseite) Druckspannungen auftreten (Abb. 5.2c). Dies führt zu Scherspannungen entlang der Mittellinie. Um zu gewährleisten, dass das Versagen des Probekörpers auf reine Zug- bzw. Druckspannungen zurückgeht, muss die Scherspannung minimiert werden. Eine solche Minimierung erfolgt über ein definiertes Verhältnis zwischen der Abstandsweite des Auflagers und der Höhe des Probekörpers (Verhältnis 5:1). Die Biegezugfestigkeit errechnet sich schließlich nach Gleichung 9.

$$\text{Gleichung 9: } \sigma_{BZ} = \frac{3 \cdot F \cdot d}{2 \cdot w \cdot h^2}$$

σ_{BZ}	[MPa]	= Biegezugfestigkeit
F	[kN]	= maximale Bruchlast
d	[mm]	= Abstandsweite der Auflagers
w	[mm]	= Breite des Probekörpers
h	[mm]	= Höhe des Probekörpers

Die Abriebfestigkeit wurde wie in DIN 52108 beschrieben nach dem Boehme-Verfahren durchgeführt. Dabei wurden Probekörper mit quadratischer Grundfläche durch ein definiertes Gewicht auf eine Schleifscheibe gedrückt und mit Schleifmittel abgerieben (Abb. 5.3d). Das Gesteinsgefüge wird aufgrund von Scherrissen und Zugrissen durchgreifend entfestigt (Abb. 5.2d), wobei alle Minerale und Gefügeelemente zur Abriebfestigkeit beitragen (Strohmeyer 2003). Aufgrund der vorgeschriebenen Kontaktfläche zwischen Probe und Schleifscheibe, die mindestens 50 cm² betragen sollte, wurden Probendimensionen von 71 x 71 x 25 mm gewählt.

Die durch das Boehme-Verfahren ermittelten Daten geben den Materialverlust der Probe nach einer bestimmten Anzahl an Umdrehungen der Schleifscheibe wieder. Daher entsprechen relativ höhere Werte einer geringeren Abriebfestigkeit und relativ niedrige Werte einer höheren Abriebfestigkeit.

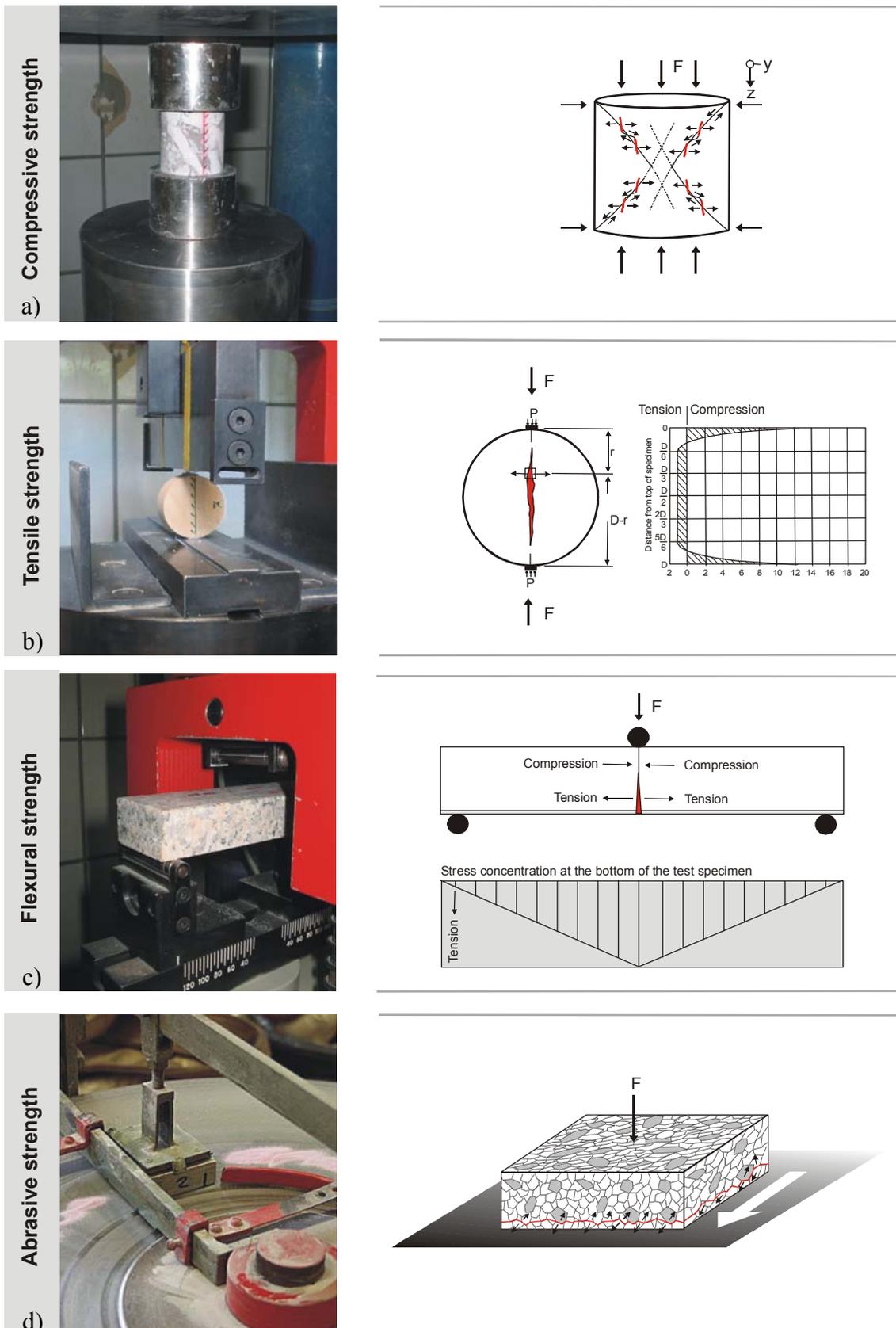


Abb. 5.2: Versuche zur Bestimmung der mechanischen Gesteinseigenschaften. a) Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit. Das Gesteinsversagen erfolgt durch eine Kombination von Zug- und Scherrissen. b) Bestimmung der Spaltzugfestigkeit. Das Gesteinsversagen erfolgt größtenteils durch Zugrisse. c) Bestimmung der Biegezugfestigkeit. Die Probe versagt infolge von Druck- und Zugspannungen. d) Bestimmung der Abriebfestigkeit. Einzelpartikel und Kornaggregate werden durch Scher- und Zugrisse von der Probe abgelöst.

5.3.3 Mechanische Eigenschaften des Probenmaterials

Die Druckfestigkeiten, Zugfestigkeiten und Abriebfestigkeiten des Probenmaterials sind zusammenfassend in Tabelle 5.6 angeführt.

5.3.3.1 Druckfestigkeiten und statischer E-Modul

In Bezug auf die mittleren Werte der Druckfestigkeiten für Granitoide, Gneise und den Hornblendit lässt sich zusammenfassen, dass die beiden Gneise die höchsten Festigkeiten innerhalb des Probenmaterials anzeigen. Die Maximalwerte der Lithologien reichen bis 195 MPa (PS-Grey) bzw. 229 MPa (HH-Grey). Die übrigen Gesteine mit Ausnahme der Probe BT-Violet, die mit 153 MPa vergleichsweise niedrige Druckfestigkeiten demonstriert, rangieren in einem Bereich von etwa 173 bis 185 MPa. Während sich der Monzodiorit BT-Black mit 174 MPa am unteren Bereich dieser Werteskala befindet, erreicht der Monzonit BT-Blue nahezu die Maximalwerte der Granite. Der Hornblendit PTC-Black reicht hinsichtlich seiner Druckfestigkeiten nicht einmal annähernd an die Mindestwerte der Granite, Monzonite und Monzodiorite. Mit einem Durchschnittswert von 125 MPa liegt das Gestein eher in der Größenordnung von Marmoren und Kalksteinen (Tab. 5.6).

Die mittleren Druckfestigkeiten der Marmore befinden sich mehrheitlich zwischen 112 und 123 MPa. Lediglich die beiden Lithologien PC-Red und PC-White zeigen mit 79 MPa und 87 MPa deutlich niedrigere Werte. Die Druckfestigkeiten der hier untersuchten Marmore werden von den zwei Kalksteinen MP-Yellow und KH-Red mit 123 MPa bzw. 125 MPa leicht überboten (Tab. 5.6).

Bei den Sandsteinen wird das Spektrum der mittleren Druckfestigkeiten durch die Varietäten S-White und S-Brown abgedeckt, die mit Druckfestigkeiten zwischen 86 MPa und 147 MPa einen recht heterogenen Bereich definieren (Tab. 5.6). Die Probe S-Brown, die den Maximalwert der Sandsteine erreicht, hebt sich dabei deutlich von den übrigen Vertretern der Sandsteine ab. Auffallend sind die mit 114 MPa recht hohen Werte der Varietät S-Rainbow, die aufgrund ihrer lithologisch ähnlichen Charakteristika zur Probe S-White entsprechend niedrigere Druckfestigkeiten aufweisen sollte.

Die hier angeführten Ergebnisse für die Druckfestigkeiten des Probenmaterials liegen innerhalb der Bandbreite der für die jeweiligen Lithologien zu erwartenden Werte (Abb. 5.3). Während die Marmore, Sandsteine und der Monzodiorit in der unteren Hälfte der Referenzwerte liegen, zeigen insbesondere die Gneise und der Monzonit vergleichsweise hohe Festigkeiten an, die die Gesteine als äußerst resistent gegenüber kompressiven Kräften ausweisen.

Die aus den Druckfestigkeiten ermittelten Werte zum statischen E-Modul zeigen mehrheitlich einen Trend, bei dem diejenigen Gesteine mit den höchsten Festigkeiten auch die höchsten Werte für den E-Modul anzeigen. Eine Ausnahme innerhalb der Granitoide und Gneise stellt dabei die Probe HH-Grey dar, da das Gestein maximale Druckfestigkeiten,

jedoch sehr niedrige Werte für den E-Modul kennzeichnen. Ein umgekehrtes Verformungsverhalten kann beim Hornblendit PTC-Black festgestellt werden. Bei den Sandsteinen fällt vorrangig die Probe PC-Green auf, die innerhalb der klastischen Gesteine zwar Druckfestigkeiten im mittleren Bereich aufweist, dabei aber durch den niedrigsten E-Modul gekennzeichnet ist (Tab. 5.7).

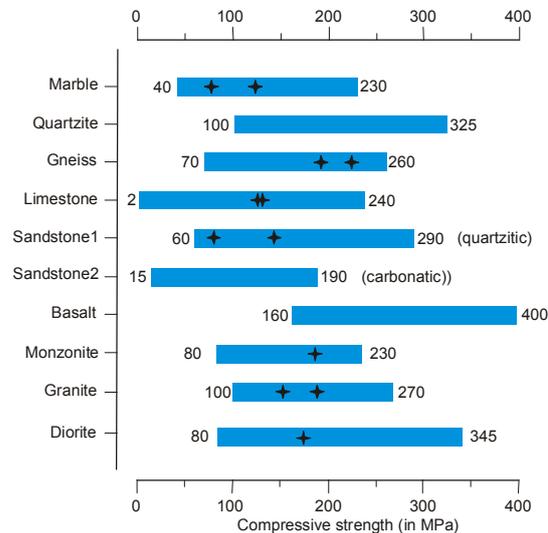


Abb. 5.3: Erwartungswerte für die Druckfestigkeiten von Naturwerksteinen (blaue Balken) nach Peschel (1983). Zwei schwarze Kreuze in dem Skalenbereich einer Gesteinsart kennzeichnen dabei die Maximal- bzw. Minimalwerte der entsprechenden thailändischen Lithologien. Für Monzonite und Monzodiorite liegt jeweils nur eine Probe vor (ein schwarzes Kreuz). Der Monzodiorit ist den Erfahrungswerten der Diorite zugordnet.

5.3.3.2 Spaltzugfestigkeiten

Die ermittelten Durchschnittswerte der Spaltzugfestigkeit variieren bei den Granitoiden, Gneisen und dem Hornblendit zwischen 6.8 MPa und 13.8 MPa (Tab. 5.6). Da der Minimalwert durch den Hornblendit PTC-Black und der Maximalwert durch den Monzodiorit BT-Black repräsentiert werden, demonstrieren beide mafischen Gesteine ein vollkommen gegensätzliches Materialverhalten. Auffallend sind die Ergebnisse der vier Gesteine BT-Violet, BT-Blue, MT-Orange1 und MT-Orange2. Alle vier Varietäten sind in Lagerstätten der Region Tak beheimatet und mit mittleren Spaltzugfestigkeiten zwischen 8 und 9 MPa im unteren Bereich der Festigkeiten granitoider Proben angesiedelt. Die Spaltzugfestigkeiten der Gneise liegen sehr dicht beieinander und sind mit 10.4 MPa bzw. 10.9 MPa vergleichbar mit den Höchstwerten der Granite (Tab. 5.6).

Die Spaltzugfestigkeiten der untersuchten Carbonatgesteine signalisieren eine erhebliche Streuung der Ergebnisse, auch wenn diese deutlicher eingegrenzt ist als bei den Magmatiten. Maximalwerte werden von den beiden Proben TS-Pink und PK-Grey mit 8.8 bzw. 8.9 MPa repräsentiert, deren Festigkeiten dabei mindestens 1.5 MPa über denen der übrigen Marmore liegen (Tab. 5.6). Die niedrigsten Angaben wurden mit 4.8 MPa für den Marmor PC-White ermittelt, der damit im Vergleich zu Referenzwerten für vergleichbare Lithologien nicht

einmal die untersten Erfahrungswerte erreicht (Abb. 5.4). Die Spaltzugfestigkeiten der Kalksteine befinden sich mit 5.8 MPa (MP-Yellow) und 8.5 MPa (KH-Red) am unteren bzw. oberen Ende der für die Marmore ermittelten Ergebnisse (Tab. 5.6).

Die Spaltzugfestigkeiten der Sandsteine reichen bis maximal 8.7 MPa. Der Wert wurde für die Subarkose S-Brown ermittelt, die bereits durch ihre ausgesprochen hohen Druckfestigkeiten aufgefallen ist. Die übrigen Subarkosen S-White, S-Rainbow und S-Yellow zeigen deutlich niedrigere Werte an, die bis 7 MPa reichen und damit noch über den Spaltzugfestigkeiten der Arkosen S-Red und PC-Green liegen. Beide Arkosen zeichnen sich durch relativ gleiche Festigkeiten von 5.8 bzw. 5.7 MPa aus (Tab. 5.6).

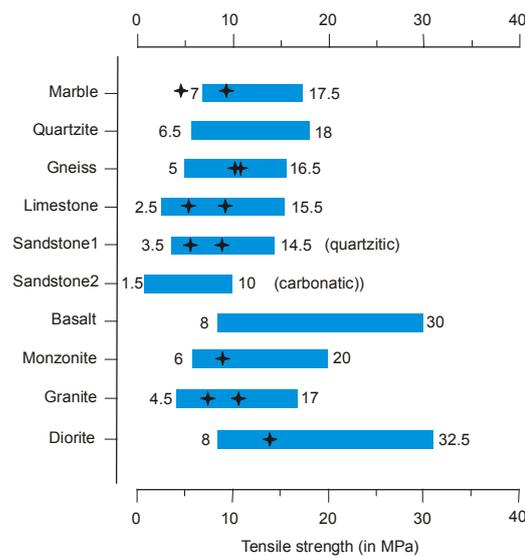


Abb. 5.4: Erwartungswerte für die Spaltzugfestigkeiten von Naturwerksteinen (blaue Balken) nach Peschel (1983). Zwei schwarze Kreuze in dem Skalenbereich einer Gesteinsart kennzeichnen dabei die Maximal- bzw. Minimalwerte der entsprechenden thailändischen Lithologien. Für Monzonite und Monzodiorite liegt jeweils nur eine Probe vor (ein schwarzes Kreuz). Der Monzodiorit ist den Erfahrungswerten der Diorite zugordnet.

5.3.3.3 Biegezugfestigkeiten

Die Mittelwerte der Biegezugfestigkeiten für Granitoide und Gneise bewegen sich in einem Bereich zwischen 14.6 MPa und 28.3 MPa (Tab. 5.6). Minimal- und Maximalwerte werden dabei durch den Granit BT-Violet (Minimalwert) und den Monzodiorit BT-Black (Maximalwert) repräsentiert. Das Ergebnis des Monzodiorits erscheint recht hoch, befindet sich aber dennoch deutlich im unteren Bereich der für Diorite möglichen Festigkeiten (Abb. 5.5). Eine hohe Festigkeit zeigt ebenfalls der Granit SP-Grey, der mit Werten von 25.1 MPa an den Maximalwert des Monzodiorits BT-Black heranreicht. Wie sich bereits bei den Druck- und Spaltzugfestigkeiten angedeutet hat, zeichnet sich der Hornblendit auch hinsichtlich des Biegezugverhaltens durch sehr niedrige Festigkeiten aus. Das Materialversagen der Probekörper erfolgte hier bei durchschnittlich 11.5 MPa.

Die Biegezugfestigkeiten der Marmore reichen von 8.4 MPa bis 25.3 MPa, wobei ein ähnliches Verteilungsmuster wie bei den Spaltzugfestigkeiten zu beobachten ist, bei dem die Probe PK-Grey die höchsten Werte und die Probe PC-White die niedrigsten Werte aufzeigt (Tab. 5.6). Anders jedoch als bei den Spaltzugfestigkeiten werden bei den Biegezugfestigkeiten Werte erreicht, die in der Größenordnung der Granite und des Monzodiorits liegen. Auffallend hinsichtlich der Festigkeiten innerhalb der Marmorproben ist, dass die beiden Proben TS-Grey und TS-Pink, die bezüglich der Spaltzugfestigkeiten noch im Mittelfeld rangieren bzw. mit die höchsten Festigkeiten demonstrieren, durch deutlich geringere Biegezugfestigkeiten gekennzeichnet sind. Den ermittelten Daten nach verhalten sich beide Marmore ähnlich instabil wie die mechanisch schwache Probe PC-White. Der untersuchte Kalkstein liegt mit 14.7 MPa in der Größenordnung der quarzreichen Sandsteine.

Bei der Ergebnisverteilung für die Biegezugfestigkeiten der Sandsteine ist festzustellen, dass erneut die Subarkosen diejenigen Varietäten sind, die sich durch die höchsten Werte auszeichnen. Während die Zugfestigkeit der Gesteine erst bei durchschnittlichen 11.3 MPa (S-Rainbow), 13.9 (S-Yellow) oder 16.7 MPa (S-Brown) überschritten wird, zeigen die Arkosen S-Red und PC-Green ein wesentlich früheres Materialversagen, das bei 9.3 MPa (S-Red) bzw. 10.7 MPa (PC-Green) einsetzt (Tab. 5.6). Die Gesteine befinden sich damit am unteren Limit der für quarzitisches gebundene Sandsteine üblichen Festigkeiten (Abb. 5.5)

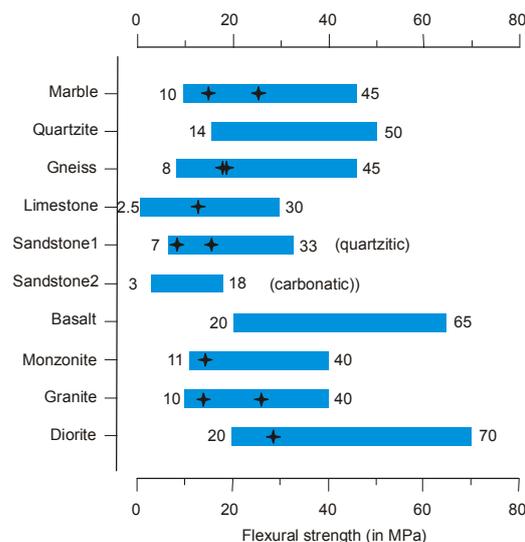


Abb. 5.5: Erwartungswerte für die Biegezugfestigkeiten von Naturwerksteinen (blaue Balken) nach Peschel (1983). Zwei schwarze Kreuze in dem Skalenbereich einer Gesteinsart kennzeichnen dabei die Maximal- bzw. Minimalwerte der entsprechenden thailändischen Lithologien. Für Monzonite und Monzodiorite liegt jeweils nur eine Probe vor (ein schwarzes Kreuz). Der Monzodiorit ist den Erfahrungswerten der Diorite zugordnet.

5.3.3.4 Abriebfestigkeiten

Die Mittelwerte für den abrasiven Materialverlust der felsischen Granitoide und Gneise decken einen Bereich zwischen $4.01 \text{ cm}^3/50\text{mm}^2$ (MT-Orange1) und $4.81 \text{ cm}^3/50\text{mm}^2$ (BT-Blue) ab (Tab. 5.6). Damit wird das Spektrum der Werte im unteren Bereich durch einen

Granit, im oberen Bereich durch einen Monzonit definiert. Die Gneise liegen mit ihren Materialverlusten im Mittelfeld dieses Bereichs. Wie zu erwarten sind beide mafischen Gesteine aufgrund ihrer mehrheitlich gut spaltfähigen Minerale durch wesentlich höhere Materialverluste gekennzeichnet, was eine relativ niedrigere Abriebfestigkeit der Lithologien im Vergleich zu Graniten oder Gneisen impliziert. Auffallend ist, dass der Quarz-Monzodiorit BT-Black mit einem Substanzverlust von $8.39 \text{ cm}^3/50\text{mm}^2$ eine noch niedrigere Abriebfestigkeit als der quarzlose Hornblendit PTC-Black aufweist, der durch einen Werte von $7.10 \text{ cm}^3/50\text{cm}^2$ charakterisiert ist (Tab. 5.6). Die höhere Abriebfestigkeit des PTC-Black ist vermutlich auf fein verteilte Pyritmineralisationen zurückzuführen, die einen resistenteren Charakter als die Quarzanteile des BT-Black besitzen. Beide mafischen Gesteine befinden sich damit im unteren Bereich der für beispielsweise Diorite verwirklichten Werte (Abb. 5.6).

Die untersuchten Marmore haben nach Beendigung der Versuche im Allgemeinen zwischen $10.84 \text{ cm}^3/50\text{mm}^2$ (TS-Pink) und $25.01 \text{ cm}^3/50\text{mm}^2$ (PC-White) Material verloren (Tab. 5.6). Obwohl der Marmor PC-White damit eine extrem niedrige Abriebfestigkeit aufweist, befindet sich das Gestein jedoch immer noch im Bereich der für Marmore typischen Werte. Ausgesprochen positiv erscheint dagegen das Ergebnis des Marmors TS-Grey, der gegenüber abrasiv wirkenden Kräften eine signifikant hohe Resistenz aufweist und damit sogar die von Peschel (1983) angeführten Richtwerte deutlich unterschreitet (Abb. 5.6).

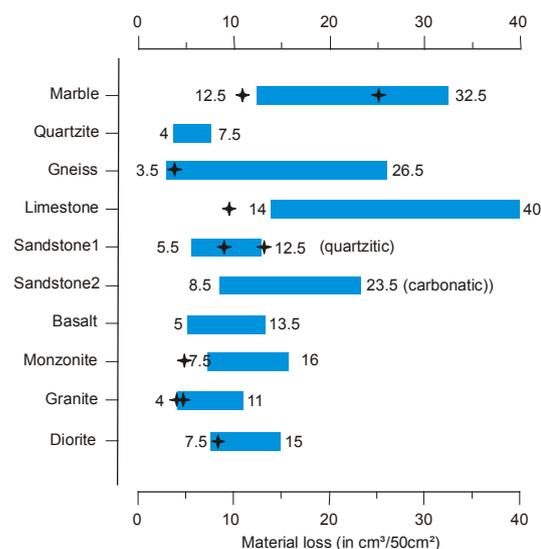


Abb. 5.6: Erwartungswerte für den Materialverlust durch Abrieb von Naturwerksteinen (blaue Balken) nach Peschel (1983). Zwei schwarze Kreuze in dem Skalenbereich einer Gesteinsart kennzeichnen dabei die Maximal- bzw. Minimalwerte der entsprechenden thailändischen Lithologien. Für Monzonite und Monzodiorite liegt jeweils nur eine Probe vor (ein schwarzes Kreuz). Der Monzodiorit ist den Erfahrungswerten der Diorite zugordnet.

Innerhalb des Sandstein-Probeninventars wurden lediglich drei Proben getestet, die sich durch eine unterschiedliche Korngröße bzw. Mineralogie voneinander unterscheiden. Die Probe S-Rainbow kennzeichnet dabei der geringste Materialverlust mit $9.60 \text{ cm}^3/50\text{mm}^2$. Maximale Verluste von $12.86 \text{ cm}^3/50\text{mm}^2$ wurden bei der Probe PC-Green beobachtet, die damit nicht mehr in dem für quarzitisches Sandsteine üblichen Wertebereich rangiert (Abb. 5.6).

Tab. 5.6: Mechanische Eigenschaften ausgewählter Proben. Angegeben sind jeweils die Durchschnittswerte ($\bar{\sigma}$) sowie die Anisotropien (A) der Druckfestigkeiten (R), Spaltzugfestigkeiten (R_{SZ}), Biegezugfestigkeiten (R_{BZ}) und Materialverluste infolge von Abrieb.

	R [MPa]		R_{SZ} [MPa]		R_{BZ} [MPa]		Abrieb [$\text{cm}^3/50\text{cm}^2$]	
	$\bar{\sigma}$	A	$\bar{\sigma}$	A	$\bar{\sigma}$	A	$\bar{\sigma}$	A
Granitoide								
BT-White	183.66	14.0	10.58	14.4	19.72	19.7	4.69	6.8
BT-Black	174.49	4.0	13.84	14.9	28.32	15.0	8.39	11.9
BT-Violet	153.21	37.7	8.61	20.1	14.61	38.7	4.19	3.2
BT-Blue	183.97	5.0	8.49	25.4	14.76	21.4	4.81	6.2
BN-Pink	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
SN-Blue	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
MT-Orange1	184.86	25.8	8.90	29.2	16.91	40.5	4.01	7.2
MT-Orange2	159.90	9.3	8.58	22.1	15.35	22.2	n/a	n/a
NB-Orange	173.34	22.1	10.31	13.1	19.17	26.2	4.32	5.0
MC-Yellow	n/a	n/a	7.32	14.4	n/a	n/a	n/a	n/a
SP-Grey	n/a	n/a	11.43	27.9	25.05	12.3	4.03	11.6
Gneise								
PS-Grey	194.61	4.4	10.86	18.9	19.08	20.5	4.49	8.7
HH-Grey	228.71	2.7	10.44	36.6	18.48	37.5	4.41	2.6
Hornblendit								
PTC-Black	125.45	8.8	6.82	40.2	11.52	32.5	7.1	14.8
Marmore								
PK-Pink	114.73	37.8	7.37	34.5	n/a	n/a	n/a	n/a
PK-Grey	122.14	46.8	8.92	44.4	25.32	59.9	15.01	13.0
BTD-White	111.69	37.9	7.05	30.0	17.91	58.4	16.58	9.7
TS-Grey	122.77	22.2	6.88	21.6	12.56	49.6	11.22	10.1
TS-Pink	115.70	18.1	8.83	23.8	10.72	37.5	10.84	8.2
PC-Red	87.42	19.2	6.30	7.8	10.22	45.9	15.95	15.6
PC-White	79.39	12.7	4.80	18.9	8.40	14.3	25.01	13.4
PC-Grey	n/a	n/a	5.84	13.1	n/a	n/a	n/a	n/a
Kalksteine								
MP-Yellow	123.03	5.6	5.79	14.1	n/a	n/a	n/a	n/a
KH-Red	125.35	6.4	8.47	18.9	14.71	11.0	9.94	9.1
Subarkosen								
S-Brown	147.48	20.5	8.69	7.7	16.65	35.5	9.93	9.6
S-Yellow	99.60	12.5	6.92	25.9	13.88	39.1	n/a	n/a
S-White	85.64	7.4	6.49	22.2	n/a	n/a	n/a	n/a
S-Rainbow	113.88	5.0	6.20	31.0	11.32	37.4	9.60	3.3
Arkosen								
PC-Green	103.23	20.0	5.71	25.2	10.74	39.2	12.86	28.3
S-Red	94.23	n/a	5.84	16.0	9.32	33.1	n/a	n/a

Tab. 5.7: Ergebnisse des statischen E-Moduls, ermittelt aus den Druckfestigkeiten ausgewählter Proben.

	Statischer E-Modul [GPa]			Anisotropie
	x-Richtung	y-Richtung	z-Richtung	
Granitoide				
BT-White	31.17	25.58	27.54	17.9
BT-Black	24.33	28.08	25.46	13.4
BT-Violet	27.36	16.58	25.60	39.4
BT-Blue	28.77	29.52	27.39	7.2
BN-Pink	n/a	n/a	n/a	n/a
SN-Blue	n/a	n/a	n/a	n/a
MT-Orange1	27.21	26.29	30.87	14.8
MT-Orange2	21.43	30.72	22.22	30.2
NB-Orange	25.55	24.87	23.35	8.6
MC-Yellow	n/a	n/a	n/a	n/a
SP-Grey	n/a	n/a	n/a	n/a
Gneise				
PS-Grey	28.39	29.96	29.38	5.2
HH-Grey	28.09	20.71	24.91	26.3
Hornblendit				
PTC-Black	26.79	25.53	33.84	24.6
Marmore				
PK-Pink	23.26	13.04	23.35	44.2
PK-Grey	29.58	32.29	29.35	9.1
BTD-White	28.12	24.31	30.27	19.7
TS-Grey	30.64	26.91	25.16	17.9
TS-Pink	28.35	20.25	28.65	29.3
PC-Red	19.50	19.66	28.36	31.2
PC-White	21.30	21.16	19.52	8.4
PC-Grey	n/a	n/a	n/a	n/a
Kalksteine				
MP-Yellow	29.16	25.46	33.21	23.3
KH-Red	36.04	19.54	24.14	45.8
Subarkosen				
S-Brown	19.97	18.95	16.33	5.1
S-Yellow	14.03	15.87	16.82	16.6
S-White	16.38	14.72	13.64	16.7
S-Rainbow	19.06	18.18	17.86	6.3
Arkosen				
PC-Green	12.28	12.99	15.17	19.1
S-Red	n/a	n/a	n/a	n/a

5.4 Dehnungseigenschaften

5.4.1 Die Bedeutung der Kennwerte in der bautechnischen Anwendung

Dehnungseigenschaften eines Naturwerksteins sind ein entscheidender Parameter der Materialcharakteristik, der genau erfasst und bewertet werden muss. Zahlreiche Naturwerksteine weisen eine Verwitterungssensibilität gegenüber thermischer Beanspruchung auf, die sich in einer Ausdehnung des Materials bei Temperaturerhöhung sowie in einer Kontraktion bei darauf folgender Abkühlung ausdrückt. Die bautechnische Verwendung eines Werksteins als z.B. Fassadenplatte oder Fußbodenbelag setzt daher eine standardmäßige Einschätzung des Materialverhaltens unter thermischer Beanspruchung voraus, um in Verbindung mit den zu erwartenden Temperaturschwankungen in oder am Bauwerk grundlegende technische Aspekte wie etwa die minimale Fugenbreite zwischen einzelnen Naturwerksteinplatten zu berechnen. Von großer Bedeutung sind diese Eigenschaften, wenn im Falle intensiver Sonneneinwirkung auf ein Gebäude überdurchschnittlich hohe Temperaturen einwirken. Im urbanen Umfeld ist es keine Seltenheit, dass die Temperaturen auf der Oberfläche dunkler Gesteine bis zu 70 °C erreichen (Snethlage 1984). In dieser Größenordnung lassen sich bereits deutlich nachweisbare Dehnungsbeträge erkennen.

Eine weitere Bedeutung für die bautechnische Anwendung besitzt die Richtungsabhängigkeit der thermischen Dehnung, da die Hauptdehnungsrichtung einiger Gesteinsarten wie z.B. Marmor Beträge aufweisen kann, welche die der beiden übrigen Dehnungsrichtungen um das Dreifache übersteigen (siehe dazu auch Kap. 5.4.2).

Unter dem Einfluss von Feuchtigkeit weisen Naturwerksteine auch eine hygrische Dehnung auf, die durch eine Volumenvergrößerung quellfähiger Tonminerale zu einem Spannungsaufbau im Inneren des Gesteins und zum Ablösen ganzer Gesteinspartien führen kann. Während Marmore in dieser Hinsicht wenig anfällig sind und nur eine sehr geringe Dehnung aufweisen, können hingegen Tuffe oder Sandsteine eine sehr große Sensibilität gegenüber Feuchte zeigen (z.B. Ruedrich et al. 2005).

5.4.2 Methodik

Bevor an dieser Stelle die Methodik zur Untersuchung des Dehnungsverhaltens von Naturwerksteinen dargelegt wird, sollen zunächst kurz die Ursachen für die thermische Sensibilität, hier insbesondere die der Marmore, näher erörtert werden. Im Gegensatz zu granitoiden Gesteinen, bei denen die thermische Dehnung auf Dehnungseigenschaften mehrerer Minerale beruht, geht die temperaturbedingte Längenänderung bei Carbonatgesteinen im Allgemeinen auf die extremen thermischen Eigenschaften der Hauptkomponente Calcit, untergeordnet auch auf die des Dolomits, zurück. Der Ausdehnungskoeffizient (α) von Calcit unterscheidet sich dabei wesentlich von dem anderer gesteinsbildender Minerale, da sich ein Calcit-Einkristall bei zunehmender Temperatur in

Richtung der kristallographischen c-Achse ausdehnt ($\alpha = 26.0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) und senkrecht dazu in Richtung der a-Achsen zusammenzieht ($\alpha = -6.0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) (Kleber 1990). Bei Abkühlung der Mineralphase vollzieht sich dieser Prozess entsprechend umgekehrt (Abb. 5.7).

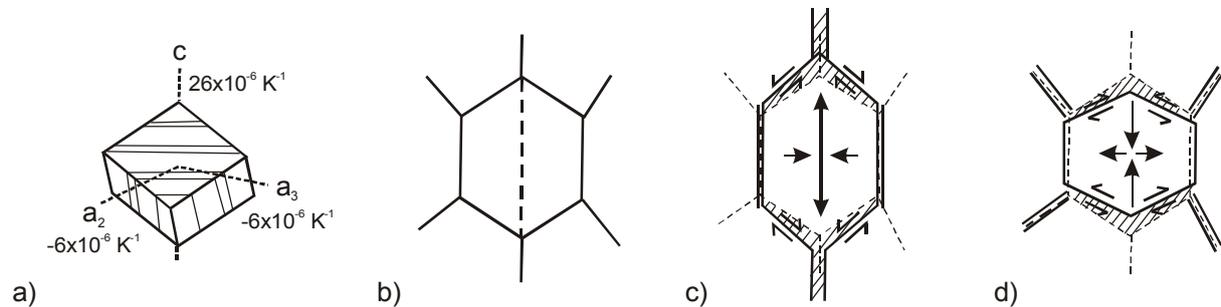


Abb. 5.7: Thermisches Dehnungsverhalten von Calcit (aus Rüdlich 2003). a) Ausdehnungskoeffizienten von Calcit (nach Kleber 1990) parallel zu den kristallographischen c- und a-Achsen am Beispiel eines Spaltrhomboeders. b) Schematische Darstellung eines Calcitkristalls im Ausgangszustand vor thermischer Beanspruchung. c) Ausdehnung des Kristalls parallel zur c-Achse bei Erwärmung. d) Kontraktion des Kristalls parallel zur c-Achse bei Abkühlung.

Während sich einige Marmore in alle Richtungen gleich stark ausdehnen und damit ein isotropes Dehnungsverhalten aufweisen, kann bei anderen Marmoren ein anisotropes Dehnungsverhalten beobachtet werden, bei dem sich das Material in verschiedene Richtungen unterschiedlich stark ausdehnt. Insbesondere Calcit-Marmore können ein stark anisotropes Dehnungsverhalten zeigen. Die Anisotropie des Dehnungsverhaltens kann bei Marmoren variable Grundmuster zeigen, die von der Textur des jeweiligen Materials abhängig sind (Siegesmund et al. 1997; Leiss & Ullemeyer 1999; Siegesmund et al. 1999, 2000). Im Falle eines idealen c-Achsenfasertyps ist das Dehnungsverhalten in den drei Hauptrichtungen durch zwei etwa gleiche Beträge und einen deutlich höheren Dehnungsbetrag charakterisiert ($\epsilon_1 > \epsilon_2 = \epsilon_3$) (Abb. 5.8a). Ist die Textur dagegen durch einen idealen a-Achsenfasertyp mit gürtelartiger c-Achsenverteilung gekennzeichnet, so lässt sich das Dehnungsverhalten mit $\epsilon_1 = \epsilon_2 > \epsilon_3$ beschreiben (Abb. 5.8b). In der Natur ist häufiger ein Übergang dieser beiden Marmortexturen zu beobachten, weshalb viele Marmore ein Verhalten zeigen, bei dem sich alle drei Richtungen unterschiedlich stark ausdehnen. Dieser intermediäre Fasertyp ist dabei entsprechend durch $\epsilon_1 > \epsilon_2 > \epsilon_3$ gekennzeichnet (Abb. 5.8c). Eine schwach ausgeprägte Textur entspricht häufig einer Zufallsverteilung der c-Achsenorientierung, was sich in nahezu isotropem Materialverhalten mit $\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon_3$ äußert (Abb. 5.8d).

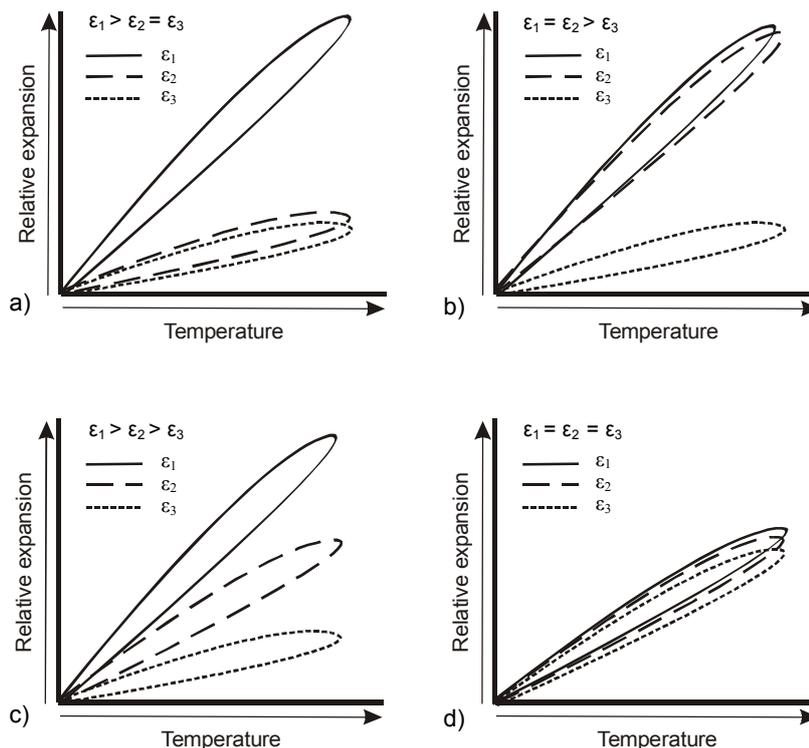


Abb. 5.8: Grundmuster des thermischen Längenänderungsverhaltens von Marmor, definiert durch unterschiedliche Vorzugsorientierungen der kristallographischen Achsen. a) Dehnungsverhalten eines idealen c-Achsenfasertyps. b) Dehnungsverhalten eines idealen a-Achsenfasertyps. c) Dehnungsverhalten einer Übergangsform zwischen c-Achsen- und a-Achsenfasertyps. d) Dehnungsverhalten bei einer richtungslosen Orientierung der c-Achsen.

Die thermische Beanspruchung der Carbonatgesteine führt zu Spannungen entlang von Korngrenzen und anderen Schwächezonen im Kristallverband sowie zu einer bleibenden Gefügeentfestigung durch die Ausbildung von Mikrorissen. Verschiedene Autoren (siehe z.B. Richter & Simmons 1974, Bauer & Johnson 1979, Glover et al. 1995) konnten eine durch thermische Dehnung hervorgerufene Rissbildung auch bei Magmatiten nachweisen. Doch anders als bei granitoiden Gesteinen, die nach der Abkühlung wieder zu ihrer Ausgangslänge zurückkehren, können Marmore durch die thermische bedingte Rissbildung eine permanente Längenänderung während bzw. nach einer thermischen Beanspruchung erfahren (siehe Zezza et al. 1985, Sage 1988, Tschegg et al. 1999, Siegesmund et al. 2000). Battaglia et al. (1993) ermittelten für Marmore eine signifikante Restdehnung, die sich bereits bei Temperaturänderungen von 20°C auf 50°C ergeben hat. Die thermisch induzierte Rissbildung bei Marmoren kann sich demnach schon in gemäßigten mitteleuropäischen Klimaten entwickeln und auch hier zu einer deutlichen Verringerung der Gesteinsfestigkeit sowie zu einer Einschränkung des Verwendungszweckes führen (siehe Ondrasina et al. 2002).

Das Dehnungsverhalten von Marmoren lässt sich daher neben isotropen und anisotropen Eigenschaften noch zusätzlich hinsichtlich seiner Restdehnung charakterisieren. Nach Weiss et al. (2003) lassen sich diesbezüglich vier Kategorien zusammenfassen: isotropes Dehnungsverhalten ohne Restdehnung (Abb. 5.9a), anisotropes Dehnungsverhalten ohne

Restdehnung (Abb. 5.9b), isotropes Dehnungsverhalten mit Restdehnung (Abb. 5.9c) und anisotropes Dehnungsverhalten mit Restdehnung (Abb. 5.9d).

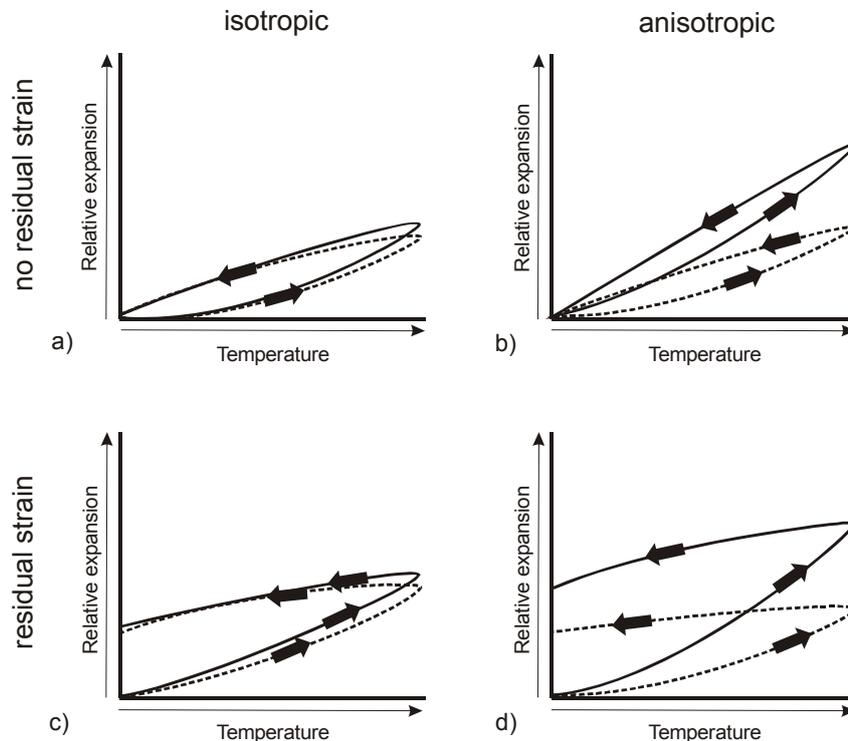


Abb. 5.9: Vier unterschiedliche Dehnungsverhalten auf der Grundlage von Anisotropie und Restdehnung (aus Weiss et al. 2003). a) Isotropes Materialverhalten ohne Restdehnung. b) Anisotropes Materialverhalten ohne Restdehnung. c) Isotropes Materialverhalten mit Restdehnung. d) Anisotropes Materialverhalten mit Restdehnung.

Für die Bestimmung des thermischen Dehnungsverhaltens des Probenmaterials wurden zylindrische Prüfkörper (\varnothing 15 mm/ 50 mm) in Bezug auf die drei Raumrichtungen präpariert. Die Untersuchungen wurden an einem Dilatometer durchgeführt, das Längenänderungen des Probenmaterials mittels inkrementaler Messtaster registriert. Die thermische Dehnung wird dabei als Funktion der Temperatur angegeben, die während des Heizzyklus von 20 auf 90°C ansteigt und nach der Abkühlung wieder die Ausgangsbedingungen von 20°C erreicht. Das gesamte Equipment besitzt eine Genauigkeit von 1 μ m und ermöglicht die simultane Messung von insgesamt fünf Proben. Dadurch können verschiedene Richtungen eines Gesteins unter exakt denselben Bedingungen thermisch beansprucht werden. Weitere Details sind ausführlich bei Strohmeyer (2003) beschrieben.

Die Daten der thermischen Dehnung werden gewöhnlich als Ausdehnungskoeffizient (α) entsprechend der Gleichung 10 präsentiert. Die Volumenzunahme der Probekörper wird jedoch anschaulicher, wenn der Wert ε angegeben wird (Gleichung 11), der die absolute Längenänderung des Probekörpers pro Meter widerspiegelt.

Gleichung 10:

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l \cdot \Delta T}$$

α [K ⁻¹]	= Ausdehnungskoeffizient
Δl [mm]	= Längenänderung
ΔT [K ⁻¹]	= Temperaturänderung
l [mm]	= Probenlänge

Gleichung 11:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l [mm]}{l [m]}$$

ε [mm/m]	= Längenänderung pro Meter
Δl [mm]	= Längenänderung
l [m]	= Probenlänge

Hygrische Dilatationen des Probenmaterials, also Änderungen der ursprünglichen Länge durch den Einfluss von Feuchtigkeit, wurden mittels zylindrischer Probekörper (Ø 15 mm/ 50 mm) erfasst, die in einem Bassin mit Wasser bedeckt wurden. Die Volumenzunahme der Prüfkörper wurde wie bei der thermischen Beanspruchung durch inkrementale Messtaster ermittelt und gemäß Gleichung 11 auf eine Längenänderung pro Meter umgerechnet.

5.4.3 Dehnungseigenschaften des Probenmaterials

Die thermischen Dehnungseigenschaften des Probenmaterials sind in Tabelle 5.8 zusammengefasst. Das arithmetische Mittel der Ausdehnungskoeffizienten (α) aus den Richtungen x, y und z liegt für die untersuchten Granitoide in einem Bereich zwischen $\alpha_{20-90} = 7.20 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (BT-White, x-Richtung) und $\alpha_{20-90} = 9.32 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (MT-Orange2, z-Richtung). Die Längenänderung der beiden Gesteine zeichnet sich gleichzeitig durch eine relativ hohe Richtungsabhängigkeit aus, die mit Anisotropieanteilen von $A = 8.7 \%$ bzw. $A = 10.0 \%$ deutlich über denen anderer Granitoide, beispielsweise denen des Granits NB-Orange liegt. Dieser zeigt mit lediglich 0.6% ein nahezu isotropes Dehnungsverhalten. Die beiden Gneise charakterisieren recht differenzierte Dehnungseigenschaften, was sich in den deutlich unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten ausdrückt, die teilweise unter denen der Granitoide liegen. Darüber hinaus zeigen beide Gesteine recht unterschiedliche Anisotropien. Den Hornblendit kennzeichnet mit $\alpha_{20-90} = 6.64 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ der niedrigste Ausdehnungskoeffizient der Gruppe. Alle Granitoide, Gneise und der Hornblendit erreichen nach erfolgter Aufheizung und Abkühlung wieder ihre Ausgangslänge, so dass keine schädigende Restdehnung des Materials zurückbleibt.

Im Gegensatz dazu zeigen zwei der untersuchten Marmorproben (PC-Red, PC-White) eine bleibende Verformung nach Beendigung des Temperaturzyklus, die im Vergleich zu anderen Marmortypen sogar recht hoch ist. Die Beträge der Restdehnung liegen bei 0.2 mm/m für den Marmor PC-Red bzw. bei 0.3 mm/m für den Marmor PC-White. Die Ausdehnungskoeffizienten der beprobten Marmore reichen insgesamt von $\alpha = -0.60 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (PK-Grey, x-Richtung) bis $\alpha = 13.9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (PC-White, z-Richtung). Das sehr unterschiedliche Dehnungsverhalten hinsichtlich der drei Raumrichtungen führt bei einigen Proben, insbesondere PK-Pink, PK-Grey und BT-D-White zu einer ausgesprochen hohen

Richtungsabhängigkeit, die aufgrund der negativen Ausdehnungskoeffizienten, also aufgrund einer Kontraktion des Materials während der Aufheizung, Anisotropiewerte über 100 % erreicht. Die beiden Kalksteine sind durch relativ geringere Ausdehnungskoeffizienten charakterisiert, die recht einheitlich zwischen $\alpha = 4.11 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ und $\alpha = 4.69 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ liegen. Keiner der untersuchten Kalksteine weist nach der Abkühlungsphase eine Restdehnung auf.

Die Ausdehnungskoeffizienten der Arkosen variieren innerhalb eines Bereichs von $\alpha = 11.13 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (S-White, y-Richtung) und $\alpha = 12.66 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (S-Brown, y-Richtung). Deutlich niedrigere Werte verzeichnen die Subarkosen mit beispielsweise $\alpha = 8.25 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (PC-Green, y-Richtung) bzw. $\alpha = 8.64 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (S-Red, z-Richtung). Nach der Versuchsdurchführung konnte festgestellt werden, dass drei der Proben nicht zu ihrer ursprünglichen Ausgangslänge zurückkehrten. Die Beträge sind jedoch relativ gering und stellen eher messtechnische Einflüsse anstelle einer Hysterese dar.

Die hygrische Dehnung des Probenmaterials wurde lediglich für die sechs Sandsteinproben ermittelt (Tab. 5.9), da diese wegen ihres wesentlich höheren Tonmineralgehaltes im Vergleich zu Marmoren oder Granitoiden die höchsten Längenänderungen unter dem Einfluss von Feuchte aufweisen sollten. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die hygrische Dehnung sehr deutlich bei den Arkosen PC-Green ($<1.34 \text{ mm/m}$) und S-Red ($<0.76 \text{ mm/m}$) bemerkbar macht. Die maximalen Beträge werden dabei jeweils in z-Richtung, also senkrecht zur sedimentären Schichtung erreicht. Weiterhin ließen sich merkbare Dehnungen für die Proben S-Yellow und S-White registrieren, auch wenn die Beträge ($<0.11 \text{ mm/m}$, z-Richtung) bei diesen Varietäten deutlich geringer ausfallen.

Tab. 5.8: Ausdehnungskoeffizienten α und maximale Restdehnung für ausgewählte Proben.

	Ausdehnungskoeffizient α [$\cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$]				Max. Restdehnung [mm/m]
	x-Richtung	y-Richtung	z-Richtung	Anisotropie	
Granitoide					
BT-White	7.20	7.99	7.51	10.0	---
BT-Black	7.73	7.64	8.55	10.6	---
BT-Violet	8.21	8.18	8.26	0.9	---
BT-Blue	7.97	7.58	7.24	9.1	---
MT-Orange1	9.07	8.14	8.60	10.2	---
MT-Orange2	8.51	8.72	9.32	8.7	---
NB-Orange	8.60	8.55	8.59	0.6	---
SP-Grey	7.52	7.74	7.73	2.8	---
MC-Yellow	8.38	8.98	8.43	6.7	---
Gneise					
PS-Grey	8.95	8.82	9.00	2.0	---
HH-Grey	6.61	7.26	6.82	9.0	---
Hornblendit					
PTC-Black	7.29	7.20	6.64	9.0	---
Marmore					
PK-Pink	3.45	-0.04	12.70	100.3	---
PK-Grey	-0.60	2.20	11.70	105.1	---
BTD-White	-0.05	2.60	8.34	100.6	---
TS-Grey	1.91	7.89	4.55	75.8	---
TS-Pink	2.31	n/a	7.81	n/a	---
PC-Red	16.20	6.55	9.02	59.6	0.2 (x-Richtung)
PC-White	10.90	12.30	13.90	21.6	cc. 0.3 (alle Richtungen)
PC-Grey	n/a	n/a	n/a	n/a	---
Kalksteine					
MP-Yellow	4.36	4.69	4.18	10.9	---
KH-Red	4.21	4.18	4.11	2.4	---
Subarkosen					
S-Brown	11.93	12.66	12.50	5.8	---
S-Yellow	11.51	11.37	12.10	6.0	---
S-White	11.44	11.13	11.26	2.7	(-0.09)
S-Rainbow	12.15	11.95	12.45	4.0	---
Arkosen					
PC-Green	8.91	8.25	8.45	7.4	(-0.09)
S-Red	9.56	8.89	8.64	9.6	(-0.11)

Tab. 5.9: Hygrische Dehnung der Sandsteine.

	Längenänderung [mm/m]			
	<i>x-Richtung</i>	<i>y-Richtung</i>	<i>z-Richtung</i>	<i>Anisotropie</i>
Subarkosen				
S-Brown	0.07	0.05	0.0	100.0
S-Yellow	0.04	0.05	0.11	63.6
S-White	0.06	0.05	0.11	54.5
S-Rainbow	0.03	-0.3	0.04	8.5
Arkosen				
PC-Green	0.9	1.13	1.34	32.8
S-Red	0.21	0.20	0.76	73.6

6. LAGERSTÄTTENGEOLOGISCHE CHARAKTERISIERUNG DER THAILÄNDISCHEN NATURWERKSTEINE

6.1 Übersicht zur Morphologie der Abbaugebiete

Naturwerksteine, die unmittelbar an der Erdoberfläche oder in geringer Tiefe anstehen, werden in der Regel im Tagebau gewonnen. Die übertägige Gewinnung bietet den direktesten Zugang zu der Ressource und lässt sich sowohl in magmatischen und metamorphen Gesteinen als auch in Sedimentgesteinen realisieren. Das Arrangement einer Lagerstätte im Tagebau ist dabei jedoch von verschiedenen Faktoren abhängig, zu denen neben der jeweiligen Gesteinsart mit den daran gebundenen strukturgeologischen und lithologischen Vorgaben auch die Morphologie des Terrains zählt, in dem sich die Lagerstätte befindet bzw. in dem die Lagerstätte angelegt werden soll (siehe bspw. Bradley 1989, Conti et al. 1990, Harben & Purdy 1991).

Gemeinsam mit den lagerstätten-geologischen Vorgaben ist die individuelle morphologische Gestaltung eines Abbaugebietes von essentieller Bedeutung für die Planung eines Abbauvorhabens, da dieser Faktor im Wesentlichen darüber entscheidet, ob die Gesteine in einer flachen Ebene bzw. am Fuß, am Hang oder an der Spitze eines Berges gewonnen werden. Jede einzelne Position der Lagerstätte kann sich dabei ganz entscheidend und in unterschiedlicher Form auf die Abbausituation oder die Wirtschaftlichkeit eines Abbaus auswirken. Lagerstätten am Top eines Berges können beispielsweise ökonomisch benachteiligt sein, wenn Maschinerie und Personal nur über neue Zugangsstraßen die Lagerstätte erreichen oder im Rahmen der Lagerstättenerschließung Transportabsicherungen angelegt werden müssen. Von erheblichem Nachteil bei einer solchen Konfiguration ist zudem auch das relativ geringere Platzangebot in der Lagerstätte, was nicht zuletzt auch Auswirkungen auf die Abraumlagerung haben dürfte (Cardu & Lovera 2004).

Im Folgenden soll kurz auf die Morphologie ausgewählter thailändischer Abbaugebiete eingegangen werden. Aufgrund der mehrheitlich behandelten Lithologien aus der Region Tak werden bei der morphologischen Beschreibung des granitoiden Lagerstättenumfeldes lediglich die Abbaugebiete des Tak Batholithen berücksichtigt.

Die S' Teile des Batholithen werden u. a. von den orangen Graniten eingenommen, die im Tak Pluton (vgl. Kap. 3) an mindestens zwei unterschiedlichen Positionen auf einer NNW-SSE-streichenden Achse gewonnen werden (MT-Orange1 und MT-Orange2) (Abb. 6.1a). Die Lagerstätten sind dabei an die unteren Bereiche bzw. an das Top von Kegelbergen gebunden, die als Härtling isoliert aus einer ansonst flachen Ebene herausragen (Abb. 6.1b). NNW' dieser Abbaugebiete stehen die grobkörnigeren Granitoide an, die sich durch ihre unterschiedliche Färbung der K-Feldspäte definieren. Der Abbau der grau-bläulichen und grau-rosa Gesteine erfolgt jeweils W' (BT-Blue) und E' (BN-Pink) einer markanten Bergkette, die sich NNE-SSW-streichend über eine Distanz von 25 km erstreckt und von Biotit-armen Graniten und Andesiten aufgebaut wird (Abb. 6.1a). Die Lagerstätten grau-bläulicher Granite auf der W-Seite der Bergkette befinden sich auf einer NNE-SSW-streichenden Achse, die eventuell eine Scherzone oder Grabenstruktur nachzeichnet. Die

Interpretation geht dabei auf Geländestrukturen im regionalen Umfeld der Abbaugebiete zurück, da sich die Lagerstätten innerhalb einer NE-SW-streichenden Senke befinden, die im E durch die granitisch-andesitische Bergkette und im W durch weitere markante Erhebungen gekennzeichnet ist. Darüber hinaus tritt an mehreren Positionen auf dieser Achse Grundwasser an die Oberfläche. Die Orientierung der vermuteten Scherzone ist zudem identisch mit der Orientierung des Flusses Mae Nam Ping im W, der abweichend von seiner NNW-SSE-Richtung an dieser Position NE-SW-streichend verläuft und vermutlich ebenfalls eine Störung nachzeichnet. Während der Monzodiorit (BT-Black) ebenfalls innerhalb der morphologischen Senke in unmittelbarer Nachbarschaft zu den grau-bläulichen Graniten abgebaut wird (Abb. 6.1c), befindet sich die Lagerstätte des weißen Granits ähnlich wie die orangen Granite im Topbereich eines Berges. In der Verlängerung der NE-SW-streichenden Senke treten die Granite mit violetten Feldspäten auf (BT-Violet). Der Abbau grauer und vereinzelt porphyrisch ausgebildeter Granite erfolgt am Fuße eines weitläufigen Bergmassivs in den zentral-nördlichen Bereichen des Tak Batholithen (SN-Blue) (Abb. 6.1a).

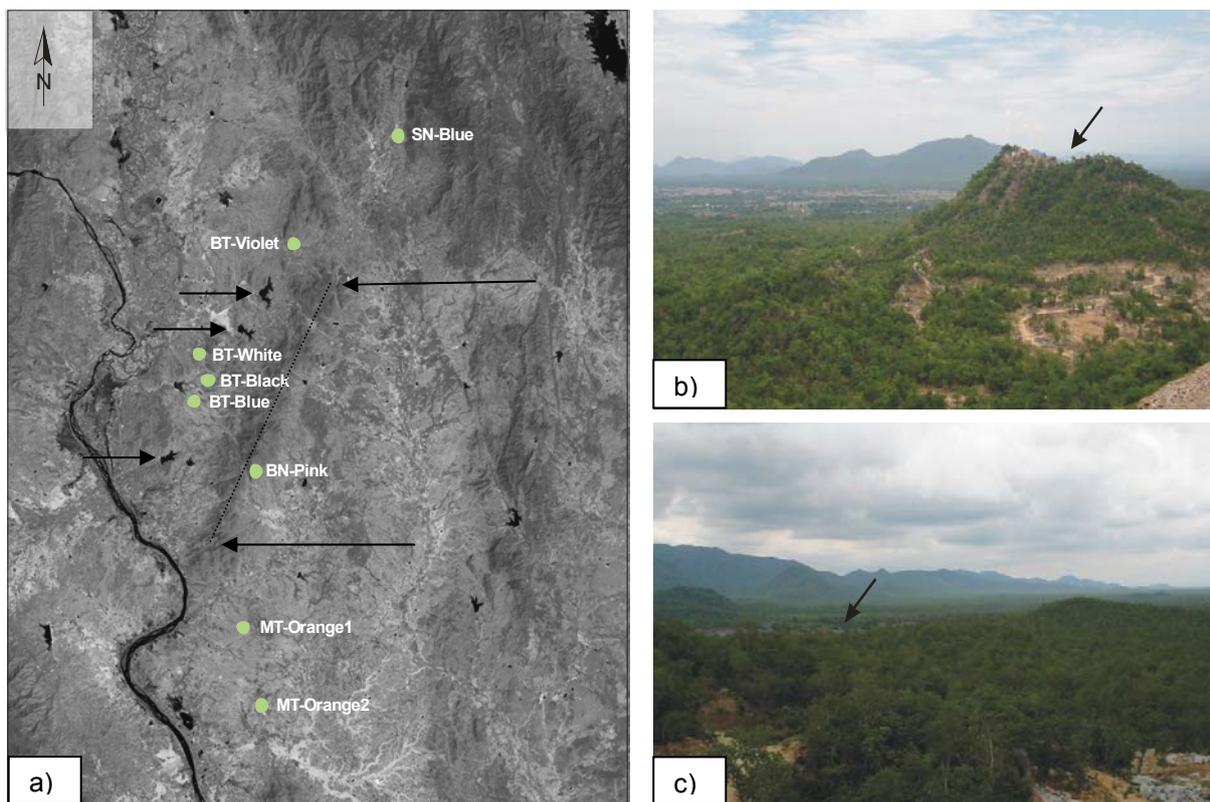


Abb. 6.1: Position der Lagerstätten innerhalb des Tak Batholithen. a) Übersicht ausgewählter Lagerstätten mit NNE-SSW-streichender granitisch-andesitischer Bergkette (lange Pfeile, gepunktete Linie) und Austritt von Grundwasser (kurze Pfeile) in der Nähe einzelner Abbaugebiete. b) Kegelberg mit Abbau orangen Granite im Tak Pluton (Pfeil). c) Lagerstätte des Monzodiorits BT-Black (Pfeil) in morphologisch eingeebnetem Gebiet. Im Hintergrund ist die granitisch-andesitische Bergkette sichtbar. Blick von der Lagerstätte BT-White aus in SE' Richtung.

Der Abbau der Marmore TS-Grey und TS-Pink der Provinz Sukhothai orientiert sich an Kegelbergen, die mit einer Höhendifferenz zum Umland von bis zu 150 m aus der Ebene herausragen und mit N-S-streichender Längserstreckung das Landschaftsbild der Region prägen (Abb. 6.2a, b). Die Gewinnung von Marmor in der Region Kamphaeng Phet (PK-Grey und PK-Pink) konzentriert sich ebenfalls auf eine Kette von Kegelbergen, die relativ schmal ausgebildet sind und eine bevorzugte Ausrichtung der Längsachsen in NNW-SSE-streichender Richtung zeigen. Die Produktion erfolgt jedoch in einer Art Kesselbruch mit etwa 150 m Länge, der in den mittleren Partien einer der Berge angelegt ist. Der Abbau von Kegelbergen kann deutlich sichtbare Spuren im Landschaftsbild hinterlassen, was insbesondere in der Provinz Sukhothai demonstriert wird. Durch den fortgeschrittenen Abbau wurde bereits ein Berg zu großen Teilen abgetragen (Abb. 6.2c). Im Gegensatz zu den vorstehend genannten Lagerstätten wird Marmor in den Provinzen Nakhon Ratchasima und Uttaradit in Brüchen innerhalb einer flachen Ebene abgebaut.

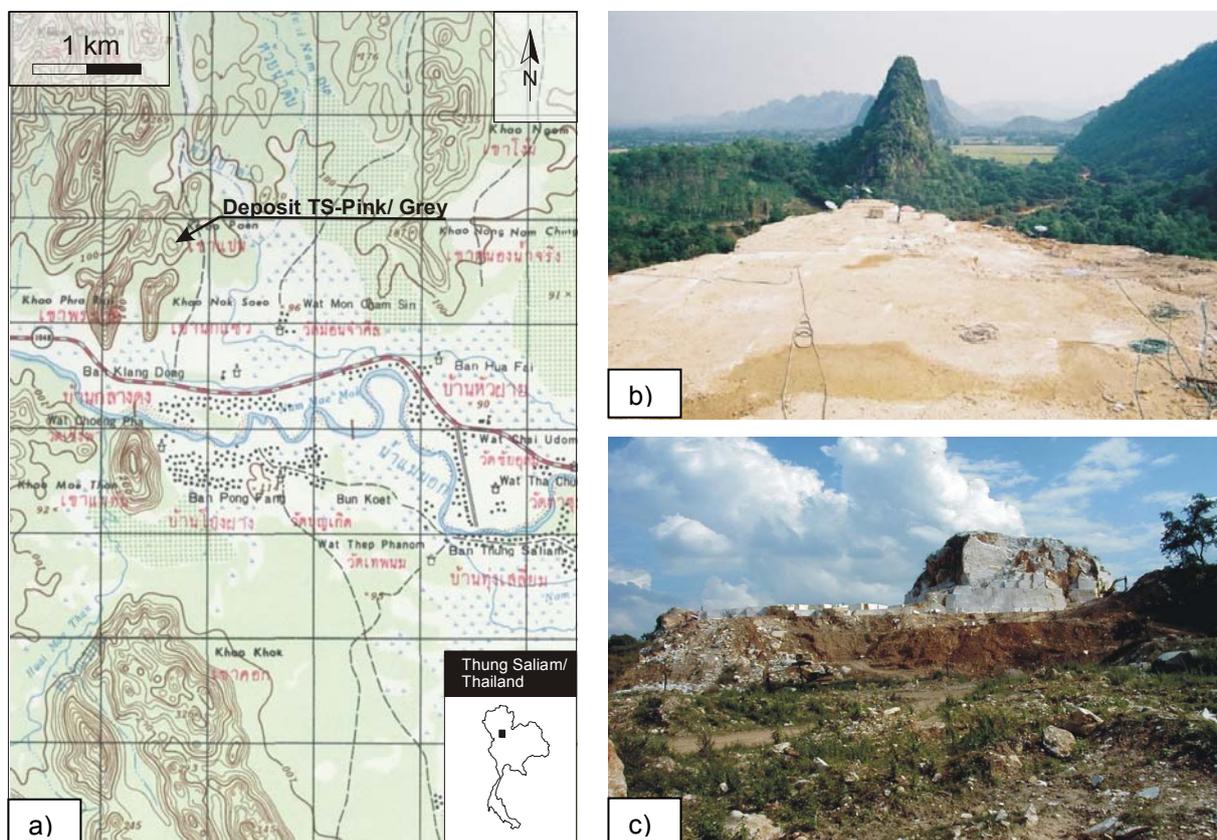


Abb. 6.2: Beispiel für den Marmorabbau an Kegelbergen anhand der Lagerstätte TS-Pink/Grey in der Provinz Sukhothai. a) Ausschnitt aus der topographischen Karte (4943 IV Thung Saliang) mit Position der Lagerstätte. b) Blick von der Lagerstätte TS-Pink/Grey auf die schroff herauspräparierten Carbonatfelsen in S' Richtung. c) Fortgeschrittener Abbau der Marmoreinheiten mit extremem Einfluss auf das Landschaftsbild.

Der Abbau von Sandsteinen erfolgt wenige Kilometer NE' der Marmore von Nakhon Ratchasima und konzentriert sich dort auf drei stratigraphische Einheiten der Khorat Gruppe (vgl. Kap. 3). Die Produktion grüner Sandsteine erfolgt in den Abfolgen der Phu Kradung Formation, die als NW-SE-streichender Streifen in den vorgelagerten Bereichen des Khorat-

Plateaus flach ausstreichen. Die Phu Kradung Formation ist von den quarzreichen Sandsteinen der Phra Wihan Formation überlagert (Abb. 6.3), die aufgrund ihrer Verwitterungsresistenz die steilen Hänge des Khorat-Plateaus in etwa 2 km Entfernung zu den Abbaugebieten grüner Sandsteine bilden. Innerhalb der Phra Wihan Formation werden auf der Hochfläche des Khorat-Plateaus etwa 5 km N' des Wasserreservoirs Lam Takhong an verschiedenen Lokalitäten weiße, gelbe und braune Sandsteinvarietäten abgebaut (Abb. 6.3).

E' bzw. NE' der Abbaugebiete erheben sich drei Inselberge aus der Hochfläche (Khao Phrik, Khao Sadao und Khao Kradon), die eine markante Position im Landschaftsbild einnehmen und von Gesteinen der Phu Phan Formation aufgebaut werden. Die Formation ist wie die Phra Wihan Formation durch quarzitische Sandsteine gekennzeichnet (Heggemann 1994), von denen jedoch bislang kein Abbau als Naturwerkstein bekannt ist. Im Bereich zwischen den beiden quarzreichen Formationen sind die feinklastischen Rotsedimente der Sao Khua Formation aufgeschlossen, die ein weites Tal zwischen den kompakten Schichten der Phra Wihan und Phu Phan Formation bilden. Circa 20 km E' der Inselberge werden rote Sandsteine der Khok Kruat Formation abgebaut (Abb. 6.3). Die feinklastischen Sedimente sind aufgrund ihres höheren Feldspatgehaltes gegen die Verwitterung nicht resistent und treten so in der Morphologie des Khorat-Plateaus nicht in Erscheinung. Die Gewinnung der Rotsedimente erfolgt in einer flachen Ebene, die lokal durch quartäre Ablagerungen bedeckt ist.

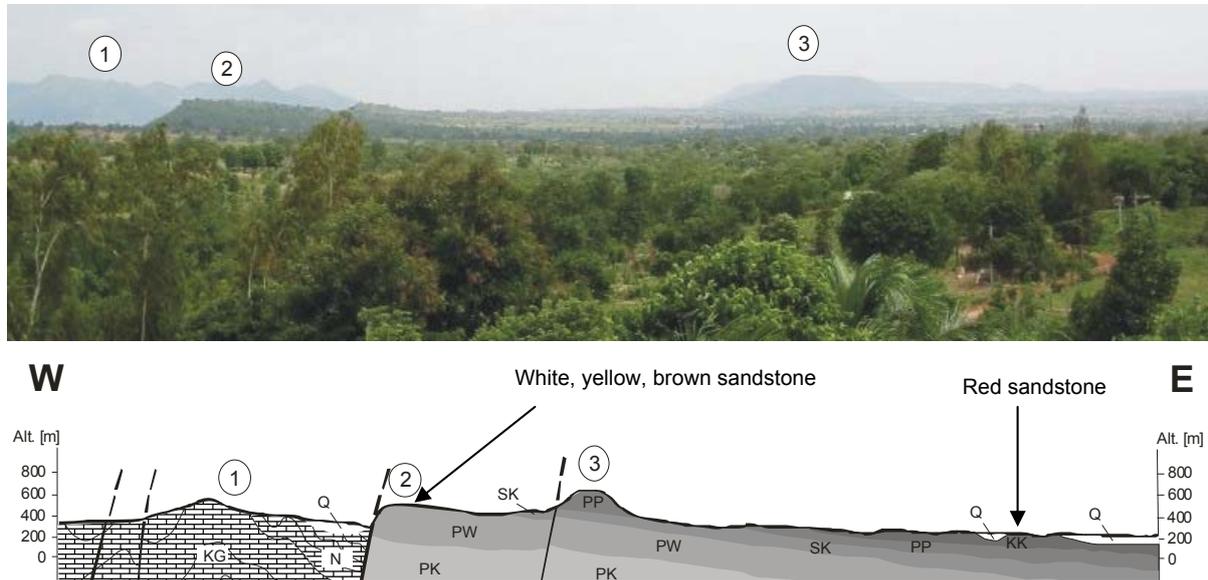


Abb. 6.3: Blick in N' Richtungen auf die Hochfläche des Khorat Plateaus (oben) und schematisches Profil durch die Einheiten der Khorat Gruppe (unten) an etwa gleicher geographische Position (vgl. Referenzpunkte 1, 2, 3). Abkürzungen: KG = Khao Khwang Formation, N = Nong Pong Formation, PK = Phu Kradung Formation, PW = Phra Wihan Formation, SK = Sao Khua Formation, PP = Phu Phan Formation, KK = Khok Kruat Formation, Q = Quartär.

6.2 Abbauprodukte, Lagerstättenenerträge und Blockgrößen

6.2.1 Abbauprodukte und Lagerstättenenerträge

Die Granit- und Gneis-Lagerstätten in Thailand konzentrieren sich ausschließlich auf die oberflächennahe Produktion von Rohblöcken. Die monatlichen Erträge liegen dabei in einer Größenordnung von 50 bis 700 m³ (vgl. Anhang III), so dass sich die Lagerstätten im internationalen Vergleich durch geringe bis durchschnittliche Fördermengen auszeichnen (mündl. Mitteilung J. Stein). Die in Thailand maximal erzielten Erträge werden dabei in den Abbaugebieten des Tak Batholithen gewonnen, so beispielsweise in der Lagerstätte MT-Orange¹, die mit einer E-W-Erstreckung von mehr als 300 m die größte Lagerstätte für Naturwerksteine in Thailand repräsentiert. Ähnlich hohe Abbauraten können in der wesentlich kleineren Lagerstätte BT-Violet mit 500 m³ pro Monat erreicht werden. An führender Position hinsichtlich der Produktion von Rohblöcken außerhalb des Tak Batholithen steht mit bis zu 150 m³ monatlich die Lagerstätte NB-Orange in der Provinz Nakhon Sawan. Für die Abbaugebiete HH-Grey und MC-Yellow liegen keine Angaben vor (vgl. Anhang III), da hier die Gewinnung zum Zeitpunkt der Untersuchungen gerade erst begonnen hat bzw. die Lagerstätte sich noch in der Erkundungsphase befand.

Die Lagerstätten der Carbonatgesteine zeichnen sich ebenfalls durch sehr unterschiedliche Fördermengen aus, wobei die maximalen Erträge deutlich über denen der Granit-Lagerstätten liegen können. Neben den geologischen Voraussetzungen, die im einzelnen noch diskutiert werden, wird dieses vermutlich auch dadurch begünstigt, dass die Marmorblöcke durch die Gewinnung mittels Seilsägen bereits in verarbeitungsgerechten Dimensionen vorliegen, während die meist unförmigeren Granitblöcke in einem weiteren, zeitaufwändigeren Verarbeitungsschritt noch formatiert werden müssen. Die höchsten Erträge mit bis zu 1000 m³ pro Monat werden dabei in der Marmor-Lagerstätte PK-Grey/Pink der Provinz Kamphaeng Phet gewonnen (vgl. Anhang III). Die Produktion in der Lagerstätte PC-White/Red ist dagegen durch vergleichsweise niedrige monatliche Gewinnraten von weniger als 300 m³ gekennzeichnet. Mit 150 m³ pro Monat liegt die Produktion der grauen Marmore in der Lagerstätte PC-Grey zwar deutlich unter den Abbauraten der übrigen Marmor-Lagerstätten, übersteigt jedoch die Produktion roter Kalksteine, die in der Lagerstätte KH-Red der Provinz Sra Kaeo gefördert werden (vgl. Anhang III).

Im Gegensatz zu den Abbaugebieten von Granit- und Carbonatgesteinen konzentriert sich die Mehrheit der thailändischen Sandsteinlagerstätten auf den Abbau spaltrauer Bodenplatten und kleinerer Mauersteine. Die Produkte werden in einer Größenordnung von durchschnittlich 300-400 m², bei größerer Kapazität der Lagerstätten bis zu 1000 m² pro Monat gewonnen. Neben der Gewinnung von Bodenplatten und Mauersteinen ist lokal auch die Produktion großformatiger Sandsteinblöcke möglich. Die Produktion von Blöcken wird insbesondere in einzelnen Abbaugebieten der weißen, braunen und gelben Sandsteine forciert, in denen monatlich bis zu 150 m³ Rohmaterial gefördert werden können. Die Abbaugebiete der weißen, braunen und gelben Sandsteine unterscheiden sich damit deutlich von denen der beiden übrigen Varietäten, da sich nahezu die gesamte Produktion roter Sandsteine auf die

Fertigung handbehauener Bodenplatten beschränkt und auch grüne Sandsteine vornehmlich als Bodenplatten und Mauersteine abgebaut werden. Dennoch ist auch eine Produktion größerer Blöcke in den Lagerstätten der grünen und roten Sandsteine möglich. Die thailändischen Sandsteinvorkommen lassen sich demnach hinsichtlich der avisierten Abbauprodukte in zwei Arten von Lagerstätten unterteilen: Lagerstätten mit ausschließlicher Produktion von Bodenplatten und Lagerstätten mit überwiegender Produktion von Rohblöcken.

Unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten ist der Abbau von Rohblöcken der Fertigung von Platten vorzuziehen, da der Wert einer aus dem Rohblock gewonnenen Platte im Zuge der Weiterverarbeitung deutlich aufgewertet werden kann. Allein durch die Veredelung der Oberflächen kann eine Wertsteigerung gegenüber spaltrauen Platten von etwa 300% erreicht werden. Ein weiterer Vorteil der Blockproduktion wäre eine wesentlich vielseitigere Verwendung, da individuelle, auch großflächige Formate aus den Blöcken präpariert werden könnten. Zusätzlich ist durch die Produktion von Rohblöcken eine höhere Variabilität hinsichtlich des Dekors der Endprodukte gewährleistet, da sich durch verschiedene Schnittrichtungen dekorative Anschnittseffekte der Oberflächen, beispielsweise ausgeprägte Sedimentstrukturen oder ein metamorpher Faltenbau, deutlicher hervorheben lassen (Abb. 6.4).

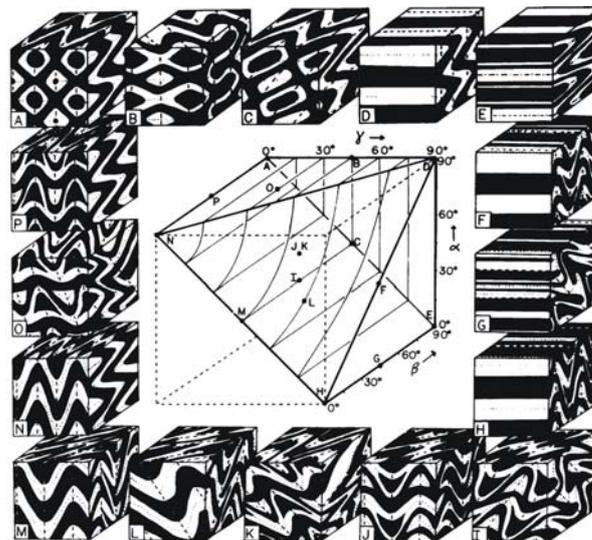


Abb. 6.4: Unterschiedliche Dekors in Abhängigkeit der Schnittlage, beispielhaft dargelegt anhand metamorpher Faltenstrukturen (Ramsay & Huber 1987).

6.2.2 Blockgrößen

Für die wirtschaftliche Verarbeitung mittels moderner Steinsägetechniken und für die damit verbundenen Verarbeitungsverluste werden bei der Blockproduktion gewisse Mindestblockgrößen und -abmessungen erforderlich, da das Volumen des gewonnenen Materials entscheidend die Wirtschaftlichkeit der Lagerstättenoperationen beeinflusst.

Das Volumen eines Rohblocks sollte selbstverständlich nicht unter ein bestimmtes Minimum fallen. Singewald (1992) definiert ein Mindestblockvolumen von 0.4 m^3 mit einer Mindestkantenlänge von 0.4 m in jeder der drei Raumdimensionen. Neben der Tatsache, dass Blöcke mit kleineren Kantenlängen für eine weitere Konfektionierung nicht mehr kippstabil aufgestellt werden können, stützt sich die Dimensionierung von Singewald (1992) auf die Unwirtschaftlichkeit des Blockes aufgrund eines zu hohen Rauhabfalls während der Weiterverarbeitung. Dabei ist jedoch auch zu berücksichtigen, dass sich die Wirtschaftlichkeit einer Lagerstätte auch nach dem entsprechenden Abbauprodukt richten kann. Bei entsprechender Seltenheit und hoher Nachfrage können Naturwerksteine auch in kleinen Dimensionen sehr ertragreich sein.

Optimale Bedingungen sind gegeben, wenn eine Lagerstätte Rohblockgrößen in einer Größenordnung von $6\text{-}8 \text{ m}^3$ aufweist (Primavori 1999). Die maximalen Dimensionen einzelner Blöcke richten sich dabei nach dem Gewicht in Bezug auf die Transportsicherheit sowie nach der Handhabung während der weiteren Fertigung (Abb. 6.5a). Rahmenwerte der Vereinten Nationen (1976) sehen für Naturwerksteinblöcke, die für den Export bestimmt sind, ein Mindestvolumen von $1\text{-}6 \text{ m}^3$ und Abmessungen von $2.0 \times 1.0 \times 0.5 \text{ m}$ bis $3.0 \times 2.0 \times 1.0 \text{ m}$ vor.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde soweit möglich für jedes Abbauprodukt der Blockbestand in den Lagern der Produzenten vermessen. Die Ergebnisse sind im Anhang III zusammengefasst und als Nettoblockgrößen zu verstehen. Bei keiner Lithologie wurde ein Volumen von unter 1.0 m^3 und eine Mindestkantenlänge von unter 1.0 m gemessen. Die Dimensionen der Rohblöcke reichen bei Graniten, Gneisen und dem Hornblendit sowie bei Carbonatgesteinen mehrheitlich bis 10 m^3 , bei Sandsteinen bis annähernd 5 m^3 . Lediglich in den Lagerbeständen granitoider Gesteine wurden Rohblöcke mit einem Volumen von mehr als 10 m^3 angetroffen. Die Abmessungen der Kantenlängen liegen bei maximal 2.7 m , was sich aus den Vorgaben des Fertigungsinventars ergibt, da moderne Sägeeinrichtungen beispielsweise nur Blöcke mit Dimensionen einer Größe von $2.4\text{-}3.0 \text{ m}$ (Länge) \times $1.3\text{-}1.9 \text{ m}$ (Höhe) \times $1.0\text{-}1.4 \text{ m}$ (Breite) aufnehmen können (Selonen & Suominen 2003) (Abb. 6.5b).

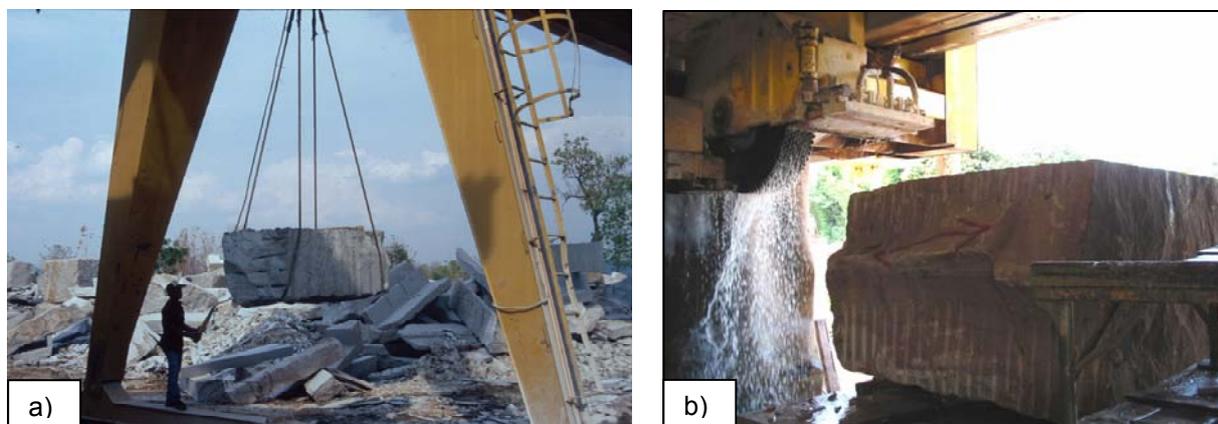


Abb. 6.5: a) Bewegung von Rohblöcken, Granito Granite Co. (Thailand). b) Rohblock kurz vor dem Sägeprozess, Khao Yai Tachang Co. (Thailand). Sowohl für die Transportsicherheit als auch für die Fertigung werden gewisse Mindestblockgrößen erforderlich.

Die Abmessungen eines Rohblocks sind bei der Verarbeitung auch hinsichtlich des Dekors von besonderer Bedeutung. Während die Breite eines Blockes letztlich für die Anzahl der Platten je Block verantwortlich ist, bestimmen die Höhe sowie die Länge des Nettoblocks die Größe der einzelnen Platten (Abb. 6.6a). Bei der Präparation von Platten aus einem Naturwerksteinblock mit ausgeprägten Strukturen ist daher entscheidend, dass sich das interessanteste Dekor des Gesteins auf der Längsseite des Rohblocks abzeichnet (Abb. 6.6b). Bei Gesteinen mit homogener, isotroper Struktur könnte das Material unabhängig vom Größenverhältnis des Blocks genutzt werden, da das Dekor in allen drei Raumrichtungen einheitlich ausgebildet ist (Abb. 6.6c).

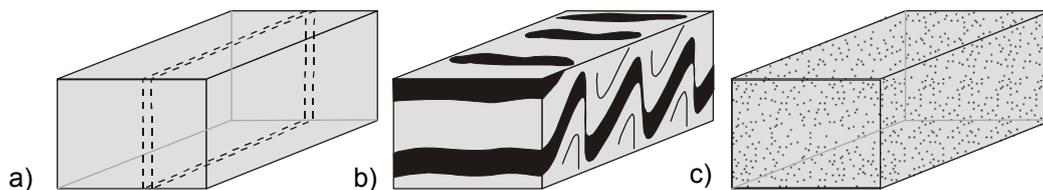


Abb. 6.6: Beziehung zwischen Entnahmerichtung aus der Lagerstätte und dem Dekor eines Rohblocks (modifiziert nach Nelles 1996). a) Maße des Natursteinnettoblocks in Abhängigkeit von der Sägerichtung (gestrichelte Linie). b) Die für das Produkt charakteristischen Gefüge und Strukturen sollten im Rohblock die Längsseite dominieren. c) Bei Gesteinen mit nahezu isotropen Strukturen ist die Beziehung zwischen Blockabmessungen und den Dekoreigenschaften von untergeordneter Bedeutung, da das Material in allen Richtungen einheitlich ausgebildet ist.

Bei den in den Blocklagern aufgenommenen Rohblöcken handelt es sich vorwiegend um Material erster Wahl. Neben der idealen Zurichtung und Abmessung im Hinblick auf den Verwendungszweck sowie einer homogenen makroskopischen Erscheinung werden an einen Rohblock erster Wahl gewisse Qualitätsansprüche gestellt. Diese Qualitätsansprüche ergeben sich aus der Güte des Materials, also dem Einfluss natürlicher oder mechanischer Defekte (z.B. Adern, Haarrisse, etc.), sowie aus den physikalisch-technischen Eigenschaften, die internationalen Standards entsprechen müssen. Handelsvarietäten zweiter und dritter Wahl zeigen entweder leichte oder erhebliche Abweichungen dieser Anforderungen, allerdings mit Ausnahme der Mindestansprüche internationaler Normen hinsichtlich der physikalisch-technischen Eigenschaften (Nelles 1996).

6.3 Trennflächensysteme

6.3.1 Abstandsverteilung der Trennflächen

Die Bildung von individuellen Blöcken in einem intakten Gestein, den so genannten in-situ Blöcken (Lu & Latham 1999), geht auf das gegenseitige Schneiden von Trennflächen mit unterschiedlicher Orientierung zurück. Die jeweilige Größe von in-situ Blöcken erster Wahl

wird dabei im Wesentlichen von den Abständen bestimmt, in denen beispielsweise Klufflächen oder Risse des Gesteins innerhalb der Lagerstätte auftreten. Da Trennflächen eine Naturwerkstein-Lagerstätte als 3-dimensionalen Körper in mehrere kleine Einheiten zerlegen und die potentiell gewinnbaren Rohblöcke in ihrer Form und ihrem Volumen begrenzen, kommt dem Trennflächengefüge bei der Bewertung eines Abbaugbietes eine entscheidende Bedeutung zu. Das Trennflächengefüge gilt nicht zuletzt auch deshalb als wohl wesentliches Element bei der Bewertung der Werksteinvorkommen, da es mit offenen und mineralisierten Klüften alle definierten Qualitätsansprüche an einen Rohblock erster Wahl beeinträchtigen kann. Wo Lagerstätten für Naturwerksteine entstehen oder ausgebaut werden sollen, ist die Analyse des Trennflächensystems daher unerlässlich.

Die Genese von Trennflächen kann vielfältig sein und auf kinematische oder epirogenetische Prozesse zurückgehen. Trennflächen tektonischen Ursprungs vollziehen sich in Abhängigkeit von der Intensität, den thermischen Bedingungen, der Teufenlage und den gesteinsmechanischen Eigenschaften. Zum Bruch der Gesteinseinheiten kommt es hierbei, wenn etwa durch Druck- und Zugbeanspruchungen auf das Gestein dessen elastisches Limit erreicht bzw. überschritten wird (Palmström 1995). Bei Sedimenten und auch Marmoren können sich darüber hinaus Schichtflächen an der Grenze zwischen verschiedenen Gesteinsschichten oder Materialien zu Trennflächen entwickeln. Darüber hinaus können Trennflächen durch Entlastung und Entspannung eines Gesteinsmassivs oder auch durch mechanische Beanspruchung während des Abbauprozesses entstehen oder auch reaktiviert werden. Die verschiedenen Elemente können in Abhängigkeit von ihrer räumlichen Ausdehnung und Genese folgendermaßen klassifiziert werden: Störungen (Faults), Klüfte (Joints), Risse (partings), Brüche (cracks), Haarrisse (fissures), Schichtflächen (bedding planes) oder Scherflächen (shears) (Abb. 6.7).

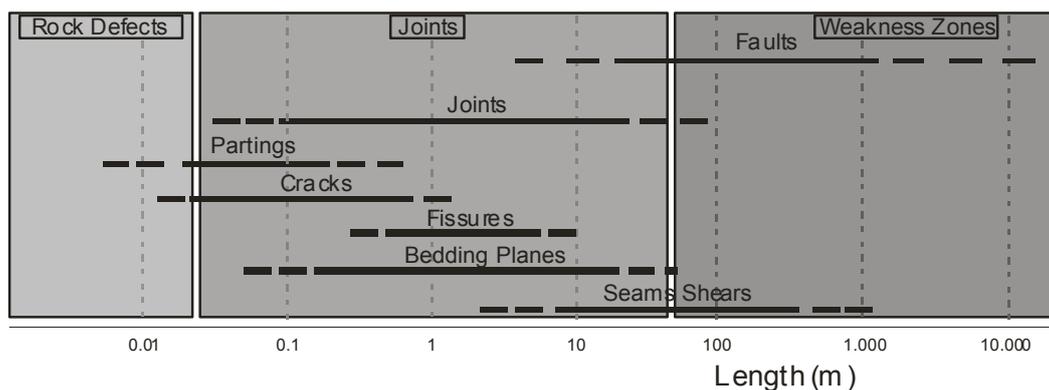


Abb. 6.7: Die wesentlichen Grundtypen von Trennflächen in Abhängigkeit ihrer räumlichen Ausdehnung (Palmström 1995).

Treten Diskontinuitäten in weiten Abständen auf, sind in der Regel günstige Voraussetzungen für großformatige Blöcke gegeben, die wiederum auf vielfältige Art und Weise für Bauobjekte aufgearbeitet werden können. Bei Fällen, in denen eine Lagerstätte ein weitständiges Kluffsystem in zwei Dimensionen, jedoch eine relativ engständige Klüftung in der dritten Dimension aufweist, besitzen die Rohblöcke eine sehr flache Form. Der

Einsatzbereich dieses Materials ist somit deutlich eingeschränkt und erlaubt oftmals lediglich die Produktion von Pflastersteinen für Straßenbeläge. Ist das Kluftsystem einer Lagerstätte in allen drei Raumrichtungen engständig ausgebildet, werden sehr kleine Rohblöcke gewonnen, deren Material sich „im günstigsten Fall“ für den Einsatz als Wasserbausteine, „im ungünstigsten Fall“ für die Schotter- oder Splittproduktion eignet. Bei sedimentären Lagerstätten definieren mehrheitlich die Schichtflächen die maximale Größe eines Naturwerksteinblocks, der aus den entsprechenden Sequenzen gewonnen werden kann. Eine Terminologie für die Abstandsverteilung von Diskontinuitäten ist in Tabelle 6.1 zusammengestellt.

Tab. 6.1: Klassifikationsschema für die Abstandsverteilung von Diskontinuitäten in einer Dimension (aus Smith 1999).

Bezeichnung	Abstandsweite
Sehr weitständig	>2 m
Weitständig	600 mm bis 2 m
Mäßige Abstandsweite	200 mm bis 600 mm
Engständig	60 mm bis 200 mm
Sehr engständig	20 mm bis 60 mm
Extrem engständig	<20 mm

Die Abstände des Trennflächengefüges in den thailändischen Lagerstätten sind im Anhang IV zusammenfassend angeführt. Aus den ermittelten Daten geht hervor, dass sich viele Lithologien u.a. auch durch einige weitständige bis sehr weitständige Klüfte auszeichnen. Die maximalen Kluftabstände wurden mit 20.7 m für vertikale und 14.4 m für horizontale Diskontinuitäten in Lagerstätten mit granitischem Inventar aufgenommen (BT-Violet). Vergleichsweise große Distanzen zwischen den Diskontinuitäten können auch in Lagerstätten der Carbonatgesteine auftreten, die durch maximale Abstände bis nahezu 15 m bzw. 20 m gekennzeichnet sind (PK-Pink/Grey). Etwas geringere Abstandsweiten sind in den Lagerstätten der Sandsteine dokumentiert, wobei auch hier noch Maximalwerte von bis zu 14 m aufgenommen werden konnten (gelbe Sandsteine).

6.3.2 Orientierung der Trennflächen

Neben dem Volumen und den spezifischen Abmessungen wirkt sich auch die Form der Blöcke entscheidend in der Weiterverarbeitung aus. Um die Verarbeitung des Rohblocks möglichst ökonomisch gestalten zu können, müssen in der Lagerstätte quaderförmige Blöcke gewonnen werden, da nur ein so zugerichtetes Material die Zeit für das Ansägen in den Gattersägen vermindern und zu einer Kosteneffizienz beitragen kann. In diesem Zusammenhang sollte der Rohling ein ideales Verhältnis vom Rohblock zum Nettoblock haben, was jedoch häufig bei den angelieferten Blöcken nicht gegeben ist. Die teilweise erheblichen Schwierigkeiten, verarbeitungsgerechtes Material aus den Lagerstätten

auszubringen, machen den hauptsächlichen Unterschied der Naturwerksteinindustrie zu anderen Bergbauzweigen aus (Nelles 1996).

Der für die Naturwerksteingewinnung günstigste Fall ist bei einem annähernd orthogonalen Kluftsystem gegeben, da hier eine Zerlegung in relativ rechtwinklige Blöcke vorgegeben ist. Ist das Trennflächengefüge einer Lagerstätte durch gravierende Abweichungen von der Orthogonalität gekennzeichnet, ist eine wirtschaftliche Gewinnung von Naturwerkstein-Rohblöcken ausreichender Dimensionen oft nur schwer zu erreichen. Dennoch kann die Produktion in einem solchen Fall wirtschaftlich sein, wenn bei entsprechenden technischen Eigenschaften auch Alternativprodukte, wie beispielsweise Brechprodukte für den Verkehrswegebau (Singewald 1992) oder Wasserbausteine (siehe Dunsworth et al. 2003) gewonnen werden.

Die untersuchten Lithologien innerhalb des Tak Batholithen sind durch teilweise sehr divergierende Kluftmuster gekennzeichnet, die dennoch eine gewisse Gemeinsamkeit in der Vorzugsorientierung und darüber hinaus auch eine Gemeinsamkeit in der Genese erkennen lassen. In den Lagerstätten BN-Pink, BT-Violet und SN-Blue treten mehrheitlich NNE-SSW-streichende Trennflächen mit hohen Einfallswinkeln auf (Abb. 6.8). Die Orientierung dieser Kluftschar ist dabei identisch mit der Streichrichtung der granitisch-andesitischen Bergkette, in deren unmittelbarer Nachbarschaft sich die Lagerstätten BN-Pink und BT-Violet befinden. Die dominante NNE-SSW-Orientierung der Klüfte tritt in anderen Lagerstätten wie etwa BT-White, BT-Blue und MT-Orange1 nicht mehr oder nur noch untergeordnet auf und wird hier zunehmend durch NNW-SSE-Orientierungen ersetzt (Abb. 6.8). Eine Ausnahme bildet das Vorkommen BT-Black, in dem sowohl NNW-SSE- als auch NNE-SSW-streichende Klüfte gleichermaßen häufig vertreten sind. Alle Lagerstätten sind neben den beiden wechselnden Hauptkluftrichtungen noch durch Trennflächen um E-W-streichende Achsen charakterisiert, die sich sowohl durch steile als auch durch flache Einfallswinkel bemerkbar machen. Eine Vielzahl der Klüfte im Tak Batholithen ist sehr wahrscheinlich auf eine tektonische Überprägung zurückzuführen, da einige Kluftrichtungen mit der Orientierung vermuteter regionaler Störungen im näheren Umfeld der Abbaugelände, beispielsweise SN-Blue oder BN-Pink, korrelieren (Abb. 6.8).

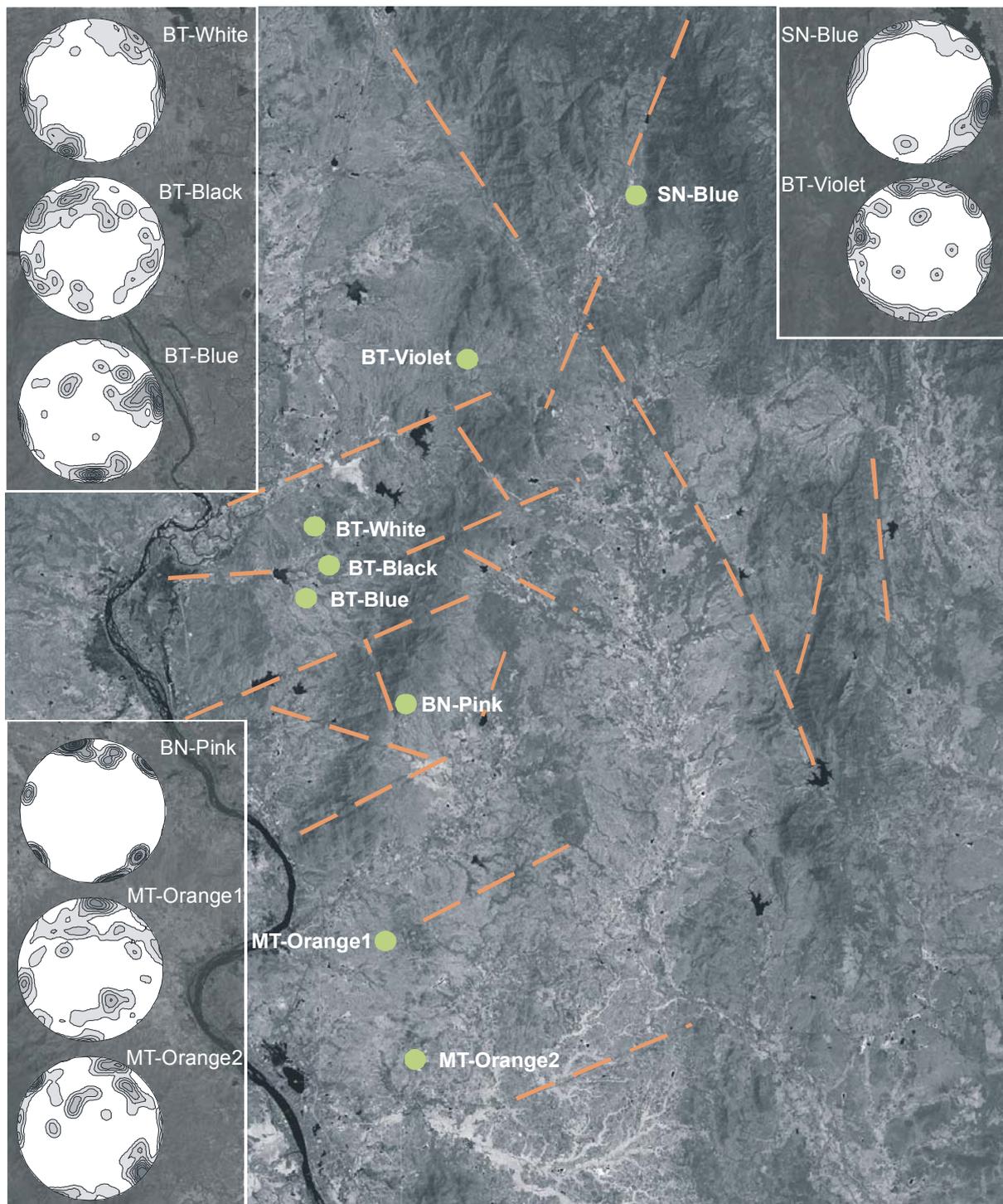


Abb. 6.8: Lagenkugelprojektion der Trennflächensysteme in den Lagerstätten des Tak Batholithen. Orange Linien kennzeichnen die Orientierung von vermuteten Störungen in der näheren Umgebung der Abbaugebiete. Weitere Erläuterungen im Text dieses Kapitels.

Die Lagerstätten der Carbonatgesteine sind ebenfalls durch relativ unterschiedliche Orientierungen des Trennflächengefüges gekennzeichnet (Abb. 6.9). Dies ist hier allerdings schon durch die wesentlich größeren geographischen Entfernungen der Abbaugebiete zueinander bedingt. Da in den einzelnen Lagerstätten recht häufig ein nahezu umlaufendes Streichen der Klüfte dokumentiert werden konnte, ist das Klüftmuster in den Gesteinen PK-

Grey/Pink, das lediglich in Bezug auf die NE-SW-streichenden Klüfte abweichende Richtungen hervorbringt, von einer vergleichsweise deutlichen Regelmäßigkeit gekennzeichnet (Abb. 6.9). Ähnliches gilt für die Lagerstätte BTD-White. Das Kluftsystem des Marmors weist zwar eine Reihe verschiedener Richtungen auf, doch kristallisieren sich einzelne Maxima wesentlich besser heraus als beispielsweise in den Lagerstätten PC-White/Red oder PC-Grey (Abb. 6.9), in denen umlaufende Streichrichtungen keine so deutliche Vorzugsorientierung erkennen lassen. Beide Lagerstätten PC-White/Red und PC-Grey sind in recht geringer Entfernung zueinander positioniert und zeigen daher ein in vieler Hinsicht gleiches Kluftsystem. Auffallend sind in diesem Zusammenhang die mit etwa 60° nach N einfallenden Klüfte des Gesteins PC-Grey, die hier sehr deutlich durch die noch zu erkennende sedimentäre Schichtung des schwach metamorphen Kalksteins entwickelt sind. In den Serien mit intensiverem Metamorphoseeinfluss, also in den Gesteinen PC-Grey/Red, ist diese Kluftchar nicht mehr zu erkennen.

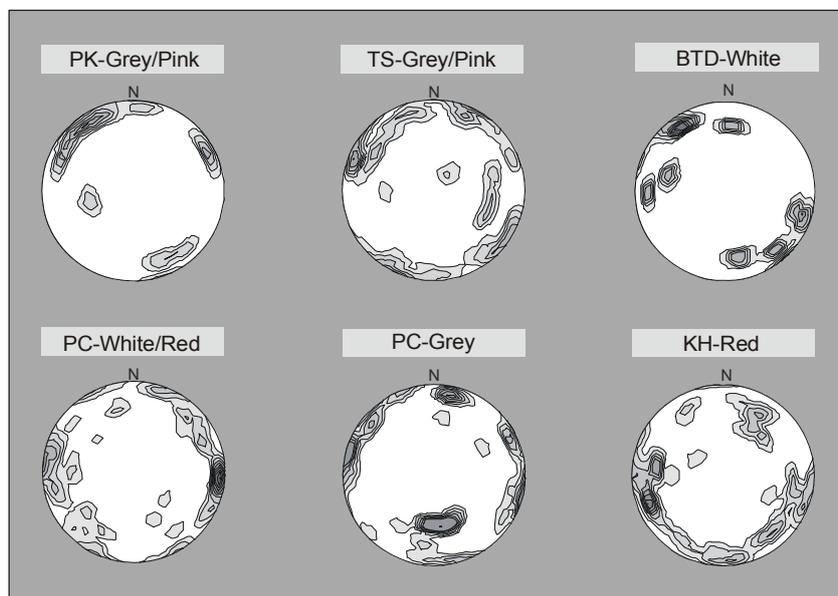


Abb. 6.9: Lagenkugelprojektion der Trennflächensysteme für die untersuchten Lagerstätten der Marmore und Kalksteine.

Da bei klastischen Sedimenten als deutlich geschichtetem geologischem Körper die vertikalen Trennflächen im Allgemeinen senkrecht zueinander und auch senkrecht zu den Lagerklüften orientiert sein sollten (vgl. Bock 1980), könnten bei Sandsteinen bereits durch die geologischen Vorzeichnungen in einer Lagerstätte quaderförmige Rohblöcke in-situ aus dem Gesteinsverband herauspräpariert werden. Diese vorteilhaften Bedingungen gelten jedoch nur begrenzt für die thailändischen Vorkommen, da hier die Trennflächen des Kluftsystems immer wieder Abweichungen von einer Orthogonalität anzeigen können (Abb. 6.10).

Kennzeichnend für das Trennflächensystem der Sandsteine ist ein flaches Einfallen der Schichtflächen in NE' und E' Richtungen. Weiterhin beinhaltet das Trennflächensystem eine Kluftchar mit vertikalen Einfallswinkeln und NW-SE-streichender Orientierung (Abb. 6.10).

Die sehr dicht besetzten Polpunktmaxima für vertikale Trennflächen signalisieren, dass es sich hierbei um die Hauptkluftrichtung in den Sandsteinvorkommen handelt. Da diese spezifische Orientierung in allen Lagerstätten auftritt, scheint sich die Hauptkluftrichtung über stratigraphische und lithologische Grenzen hinwegzusetzen. Neben den Hauptklüften treten in den Lagerstätten Nebenklüfte auf, die um NE-SW-streichende Achsen orientiert sind. Innerhalb dieser Kluftschar sind zwei Submaxima mit jeweils einer ENE-WSW- und einer NNE-SSW-Streichrichtung entwickelt, die sich in einem Winkel zwischen 27 und 60° schneiden können (Abb. 6.10). Alle untersuchten Lagerstätten sind neben den Haupt- und Nebenklüften durch Querklüfte gekennzeichnet, welche teilweise mineralisiert sind und mit diagonalen Einfallswinkeln die Sandsteinfolgen durchziehen (Abb. 6.10).

Aufgrund des Terminationsverhaltens der Klufflächen, also deren Verlauf im Gesteinsverband (siehe Meier & Kronberg 1989), kann angenommen werden, dass es sich bei dem Trennflächengefüge der Lagerstätten um zwei verschiedene Kluffgenerationen handelt. In vielen Fällen lassen sich die NW-SE-streichenden Bruchflächen vollständig über die gesamte Fläche einer Lagerstätte verfolgen. Klüfte mit dieser Orientierung durchtrennen dabei oftmals die gesamte Schichtfolge, während Trennflächen mit NE-SW-gerichteter Orientierung mehrheitlich auf einzelne Schichten begrenzt bleiben. Zusätzlich kann beobachtet werden, wie NE-SW-streichende Klüfte an NW-SE-orientierten Flächen enden. Ein Teil der NW-SE-streichenden Klüfte stellt eventuell jüngere Bewegungsbahnen dar, an denen es zum Versatz älterer Klüfte kam. Eindeutige Hinweise auf die chronologische Abfolge der Kluftausbildung liegen jedoch nicht vor.

Ein tektonischer Einfluss auf das Kluftsystem der thailändischen Sandsteinvorkommen ist überwiegend in den gelben und weißen Lithologien der Phra Wihan Formation dokumentiert, in denen NW-SE- bis NNW-SSE-streichende Störungen mit unterschiedlicher Intensität auftreten. Die Annahme, dass NNW-SSE-streichenden Klüfte auf einen tektonischen Ursprung zurückgehen, wird nicht zuletzt auch durch die Orientierung einer regionalen Störung am W-Rand des Khorat-Plateaus bekräftigt, die annähernd parallel zur NW-SE-Kluftrichtung der weißen, braunen, gelben und roten Sandsteine verläuft und exakt mit der NNW-SSE-streichenden Hauptkluftrichtung der grünen Sandsteine übereinstimmt.

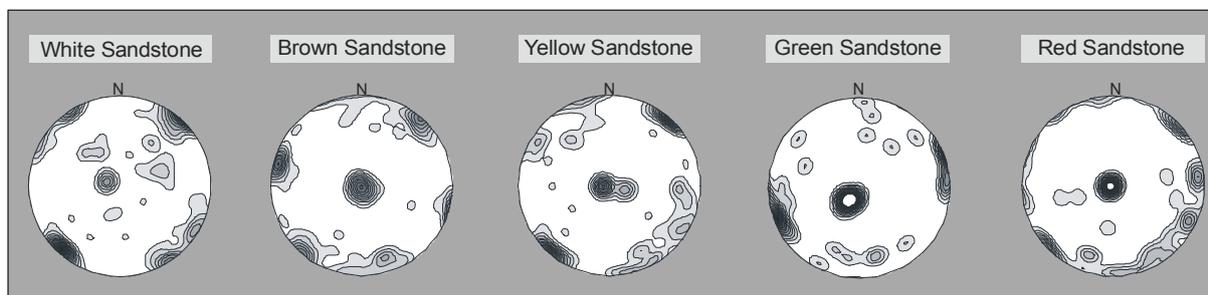


Abb. 6.10: Lagenkugelprojektion der Trennflächensysteme aus repräsentativen Sandstein-Lagerstätten. Alle Lagerstätten sind durch flach einfallende Schichtflächen und NW-SE- bis NNW-SSE-streichende, tektonische Klüfte gekennzeichnet. Auffallend sind die sich kreuzenden NE-SW-streichenden Klüfte der weißen und gelben Sandsteine sowie das nahezu umlaufende Streichen von Klüften der roten Sandsteine.

6.3.3 Methodik und Fallbeispiel für die Bestimmung des Trennflächengefüges

Eine Grundvoraussetzung für die Bestimmung der Trennflächendichte ist das Erkennen der Trennflächen. Bereits an dieser Stelle können sich in einer Lagerstätte für Naturwerksteine Schwierigkeiten ergeben, da Trennflächen beispielsweise auf den frischen Anschnitten von Marmorwänden nur unzureichend sichtbar sein können oder, wie etwa in einigen Granit-Lagerstätten, durch unvoreilhaftige Abbaumethoden induziert werden und anschließend natürliche Trennflächen vortäuschen. Auch Experten haben bei der Beurteilung von Trennflächen manchmal Schwierigkeiten. In diesem Zusammenhang sei kurz ein Test erwähnt, bei dem Ewan et al. (1983, in Palmström 1995) einen Aufschluss über eine Länge von 10 Metern von sechs Experten hinsichtlich der Kluftverteilung haben aufnehmen lassen. Die Autoren erhielten nach Abschluss der Kluftaufnahme sechs verschiedene Ergebnisse (Koch-Moeck 2005).

Für die Aufnahme von Trennflächen kommen im Allgemeinen verschiedene Methoden zur Anwendung. Dies ist zum einen die Beobachtung und Aufnahme aus übertägigen bzw. untertägigen Aufschlüssen, zum anderen die Beobachtung und Aufnahme aus Bohrkernen. Darüber hinaus sind geophysikalische Messmethoden wie beispielsweise Georadar möglich (siehe auch Singewald 1992). Die Aufnahme von Trennflächen und deren Raumlage kann mit einem Gefügekompas oder auch mittels neuerer elektronischer Aufnahmetechnik, z.B. mit Bohrlochradar (Motoyuki & Moriyasu 2000) oder Radar (Feng et al. 2001), erfolgen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit erfolgte die Aufnahme des Trennflächengefüges durch Beobachtungen im Aufschluss, d. h. über ein so genanntes „scanline sampling“ bzw. „window sampling techniques“ (ISRM 1978, Priest 1993). Die räumliche Anordnung der Trennflächen wurde dabei konventionell mit einem Gefügekompas erfasst. Um zu einer Aussage über die Abstandsverteilung der Klüfte zu gelangen, wurden in den Lagerstätten verschiedene Messlinien und Messfenster angelegt (Abb. 6.11), entlang derer die Position und - soweit möglich - die Orientierung und die Ausbildung der jeweiligen Trennflächen aufgenommen wurde. Die Kluftaufnahme muss an einer Lagerstättenwand immer vertikal und horizontal erfolgen, so dass in diesem Arbeitsschritt bereits zwei Kluftscharen dokumentiert werden können (z.B. Kluftchar A und C durch Beproben der Abbauwand 1 in Abb. 6.11). Um eine oder mehrere Kluftscharen zu erfassen, sollten immer Abbauwände gewählt werden, die senkrecht zum Streichen der Trennflächen verlaufen.

Ein generelles Problem bei der Aufnahme von Diskontinuitäten besteht in der dreidimensionalen Ausbildung der Lagerstätten und der zweidimensionalen Ausbildung ihrer Trennflächen. Um auch solche Trennflächen zu erfassen, die parallel zur Messlinie verlaufen und auf der Bruchwand nicht austreichen, muss eine zweite Messlinie bzw. ein zweites Messfenster im rechten Winkel zur bereits aufgenommenen Lagerstättenwand beprobt werden (Abbauwand 2 in Abb. 6.11). Nur auf diese Weise können Prognosen zur räumlichen Verteilung des Trennflächensystems in der Lagerstätte abgeschätzt werden. Ein weiteres Problem ergibt sich, wenn durch die Geometrie der Lagerstätte lediglich zwei Abbauwände frei zugänglich sind, die zwar senkrecht zueinander angeordnet sind, dabei jedoch keine sich im Festgestein schneidenden Trennflächen aufweisen (Abbauwand 2 und 1a in Abb. 6.11). Die

Kluftaufnahme erfolgt dabei für einen bereits abgebauten Gesteinskörper (Abb. 6.11), wobei auch auf diese Weise problemlos eine zuverlässige Aussage über die Bauwürdigkeit einer Lagerstätte abgeleitet werden kann (siehe Kluftaufnahme zur Lagerstätte S-White im weiteren Verlauf dieses Kapitels). Partien überhalb der Messlinien (weiße Fläche in Abb. 6.11) können zudem mit Abraum bedeckt oder morphologisch stark strukturiert sein. In diesem Fall kann die Termination, also die räumliche Ausdehnung der Trennflächen, nicht vollständig nachvollzogen werden. Als Folge wird unter Umständen von einer Kluftlänge in der Größenordnung mehrerer zehn Meter ausgegangen, obwohl diese bereits nach wenigen Dezimetern hinter der Abbauwand endet (Kluftchar B in Abb. 6.11).

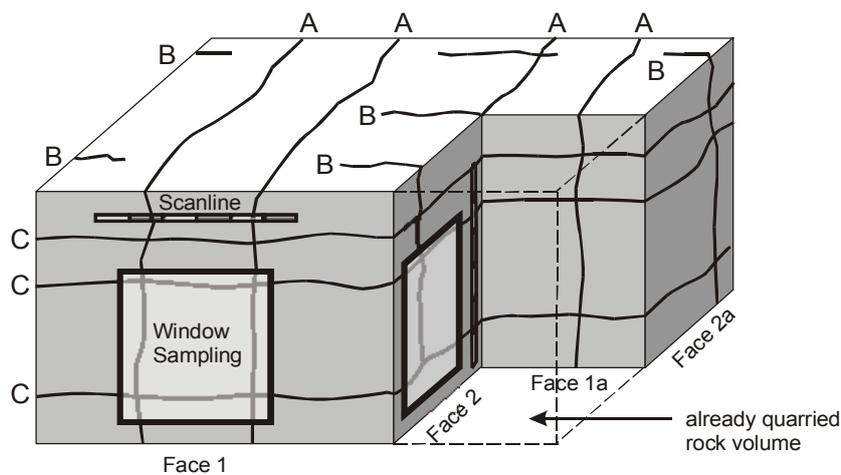


Abb. 6.11: Schematische Darstellung für die Aufnahme des Trennflächengefüges (modifiziert nach Smith 1999). Erläuterungen im Text dieses Kapitels.

Während bei der Bewertung eines Gesteinsvorkommens zu ingenieurgeologischen Fragestellungen zwischen 150 und 350 Diskontinuitäten an etwa 5 bis 15 verschiedenen Lokalitäten vorgenommen werden sollten (Priest 1993), reichen für die Abschätzung von Blockgrößen einer Naturwerkstein-Lagerstätte im Allgemeinen weniger Messwerte aus (Smith 1999). Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden je nach Größe einer Lagerstätte bis zu 100 Kluftmessungen vorgenommen. Als Trennflächen wurden in den Lagerstätten gemäß der oben angeführten Klassifikation (Abb. 6.7) alle Oberflächen wie beispielsweise saiger stehende oder geneigte Kluftflächen (Längsklüfte, Querklüfte, Diagonalklüfte, Störungen), Schichtflächen oder Haarrisse berücksichtigt. Intrinsische Charakteristika wie etwa Calcit- oder Quarzadern wurden ebenfalls dem Trennflächengefüge zugeordnet, wenn abzusehen war, dass sich die Flächen im Zuge des Blockausbringens öffnen und somit die Form und Größe der Rohblöcke beeinträchtigen bzw. reduzieren.

Im Folgenden soll anhand eines Fallbeispiels die Kluftaufnahme der Sandstein-Lagerstätte S-White vorgestellt werden. Die Kluftaufnahme konzentriert sich auf zwei Abbauwände mit NE-SW- bzw. NW-SE-streichender Orientierung, entlang derer jeweils ein horizontales Profil als Messlinie angelegt wurde. Die Profile erstrecken sich über eine Distanz von 10.70 m bzw. 15.80 m. Die Aufnahme der Lagerklüfte erfolgte über ein vertikales Höhenprofil von 4 m, das im Hangenden von mehreren Metern Abraum bedeckt wird (Abb. 6.12a). Innerhalb des

vertikalen Profils tritt auf einer Höhe von etwa 0.8 m eine latent ausgebildete Schichtgrenze auf. Obwohl der Abraum unter ökonomischen Gesichtspunkten eine entscheidende Rolle bei der Bewertung der Lagerstätten spielt, wird die gesamte für den Werksteinabbau uninteressante Sequenz aufgrund der besseren Übersicht in dem vorliegenden Beispiel nicht berücksichtigt.

Wie bei einigen anderen Lagerstätten, die im Rahmen dieser Arbeit aufgenommen wurden, handelt es sich in diesem Fall nicht um die Aufnahme der gesamten Lagerstätte, sondern vielmehr um einen repräsentativen Ausschnitt, der die Kluftdichte des Abbaugebietes charakterisieren soll. Die vollständige Aufnahme aller Abbauwände war bei einer Vielzahl der Lagerstätten aufgrund der Zugänglichkeit (höhere Abbauwände, aktive Blockgewinnung) nicht möglich.

Die Trennflächenelemente der Lagerstätte S-White sind zusammen mit ihren wesentlichen Merkmalen in Tabelle 6.2 dargestellt und in Abbildung 6.12b in Bezug auf ihre Abstandsweite und die räumliche Orientierung skizziert.

Tab. 6.2: Messergebnisse der Kluftaufnahme von zwei Profilen der Lagerstätte S-White.

Lagerstätte S-White				
Profil NW-SE, Streichrichtung 310°				
Kluftnummer	Abstandsweite [cm]	Einfallsrichtung	Einfallswinkel	Charakteristika
1	---	332	86	offen, Fe-Belag
2	20	150	85	offen, Fe-Belag
3	70	148	89	offen, Kluft springt
4	40	142	85	offen, Fe-Mn-Belag
5	150	134	89	offen, Mn-Fe-Belag
6	40	336	85	offen, Fe-Mn-Belag
7	110	130	85	offen, Fe-Mn-Belag
8	120	318	87	offen, Fe-Mn-Belag
9	140	144	85	offen, uneben, Fe-Mn-Belag
10	380	318	89	offen, Mn-Fe-Belag
Profil NE-SW, Streichrichtung 220°				
Kluftnummer	Abstandsweite [cm]	Einfallsrichtung	Einfallswinkel	Charakteristika
11	---	040	89	offen, Mn-Fe-Belag
12	290	220	82	offen, Fe-Belag
13	310	218	85	offen, Mn-Fe-Belag
14	170	046	83	Störung
15	490	226	60	offen, Fe-Mn-Belag
16	130	222	84	Störung
17	190	220	80	offen, Fe-Mn-Belag

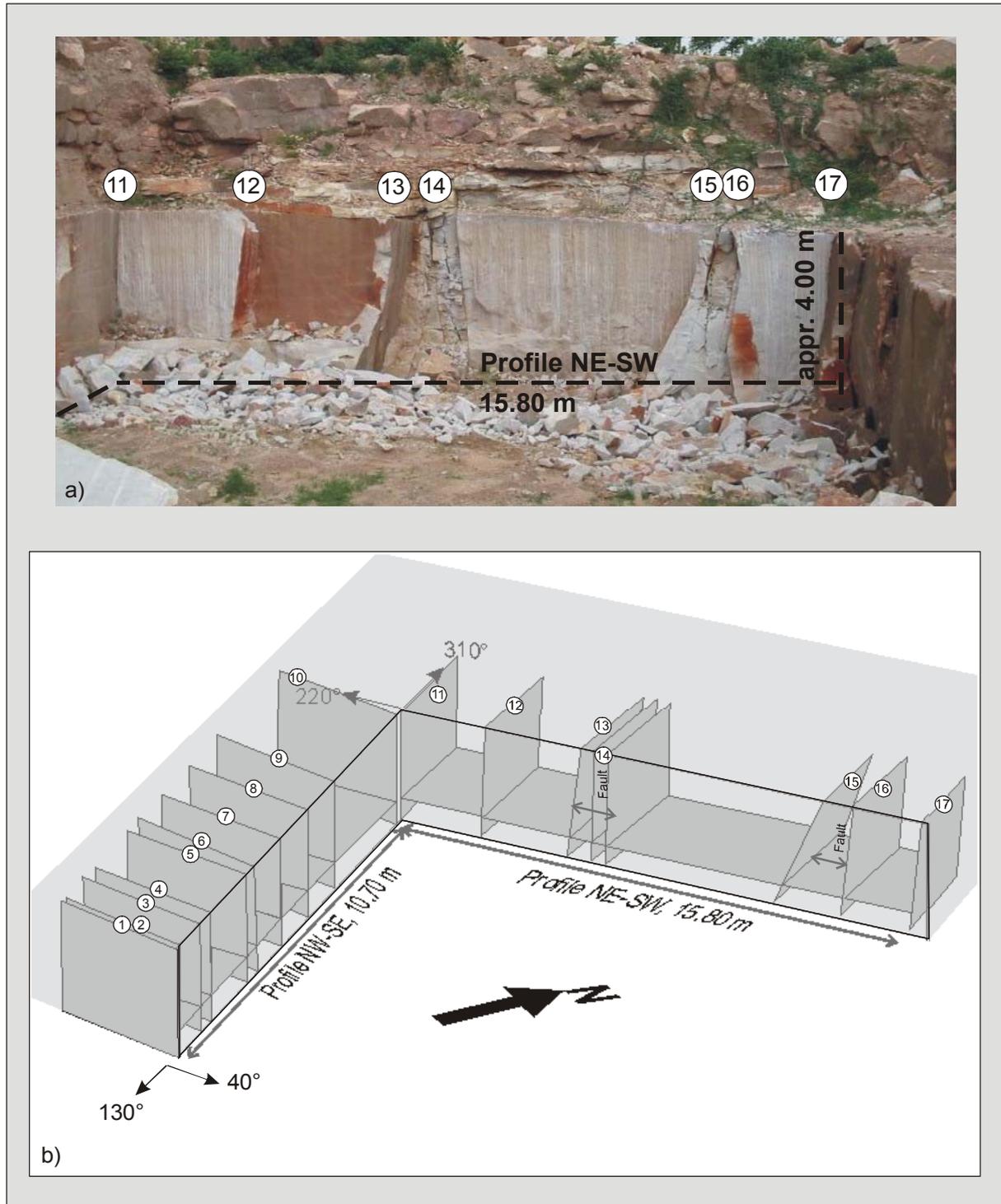


Abb. 6.12: Kluftaufnahme der Sandstein-Lagerstätte S-White. a) Horizontales und vertikales Messprofil an der NE-SW-streichenden Abbauwand. b) Schematische Darstellung der Abstandsverteilung und Orientierung für das Trennflächensystem. Erläuterungen im Text dieses Kapitels.

Als wohl auffallendstes Trennflächenelement durchziehen zwei NW-SE-streichende Störungen das Abbaugelände, die eine Mächtigkeit von bis zu 1.7 m aufweisen. Die räumliche Ausdehnung der Klüfte und Störungen im Festgestein kann in NE' und SE' Richtungen aufgrund der Bedeckung mit Abraum nicht eindeutig ermittelt werden. In Abbildung 6.12b sind die Trennflächen daher nur mit wenigen Metern angedeutet. Aufgrund der im Vorfeld

bereits angesprochenen Problematik, die sich aus der für die Kluftaufnahme wenig vorteilhaften Geometrie einer Lagerstätte ergeben kann, können auch im vorliegenden Fall anhand der Kluftmessungen lediglich Aussagen für den bereits abgebauten Teil der Lagerstätte (vgl. Abb. 6.11) abgeleitet werden. Abbildung 6.13 skizziert schematisch die Verteilung des Kluftsystems innerhalb dieses Bereiches, wobei angenommen wird, dass die Lagerstätte vollständig von Klüften durchzogen wird.

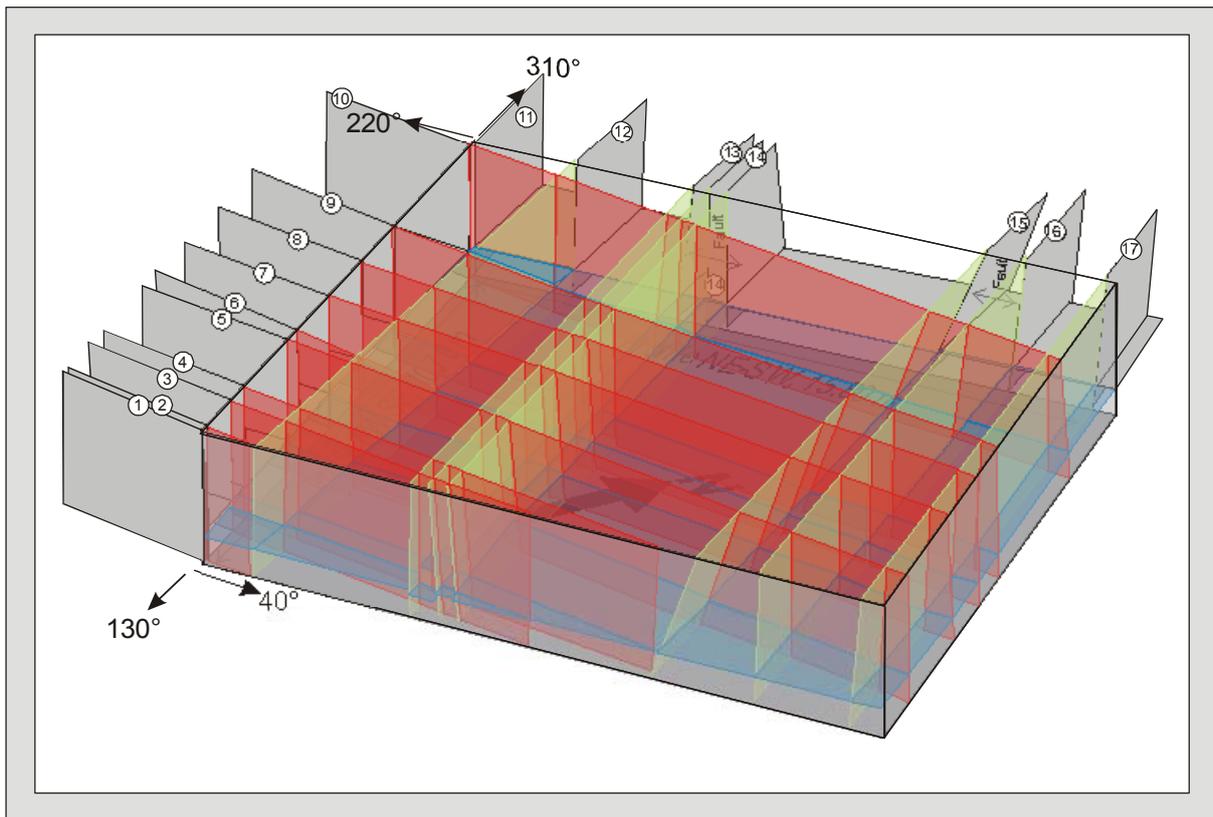


Abb. 6.13: Schematische Verteilung der Klüfte und Schichtflächen für den bereits abgebauten Bereich unter Annahme durchgehender Trennflächen. Erläuterungen im Text dieses Kapitels.

Durch die Visualisierung des Kluftmusters wird deutlich, wie sehr die Blockgrößen und die Blockformen innerhalb einer Lagerstätte von der Abstandsverteilung und der Orientierung der Kluftflächen abhängen. Insbesondere NE' und SE' der Störung (Kluftnummer 14, vgl. Abb. 6.13), und hier relativ nah an der aktuellen NE-SW-streichenden Abbauwand zwischen den Klüften 12-13 sowie 14-15, konnten in der Vergangenheit sehr wahrscheinlich großvolumige Rohblöcke ausgebracht werden, was auch für den zukünftigen Abbau tieferer Sohlen zwischen den Klüften 12-13 gelten könnte. Aus der Orientierung einzelner Trennflächen lässt sich bereits ableiten, dass diese Voraussetzungen für den Bereich 14-15 nicht gegeben sind. Da Kluft 15 mit 60° relativ flach nach SW hin einfällt, sollte es zwischen den beiden Klüften zu einer progressiven Reduktion der Blockgrößen in tieferen Stockwerken kommen. Darüber hinaus ist an dieser Stelle mit einer unvorteilhaften Blockgeometrie in tieferen Sohlen zu rechnen, da zwei gegenüberliegende Flächen (NW-SE-streichende Klüfte) in spitzen Winkel aufeinander zulaufen.

6.4 Weitere lagerstätten-kontrollierende Elemente der thailändischen Abbauggebiete

Neben dem Trennflächengefüge, das den Abbau aller Varietäten mehr oder weniger deutlich diktiert, sind die thailändischen Werksteinlagerstätten durch weitere Einflussfaktoren gekennzeichnet, die sich individuell auf einzelne Lagerstätten auswirken (Tab. 6.3).

Zu den Einflussfaktoren zählen im Allgemeinen Variationen in der makroskopischen Erscheinung, die beispielsweise durch pigmentierend wirkende Farbelemente oder eine Modifizierung des strukturellen Gefügeinventars hervorgerufen werden. Änderungen in der Farbe treten insbesondere in den Sandstein-Lagerstätten auf und führen hier oftmals zu großen Unsicherheiten der Bruchegner bezüglich der längerfristigen Abbauplanung. Farbänderungen erscheinen darüber hinaus auch in der Mehrheit der Marmor-Lagerstätten sowie in den Granit-Lagerstätten MT-Orange1 und MT-Orange2 (Tab. 6.3). Während die unterschiedliche Ausbildung der Farbtöne bei den Marmoren in erster Linie auf die Zusammensetzung des ursprünglichen Kalksteins vor der Metamorphose zurückgeht, zeigen die Granite MT-Orange1 und MT-Orange2 eine Farbmodifikation durch Feldspat-Alterationen, die sich infolge von Tektonik und hydrothermalen Beeinflussung entwickeln konnten. Änderungen des Gefüges beschränken sich bei granitoiden Gesteinen überwiegend auf die porphyrischen Einheiten (Tab. 6.3), bei denen der Abbau durch die heterogene Verteilung der Feldspat-Porphyrklasten beeinflusst wird. Bei den Carbonatgesteinen treten Variationen im Gefüge aufgrund spröder und duktiler Deformationen, bei Sandsteinen durch den Wechsel von Horizontal- und Kreuzschichtung auf.

Weiterhin können Kontakte zu benachbarten Lithologien, wie in der Lagerstätte BT-Black, Störungen sowie die Intrusion von Gängen einen maßgeblichen Einfluss auf die Gewinnung der Naturwerksteine nehmen (Tab. 6.3). Metasomatose als lagerstätten-kontrollierendes Element beschränkt sich ausschließlich auf zwei Magmatite (Tab. 6.3) und steht vermutlich mit hydrothermalen Lösungen (NB-Orange) bzw. der Effusion vulkanischer Gänge im Zusammenhang (PTC-Black), die einen Stoffaustausch und letztlich lokale Änderungen im Dekor der Varietäten ermöglichten.

Neben der unterschiedlichen Farbausbildung in den Sandsteinen zählen Einschaltungen von Tonlagen und/ oder Tonlinsen als das wohl wesentlichste lagerstätten-kontrollierende Element für die untersuchten klastischen Lithologien (Tab. 6.3). Die Silifizierung der Sandsteine ist ein weiterer Faktor, der den Abbau der Einheiten kontrolliert (Tab. 6.3). Obwohl die Verkieselung auf diagenetische Prozesse zurückgeführt werden kann, ist nicht auszuschließen, dass Störungen, wie beispielsweise die NW-SE-streichende Störung in der Lagerstätte S-White (s. o.), für eine zusätzliche Verkieselung des Detritus in den Vorkommen weißer Sandsteine verantwortlich sind.

In einigen Fällen können sich Schwankungen im Grundwasserspiegel auf den Abbau der Vorkommen auswirken, weshalb auch dieser Faktor zu den lagerstätten-kontrollierenden Elementen gerechnet werden muss (Tab. 6.3). Bei granitoiden Gesteinen sind davon u. a. die Monzonite und Monzodiorite der Region Tak betroffen, bei Carbonatgesteinen die Marmore in der Provinz Nakhon Ratchasima. In den Sandsteinbrüchen können sich lokale Einschränkungen des Abbaus durch einen zu hohen Grundwasserspiegel in roten und grünen

Gesteinen ergeben (Tab. 6.3). Aufgrund der Abhängigkeit dieses Faktors von jahreszeitlichen Klimaten ist jedoch zu vermuten, dass wesentlich mehr Abbaugelände durch die Wasserhaltung beeinflusst werden.

Tab. 6.3: Individuelle Einflussfaktoren auf den Abbau in thailändischen Werksteinlagerstätten und die davon betroffenen Varietäten.

Lagerstätten-kontrollierendes Element	Granitoide, Gneise, Hornblendit	Carbonatgesteine	Sandsteine
Farbänderungen	MT-Orange1/2,	PK-Grey/Pink, TS-Grey/Pink, PC-White/Red, KH-Red	PC-Green, S-Red, S-Brown, S-Yellow, S-White/Rainbow
Änderungen des Gefüges	BN-Pink, MC-Yellow, SP-Grey	PK-Grey/Pink, TS-Grey/Pink, PC-White/Red, KH-Red	S-Brown, S-Yellow, S-White/Rainbow
Änderungen des Gefüges und der Mineralogie	BT-Black, BT-White	PC-White/Red	-
Kontakte zu benachbarten Einheiten	BT-Black	-	-
Störungen	-	PC-White/Red	S-White
Intrusion von Gängen	BT-Violet	BTC-White	-
Metasomatose	NB-Orange, PTC-Black	-	-
Tonlagen	-	-	S-Red, S-Brown, S-Yellow, S-White/Rainbow
Verkieselung	-	-	S-White/Rainbow
Grundwasser	BT-Blue2, BT-Black, PS-Grey	BTC-White, PC-White/Red, PC-Grey	PC-Green, S-Red

6.5 Rohblockhöffigkeiten

Die Abstandsverteilung und Orientierung der Trennflächen sowie die individuellen lagerstätten-kontrollierenden Elemente beeinflussen maßgeblich die Wirtschaftlichkeit einer Lagerstätte. Diese Wirtschaftlichkeit kann über die so genannte Rohblockhöffigkeit (siehe z. B. Singewald 1992) ausgedrückt werden. Die Rohblockhöffigkeit einer Lagerstätte beschreibt den auszubringenden Anteil von Rohblöcken in verarbeitungsgerechten

Dimensionen und ist damit ein entscheidender Faktor bei der Bewertung von Naturwerksteinlagerstätten.

In den letzten drei Jahrzehnten sind zahlreiche Bemühungen unternommen worden, die Blockformen, Blockgrößen und deren Verteilung im Festgestein vorherzusagen (siehe Lu & Latham 1999). Neben einer lagerstättenkundlichen Nutzung der Ergebnisse (Cunningham 1983, Da Gama 1983, Ord & Cheung 1991, Wang et al. 1991, Singewald 1992, Weber et al. 2001) standen bei allen Ansätzen auch montangeologische Fragestellungen (Franklin 1974, Hoek et al. 1992) und Stabilitätsanalysen für den Abbau geklüfteter Gesteinsvorkommen (Hoek & Bray 1981, Goodman & Shi 1986) im Vordergrund.

Die International Society of Rock Mechanics (1978) schlug für die Bestimmung einer repräsentativen in-situ Blockgröße einen so genannten Blockgrößen-Index (I_b) vor, der jedoch aufgrund einer rein optischen Einschätzung des Lagerstättenmaterials lediglich zu semi-quantitativen Aussagen kommt und darüber hinaus keine Angaben zur Häufigkeitsverteilung von Blockgrößen innerhalb des Gesteinsverbandes macht. Nachteilig ist darüber hinaus, dass eine solche Bestimmung nur in Lagerstätten mit optimalen, d. h. regelmäßigen und orthogonalen Kluftsystemen zur Anwendung kommen kann.

In den meisten Fällen ist es aufgrund der komplex angelegten, heterogenen Kluftsysteme erforderlich, die Blockvolumina und -formen anhand der Abstandsverteilung des Trennflächengefüges zu ermitteln. Hierzu entwickelten beispielsweise Kazi & Sen (1985) ein aus dem Rock Quality Designation (RQD)-Index von Deere (1964) hervorgehenden Volumetric Rock Quality Designation (V. RQD)-Index, der eine erste Einschätzung von der Verteilung der Blockvolumina im Felsgestein erlaubte. Ansätze zur Korrelation von in-situ Blockgrößen mit dem RQD-Index sowie einem so genannten Volumetric Discontinuity Count (J_v), der die Anzahl an Diskontinuitäten pro Meter innerhalb einer Kluftchar beschreibt (International Society of Rock Mechanics 1978), finden sich beispielsweise bei Palmström (1985). Alle Ansätze beinhalten jedoch in erster Linie Informationen über die durchschnittliche Blockgröße in der Lagerstätte und nur untergeordnet Informationen über Höffigkeit der Blockgrößen innerhalb des Gesteinsverbandes.

Mit einer von Singewald (1992) auf der Basis des ingenieurgeologisch/ felsmechanischen Bohrkernparameters der RQD-Indexzahl konzipierten und nach Weber et al. (2001) modifizierten Methode zur Trennflächenanalyse ist es möglich, die Rohblockhöffigkeit für Lagerstätten zu erfassen. Nachteilig wirkt sich dabei jedoch erneut der Umstand aus, dass die Methode lediglich in Lagerstätten mit orthogonalem Trennflächensystem zur Anwendung kommen kann und die von Singewald (1992) definierten Mindestanforderungen beinhaltet (vgl. Kap. 6.2.2).

In den 1990er Jahren etablierten sich zahlreiche Ansätze auf der Grundlage moderner Computersysteme (z.B. Stewart 1986, Xu & Cojean 1990, Kleine & Villaescusa 1990, Wang et al. 1991, Wang et al. 1992, Aler et al. 1996), die die Blockgrößenverteilungen für verschiedene Anwendungsbereiche ermitteln. Im Rahmen des CAD-PUMA Projekts (Crassoulis et al. 1999; Germann et al. 2001) wurde ein computer-gestütztes Programm für die Planung und Entwicklung untertägiger Marmorproduktion entwickelt, das durch die Analyse von Blockgrößen und Rohblockhöffigkeiten entscheidend zu einem kosteneffektiven

Abbau und darüber hinaus zu sicheren Abbaubedingungen Untertage beiträgt (siehe Koch-Moeck 2005).

Die vorstehend genannten Ansätze und Verfahren zur Ermittlung der Rohblockhöflichkeit einer Lagerstätte basieren im Wesentlichen auf den Trennflächenabständen im Gesteinsverband. In Kapitel 6.4 wurde deutlich, dass auch andere Faktoren, wie beispielsweise Dekoränderungen des Gesteins, das Ausbringen der Rohblöcke beeinflussen. Für die untersuchten Abbaugebiete erfolgte daher eine Abschätzung der Ausbringungsraten (Tab. 6.4), die zwar alle lagerstätten-kontrollierenden Elemente berücksichtigt, jedoch wegen ihres rein subjektiven Charakters nur für einen Vergleich der Lagerstätten untereinander herangezogen wird. Bei den Angaben in Tabelle 6.4 wird deutlich, dass einige Lagerstätten hohe Ausbringungsraten aufweisen (bspw. BT-Violet, PK-Grey/Pink), während andere Lagerstätten durch deutlich geringere Ausbringungsraten gekennzeichnet sind (bspw. MT-Orange2, HH-Grey). Die Aussagen sollen zusammen mit dem Trennflächengefüge der Lagerstätten im Diskussionsteil (Kapitel 7) dieser Arbeit eingehender erörtert werden.

Tab. 6.4: Abschätzung der Ausbringungsraten für die untersuchten Lagerstätten unter Berücksichtigung aller lagerstätten-kontrollierenden Elemente. Die Angaben beziehen sich auf Rohblöcke mit einer Kantenlänge zwischen 1.5 und 2.5 m.

Granite, Gneise und Hornblendit		Marmore und Kalksteine		Sandsteine	
Lagerstätte	Rohblockhöflichkeit	Lagerstätte	Rohblockhöflichkeit	Lagerstätte	Rohblockhöflichkeit
MT-Orange1	sehr hoch	PK-Grey/Pink	sehr hoch	S-White	mittel
BT-Violet	sehr hoch	PC-White/Red	sehr hoch	S-Brown	niedrig
BT-White	hoch	PC-Grey	hoch	S-Yellow	niedrig
BN-Pink	hoch	KH-Red	hoch	PC-Green	mittel
BT-Black	hoch	TS-Grey/Pink	mittel	S-Red	niedrig
SN-Blue	hoch	BTD-White	n/a		
NB-Orange	mittel				
SP-Grey	mittel				
PS-Grey	mittel				
BT-Blue2	mittel				
PTC-Black	mittel				
MT-Orange2	niedrig				
HH-Grey	niedrig				
BT-Blue1	niedrig				
MC-Yellow	niedrig				

7. DISKUSSION UNTER BERÜCKSICHTIGUNG METHODOLOGISCHER ASPEKTE ZUR ERFASSUNG UND BEWERTUNG DER UNTERSUCHTEN VORKOMMEN

Die nun folgende Diskussion soll unter Berücksichtigung methodologischer Aspekte zur Erfassung und Bewertung von Lagerstätten für Naturwerksteine erfolgen. Als methodologische Aspekte werden an dieser Stelle vorgestellt:

- a) eine qualitative Bewertung der Abbauprodukte hinsichtlich ihrer Eignung als Naturwerkstein, basierend auf den mineralogischen und gesteintechnischen Eigenschaften (Kap. 7.1),
- b) eine Bewertung des Trennflächengefüges und der Rohblockhöflichkeit auf der Grundlage der Kluftaufnahme (Kap. 7.2),
- c) die Ableitung von Lagerstättenmodellen und Strategien für deren Abbau aus individuellen lagerstätten-kontrollierenden Elementen (Kap. 7.3) sowie
- d) Ansatzpunkte für die Exploration weiterer Vorkommen in Thailand auf der Grundlage regional-stratigraphischer Aspekte (Kap. 7.4).

7.1 Qualitative Bewertung der Abbauprodukte hinsichtlich ihrer Eignung als Naturwerkstein

Die Eignung von Naturwerksteinen als Baustoff ist im Allgemeinen von dem Ausmaß der Verwitterungsschäden abhängig, die die jeweiligen Gesteine im Laufe ihrer Exposition am Bauwerk erfahren. Unter Verwitterungsschäden ist die Gesamtheit aller negativen Veränderungen der Gesteinseigenschaften zu verstehen, die sich als Folge der Witterungseinflüsse durch chemische, biologische oder physikalische Prozesse einstellen.

7.1.1 Bewertungskriterien und potentielle Verwitterungsschäden bei Naturwerksteinen

7.1.1.1 Bewertungskriterien für die Anwendung von Naturwerksteinen

Ein entscheidendes Kriterium bei der Beurteilung des Rohstoffes und seiner Lagerstätten sind die optischen Eigenschaften eines Naturwerksteins, da von der Ästhetik des Produktes die Marktfähigkeit des Materials abhängt (Selonen et al. 2000). Das Dekor eines Gesteins wird von dessen Farbe und dem Gefüge bestimmt; zwei Faktoren, die hinsichtlich der Etablierung des Produktes am nationalen und internationalen Markt sowie der langfristigen Versorgung von Kunden eine hohe Homogenität aufweisen sollten. Bei einfarbigen Gesteinen werden kleinere Abweichungen in Farbe und Struktur im Allgemeinen toleriert, jedoch gelten starke Verfärbungen durch Einschlüsse, Mineral-Cluster oder Bänderungen als Produktfehler,

die den Wert des Naturwerksteins erheblich mindern können (Selonen et al. 2000). Mehrfarbige Gesteine wie beispielsweise Gneise oder gneisische Granite zeigen aufgrund ihrer oftmals heterogenen Vorzeichnungen eine größere Variabilität im makroskopischen Erscheinungsbild, weshalb sich unregelmäßige Strukturen im Dekor dieser Gesteine weniger negativ auswirken, oftmals sogar erwartet werden.

Welche gesteintechnischen Eigenschaften ein Naturwerkstein mit sich bringen sollte, um den allgemeinen bautechnischen Anforderungen zu genügen, ist anhand einiger Bewertungskriterien in Tabelle 7.1 dargestellt.

Tab. 7.1: Bewertungskriterien für die bautechnische Eignung von Naturwerksteinen (modifiziert nach Hörenbaum 2005). Siehe dazu Anmerkungen im weiterführenden Text.

Eigenschaften	Parameter	Primäre Anforderungen	Sekundäre Anforderungen	
Gefügeeigenschaften	Kornbindung	Granitoide und Marmore:		-
		positiv	Interlobate Kontakte	
		negativ	Polygonale Kontakte	
		Sandsteine:		
		positiv	Quarzitische Matrix	
		negativ	Tonige Matrix	
Hygrische Eigenschaften	Kapillare Wasseraufnahme	Vorzugsweise niedrig	Vorzugsweise isotrop	
	Koeffizient der Wasseraufnahme	$W < 2.0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \sqrt{\text{h}})$	Vorzugsweise isotrop	
	Koeffizient der Wasserdampfdiffusion	Vorzugsweise hoch	Vorzugsweise isotrop	
	Volumenänderungen	Vorzugsweise niedrig	Vorzugsweise isotrop	
	Sättigungswert	$S < 0.7$	-	
Thermische Eigenschaften	Volumenänderungen	Vorzugsweise niedrig	Vorzugsweise isotrop	
	Restdehnung	Keine	-	
Mechanische Eigenschaften	Druckfestigkeiten	Vorzugsweise hoch	Vorzugsweise isotrop	
	Spaltzugfestigkeiten	Vorzugsweise hoch	Vorzugsweise isotrop	
	Biegezugfestigkeiten	Vorzugsweise hoch	Vorzugsweise isotrop	
	Abriebfestigkeiten	Vorzugsweise hoch	Vorzugsweise isotrop	
	E-Modul	Vorzugsweise niedrig	Vorzugsweise isotrop	
Beständigkeit	Massenverluste infolge von Frost-Tau-Wechseln	Vorzugsweise niedrig	-	
	Massenverluste infolge von Salzkristallisation	$KR < 1.5 \text{ g}/\text{cm}^3$	-	

Ein weitgehend verwitterungsbeständiges Gestein ist im Allgemeinen durch hohe mechanische Kennwerte charakterisiert, so dass Baumaterialien aus Naturwerkstein in der Regel eine hohe Spaltzug-, Biegezug- und Druckfestigkeiten aufweisen sollten. Positiv zu bewerten wäre darüber hinaus auch ein möglichst geringer E-Modul sowie ein geringer Materialverlust infolge von Abriebkräften. Es ist davon auszugehen, dass in der Praxis wohl eine Vielzahl sehr verwitterungsresistenter Gesteine existiert, welche der einen oder anderen

Eigenschaft der hier angeführten Kriteriensammlung nicht genügt. Es handelt sich bei den Bewertungskriterien daher nicht um Anforderungen, die in ihrer Gesamtheit zwingend von den Werksteinen erfüllt werden müssen, sondern vielmehr um Orientierungshilfen für die Beurteilung und die Auswahl eines Naturwerksteins als Baustoff (Hörenbaum 2005). Dass kaum ein Gestein alle Bewertungskriterien erfüllen kann, liegt wohl nicht zuletzt auch daran, dass einige Aspekte wie beispielsweise hohe Zugfestigkeiten in Kombination mit einem geringen E-Modul praktisch nicht realisiert werden können (Hörenbaum 2005).

7.1.1.2 Potentielle Verwitterungsschäden bei Granitoiden

Magmatische Gesteine, hier insbesondere Granite, stellen werkstofftechnisch die am wenigsten empfindliche Gesteinsgruppe dar. Im frischen Zustand sind die Lithologien optimal für den Einsatz als Naturwerkstein geeignet, da die Gesteine im Allgemeinen eine hohe Festigkeit mit ausgezeichneter chemischer Resistenz und guter Beständigkeit vereinen. Viele Granite zeigen daher unter gemäßigten klimatischen Bedingungen ein relativ stabiles Materialverhalten. Beispiele aus der praktischen Anwendung demonstrieren, dass einige Varietäten, die bereits vor mehr als 100 Jahren poliert wurden, heute nur wenige Anzeichen einer (zumindest optischen) Qualitätsminderung aufweisen (Bell 2000).

Zu den wohl wesentlichsten Verwitterungsschäden bei Graniten und Gneisen zählen Verfärbungen der Minerale. Die meisten Verfärbungen sind auf Alterationsprozesse zurückzuführen, in deren Rahmen die pigmentierend wirkenden Minerale modifiziert oder abgebaut werden. Diese Prozesse bewirken im Allgemeinen eine unästhetische Farbveränderung von Biotiten, die sich in gelben und braunen Verfärbungen durch Fe- und Mn-Hydroxide ausdrückt. Aus dem angewitterten Mineral werden minimale Fe^{2+} Anteile mobilisiert, die dann größere Bereiche des Gesteins einfärben. Rote Granate tragen oftmals zu einem sehr ansprechenden Dekor von Gneisen bei und können dennoch indirekt zu einer erheblichen Beeinträchtigung der ästhetischen Gesteinseigenschaften führen. An Granat gebunden treten nämlich häufig kleinere Biotit-Schuppen auf, die im Zuge der Verwitterung wiederum den mineralspezifischen Alterationseffekten unterliegen können.

Granite und Gneise können sehr sensibel auf Verwitterungen reagieren, wenn die Alteration bei Feldspäten ansetzt, die eines der Hauptmineralbestandteile von granitoiden Gesteinen darstellen. Feldspatverwitterung vollzieht sich unter der Bildung des Tonminerals Kaolinit und gibt sich anhand gelblicher oder weißer Verfärbungen der alterierten Minerale zu erkennen. Die chemische Silikatlösung und -zerstörung setzt vornehmlich in relativ saurem Milieu ein und kann zudem zu der Ausbildung unterschiedlich dicker, tonmineralreicher Krusten führen (Grasegger 1997). Abgesehen von der ästhetischen Beeinträchtigung der Gesteinsoberfläche repräsentieren Krusten, Ausblühungen und Verfärbungen oftmals auch Vorstufen von weitaus gravierenderen Verwitterungsprozessen, die das Gestein durch Abtrennung ganzer Materialpartien schädigen können.

Neben chemischer Silikatlösung weisen einige Granite und Gneise einen Materialverlust durch das mechanische Herauslösen von Mineralen mit differenzierter Härte auf. Ein solcher Materialverlust macht sich besonders deutlich bei polierten Platten bemerkbar, da das

Abtragen der Mineralbestandteile zu matten Stellen auf der Oberfläche und damit zu einer Beeinträchtigung der Politur führt.

Mit der Modifikation von insbesondere Feldspäten und Biotiten sind bei granitoiden Gesteinen Verwitterungseigenschaften verbunden, die sich letztlich auch auf die technischen Eigenschaften des Materials auswirken. Von großer Bedeutung ist dabei eine mit der Alteration einhergehende Erweiterung des Porenraumes. Poschlod (1990) konnte belegen, dass bei kristallinen Gesteinen durch die sehr feinen, spaltenförmigen Poren Wasser und Schadstoffe bis tief in das Innere der Gesteine gesaugt werden. Durch die Interaktion von Kapillarkondensation und Frost-Tau-Beanspruchungen kann es dann in einem weiteren Schritt schließlich relativ schnell zu Vergrusungen kommen (Grasegger 1997), die bis hin zur Ausbildung von Abschalungen reichen.

7.1.1.3 Potentielle Verwitterungsschäden bei Carbonatgesteinen

Kalksteine und Marmore sind in vielen Fällen als werkstofftechnisch unproblematisch einzustufen (Rütik 1997). In der Gruppe der Carbonatgesteine existieren jedoch auch zahlreiche Ausnahmen, so dass gerade vor der Verwendung eines gewählten Kalksteins oder Marmors der Baustoff kritisch beurteilt werden muss.

Während die Verwitterung bei Graniten und Gneisen bereits im Anfangsstadium das Gesteinsinnere betreffen kann, spielen sich die Verwitterungsprozesse bei vielen Kalksteinen an der Oberfläche ab. Der Grund für die oberflächennahe Alteration liegt in der wesentlich kleineren Ausbildung der Minerale, die nur eine gering leitende kapillare Porosität zulässt und damit den Feucht- bzw. Schadstofftransport in das Gesteinsinnere erschwert. Dennoch ist auch hier mit einem weiteren Fortschreiten der Verwitterung in die zentralen Bereiche des Gesteins zu rechnen.

Ein Großteil der Verwitterungsschäden bei Carbonatgesteinen ist aufgrund der chemischen Angreifbarkeit der Calcite mit Anlösungseffekten verbunden. Diese Anlösungen äußern sich in einer reliefartigen Verwitterung und sind in erster Linie eine Funktion der Minerallöslichkeit (Ramdohr & Strunz 1978, Garrels & Christ 1990) sowie der Rauigkeit einer Fläche. Da chemische Lösungsraten immer proportional zur Oberfläche sind (Grasegger 1997), bedeutet dies für die Anwendung, dass stark aufgeraute oder natürlich belassene Oberflächen wesentlich höhere Lösungsintensitäten aufweisen als polierte Flächen. Gleiches gilt jedoch auch für die Oberflächen von beispielsweise Granitoiden oder Sandsteinen.

Die chemische Lösung von Mineralbestandteilen kann bei Carbonatgesteinen häufig zu einer signifikanten Vergrößerung des Porenraumes sowie zur Rissbildung führen, wenn Korngrenzen angelöst und anschließend bei geringer mechanischer Beanspruchung aufgeweitet werden. Die durch Mikrorisse bedingte Erweiterung des Porenraums bildet anschließend neue Wasserwegsamkeiten und ein Wasserrückhaltevermögen, das beispielsweise die Kristallisation von Salzen im Porenraum ermöglicht (Grasegger 1997). Bei der Kristallisation von Salzen können sich Drücke bis zu 400 N/mm² entfalten (Winkler &

Singer 1972), die als Sprengdruck auf die Mineralbindungen wirken und die Korngrenzen aufweiten. Ist die Kohäsion der Komponenten durch Adern, Stylolithen oder Fossileinschlüssen beeinträchtigt, neigen Kalksteine bevorzugt zu Brüchen und Absplitterungen.

Marmore können ebenfalls eine Auflockerung und Entfestigung des Kornverbandes erfahren (vgl. Grimm 1990, Laux 1992, Köhler 1992), was sich häufig in einem zuckerkörnigen Zerfall der Oberfläche äußert. Bei diesem Prozess lösen sich partienweise Einzelkörner oder großflächigere Teile ab, die mehr aus einem stark aufgelockerten Kornverband bestehen. Als Ursache dafür führen eine Reihe von Autoren (z. B. Köhler 1992) die Einkristalleigenschaften von Calcit an, der sich bei thermischer Beanspruchung in Richtung parallel zur c-Achse ausdehnt und dabei gleichzeitig in Richtung parallel zur a-Achse kontrahiert (vgl. Kap. 5). Die sich anschließenden, natürlichen Feuchte- und Trocknungszyklen eingedrungener Wässer können dabei zu derartig großen Spannungen führen, dass sogar die Kernbereiche von Bauteilen zersetzt und zermürbt werden (Grasegger 1997). Da in diesem Zusammenhang der Einfluss von Feuchtigkeit eine entscheidende Rolle spielt (Grimm 1990), treten die Alterationen besonders in Erscheinung, wenn das verwitterungssensible Material über längere Zeiträume im Außenbereich verwendet wird.

Bei zahlreichen Marmoren ist ein weiteres Schadensphänomen zu beobachten, das sich in einer flächenhaften Materialverformung äußert. In diesem Zusammenhang können Fassadenplatten aus Marmor bereits nach kurzer Anwendung im Außenbereich konvexe oder konkave Verbiegungen aufweisen, die sich maßgeblich auf die mechanischen Eigenschaften der Gesteine durchpausen und so die Haltbarkeit und Beständigkeit des Materials beeinträchtigen. Die durch Verbiegungen komplett zerstörten Außenfassaden beispielsweise der Finlandia Halle in Helsinki (Ritter 1992), des Amoco Gebäudes in Chicago (Logan et al. 1993), des Grand Arc de la Defense in Paris oder der Niedersächsischen Staats- und Universitätsbibliothek in Göttingen (Abb. 7.1, Koch 2005) sind häufig zitierte Beispiele, die das eindrucksvolle Phänomen dokumentieren. Die Durchbiegung von Marmor ist dabei ebenfalls auf das anisotrope thermische Dehnungsverhalten von Calcit zurückzuführen und wird durch die Interaktion von Feuchtigkeit, residualer Eigenspannung und vermutlich auch der Gebäudephysik unterstützt (vgl. Siegesmund et al. 2000). Ein ähnliches Biegeverhalten wird auch von einigen wenigen Graniten berichtet (Winkler 1994), wobei die Ursachen in diesem Fall nicht vollständig geklärt sind. Die Konsequenzen der Verformung von Fassadenelementen sind erheblich, da mit den Sicherheitsrisiken, die sich durch das Lösen einzelner Platten von der Gebäudewand ergeben, auch Kosten verbunden sind, wenn die gesamte Gebäudeverkleidung demontiert und erneuert werden muss.



Abb. 7.1: Mehrheitlich konvex verbogene Fassadenplatten aus Marmor an der Staats- und Universitätsbibliothek in Göttingen. Die Deformation von Fassadenelementen stellt ein wesentliches Schadensphänomen dar, dass einige Marmortypen bereits kurz nach ihrer Anwendung im Außenbereich aufzeigen können (aus Koch 2005).

7.1.1.4 Potentielle Verwitterungsschäden bei Sandsteinen

Die Verwendung von Sandsteinen als Naturwerkstein ist oftmals ambivalent zu beurteilen, da einige Varietäten hinsichtlich ihrer Eigenschaften die der Granite übertreffen, während andere dagegen als Baumaterial völlig untauglich sein können. Auch hier sind angesichts der zahlreichen Verwitterungsschäden ausführliche Abklärungen der gesteintechnischen Eigenschaften notwendig.

Obwohl quarzreiche und silikatisch gebundene Sandsteine im Allgemeinen eine hohe Festigkeit aufweisen und daher als sehr verwitterungsresistent gelten, kann es auch hier zu Verwitterungserscheinungen kommen, die die Qualität des Materials beeinträchtigen. Kieselige, aber porösere Varietäten tendieren z.B. bei ständig hohem Feuchtigkeitsgehalt zum Absanden infolge einer Auflösung der Kornbindung. Dieses Phänomen stellt ein häufiges Schadensbild an Sandsteinbauwerken dar (Grasegger 1997), das meist durch einen flächenhaften Verlust der Oberfläche hervorgerufen wird (Abb. 7.2). Der Verlust von Gesteinsmaterial als Folge von witterungsbedingten mechanischen Beanspruchungen des Gesteinsgefüges führt im Allgemeinen zu einer Verminderung der Zugfestigkeiten im Gestein (Abb. 7.2).

An Mauerwerken oder Fassadenplatten können durch Absanden Sedimentstrukturen herauspräpariert werden, was bei fortschreitendem Materialverlust unter Umständen auch die Standsicherheit eines Bauobjektes gefährden kann. Detaillierte Ergebnisse aus Untersuchungen an Sandsteinen lassen sich dahingehend interpretieren, dass es sich bei diesem Erscheinungsbild entweder um chemische Lösungsprozesse von bestimmten

Mineralen oder um mechanische Sprengungen infolge von Kristallisationsprozessen handelt, die zu Belastungen einzelner Kornbindungen führen (vgl. Grasegger 1997).

Sandsteine mit toniger Matrix zeigen ebenfalls individuelle Verwitterungsphänomene. Tonminerale erfahren unter dem Einfluss von Feuchtigkeit eine hygrische Dehnung, bei der es durch die Einlagerung von Wassermolekülen in die Kristallstrukturen zu einer Volumenzunahme der Minerale kommen kann. Für die bautechnische Eignung von Sandsteinen stellt das Phänomen ein wesentliches Qualitätskriterium dar, da sich als Konsequenz des hygrischen Dehnungsverhaltens Schalen an der Oberfläche des Sandsteins bilden, die sich durch oberflächenparallele Risse vom Gesteinsverband ablösen können (Abb. 7.3). Neben der hygrischen Dehnung wird auch die thermische Dehnung bei einigen Erklärungsmodellen als Hauptgrund für die Schalenbildung gewertet (vgl. Schuh 1987, Kießl 1989).



Abb. 7.2: Verwitterung von Sandstein durch Absanden. Schaden am Bauwerk (links, aus Fitzner & Heinrichs, 2004) und Verteilung der Zugfestigkeiten β_z im Gestein (rechts, aus Hörenbaum 2005).

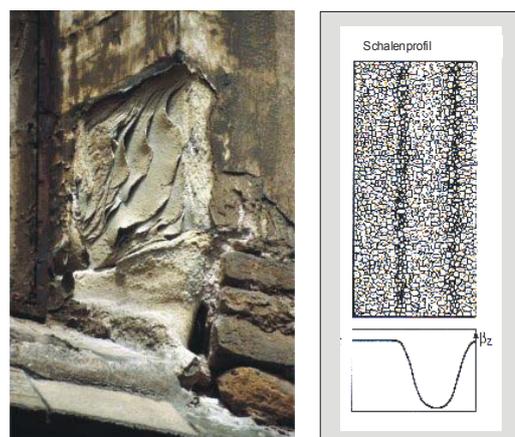


Abb. 7.3: Verwitterung von Sandstein durch Schalenbildung. Schaden am Bauwerk (links, aus Fitzner & Heinrichs, 2004) und Verteilung der Zugfestigkeiten β_z im Gestein (rechts, aus Hörenbaum 2005).

Tonführende Sandsteine können zudem bei sinkender Durchfeuchtung starke Salzausblühungen entwickeln (Snethlage 1984), die zu Verkrustungen auf den Oberflächen

von Sandsteinen führen können (vgl. Neumann 1994, Lefevre et al. 1997). Ist ein hoher Grad an Versalzung erreicht, kann ein ansteigender, hoher Feuchtigkeitspegel Aufschuppungen und Abschieferungen, fortschreitende Abplatzungen der Krusten (Abb. 7.4) und Auswitterungen entlang der Lagerfugen auslösen (Snethlage 1984). Die Prozesse resultieren vornehmlich aus Kristallisationszyklen und dem damit verbundenen Druckaufbau im Porenraum (Snethlage & Wendler 1997).



Abb. 7.4: Verwitterung von Sandstein durch Krustenbildung. Schaden am Bauwerk (links, aus Fitzner & Heinrichs, 2004) und Verteilung der Zugfestigkeiten β_z im Gestein (rechts, aus Hörenbaum 2005).

Bei carbonatisch gebundenen Sandsteinen kann aufgrund der chemischen Angreifbarkeit des Bindemittels besonders ausgeprägte Salzbildung an der Oberfläche stattfinden, die durch Lösung der Carbonatanteile und Wiederausfällung als Gips hervorgerufen wird (Snethlage 1984). Thermische und hygrische Effekte wölben die Krusten auf und führen in Verbindung mit Gefügauflockerungen im Gesteinsinneren zum Abfallen der Gesteinspartien. In denjenigen Fällen, in denen das Bindemittel abgeführt wird, tritt aufgrund der nur noch sehr reduzierten Kornkontakte ein Verlust der detritischen Einzelkörner auf, wodurch es zum Absanden der Minerale kommt. In Abhängigkeit des Verhältnisses zwischen Matrix und Detritus kann bei selektiver Lösung und Abfuhr des Carbonat-Zementes bis zu 30 Mal mehr Sandsteinmaterial im Vergleich zu massiven monomineralischen Kalksteinen zerstört werden (Reinsch 1991).

7.1.2 Qualitative Bewertung thailändischer Granite, Gneise und Hornblendit

7.1.2.1 Optische Eigenschaften

Innerhalb der Suite thailändischer Granite und Gneise neigen nur wenige Gesteine zu Schwankungen im Dekor. Zu den Vertretern mit wechselhaftem Dekor zählen vor allem die porphyrischen Einheiten SP-Grey oder MC-Yellow, bei denen jeweils durch das Auftreten der Feldspat-Porphyrroklasten lokale Veränderungen der makroskopischen Erscheinung

hervorgerufen werden. Aufgrund der Tatsache, dass beide Gesteine eine teilweise deutliche Foliation zeigen, können sich zusätzlich auch Heterogenitäten aus den unterschiedlichen Intensitäten bzw. Orientierungen der Textur ergeben.

Alle untersuchten Granitoide sind in unterschiedlichem Ausmaß durch mafische Minerale gekennzeichnet. Die Mafite im Mineralbestand können kritische Faktoren für die Gleichmäßigkeit des Dekors darstellen, wenn mit dem Auftreten dieser Minerale Änderungen der Gesteinsfarbe verbunden sind. Im vorliegenden Probensatz können Farbänderungen des Gesteins BT-Violet auf Ausblühungen von Biotiten zurückgeführt werden, die sich in gelben und braunen Verfärbungen äußern. Bei den mafischen Gesteinen BT-Black und PTC-Black, die durch hohe Gehalte an Hornblende gekennzeichnet sind, kann es zudem zu grünlichen Verfärbungen infolge einer Chloritisierung der Hornblenden kommen. Die Chloritisierung von Hornblenden wurde bei den Gesteinen mehrfach beobachtet. Dennoch muss in diesem Zusammenhang erwähnt werden, dass die Gesteine auch nach mehrjähriger Anwendung im Außenbereich vollkommen ohne Alterationen vorliegen können. Diese Aussage belegt beispielsweise die Fassadenverkleidung des J.W. Marriot Hotels in Bangkok, die mit Hornblendit ausgekleidet ist und bislang keinerlei Anzeichen von Chloritisierung zeigt.

Auch die roten Granate in dem Gneis HH-Grey müssen als ein wesentliches Qualitätskriterium im Mineralbestand gewertet werden. Einige wenige Anwendungsbeispiele aus dem Außenbereich demonstrieren, dass gerade das Gestein HH-Grey unter tropischen Bedingungen mit sehr deutlichen Rostflecken auf die Verwitterung von Biotitanlagerungen an Granaten reagiert. Ein weiteres Problem, mit dem dieses Gestein konfrontiert werden könnte, ist die unterschiedliche Mineralhärte der Granate in Bezug auf die übrigen Komponenten des Mineralbestandes. Werden einzeln auftretende, sehr resistente Komponenten wie Granate einer mechanischen Beanspruchung ausgesetzt, könnte es zu einem spröden Materialverhalten der Körner kommen, die schließlich aus dem Mineralverband herausfallen.

Nur wenige Granitoide des Probenmaterials zeigen Verwitterungserscheinungen an Feldspäten, die das Dekor beeinträchtigen. Besonders offenkundig ist die Feldspatverwitterung in dem Granit MC-Yellow, der allerdings seine gelbliche Grundfarbe aus der beginnenden Alteration der Mineralphase bezieht. Die Modifikation der Minerale gehört in diesem Fall also zum festen Dekorinventar. Aufgrund der intensiv ausgeprägten Foliation, die u. a. durch Feldspäte definiert ist, wäre jedoch eine Gefügauflockerung infolge der Alterationsprozesse auf den Foliationsflächen zu erwarten, mit denen auch eine starke Anisotropie der Festigkeiten einhergehen könnte.

7.1.2.2 Gesteinstechnische Eigenschaften

Das Spektrum einzelner Matrixdichten der Magmatite und Gneise bewegt sich zwischen 2.60 und 3.16 g/cm³ und leitet sich aus den Einzelwerten der Proben NB-Orange (Minimalwert) und PTC-Black (Maximalwert) ab. Der hohe Maximalwert für die Matrixdichte der Probe PTC-Black ergibt sich aus dem hohen Anteil mafischer Komponenten, der sich mehrheitlich aus dem relativ schweren Mineral Hornblende zusammensetzt. Gleiches gilt für den Monzodiorit BT-Black, dessen Dichte von 2.88 g/cm³

ebenfalls auf den relativ hohen Mafitgehalt zurückzuführen ist. Wie anzunehmen korreliert auch in weiteren Fällen die Matrixdichte mit der Mineralogie der jeweiligen Gesteine, da diese entsprechend ihrer Zusammensetzung aus mehrheitlich Quarz und Feldspat Werte um 2.65 oder 2.66 g/cm³ zeigen. Der sehr niedrige Wert von 2.60 g/cm³ für die nahezu ausschließlich aus Quarz und Feldspat aufgebaute Probe NB-Orange ergibt sich vermutlich aus einem erhöhten Anteil abgeschlossener Poren, die bei den Untersuchungen nicht erfasst werden konnten und somit die eigentliche Matrixdichte reduzieren.

Die überwiegende Mehrheit der granitoiden Proben ist mit 0.5 bis 1.0 Vol.-% durch ein sehr niedriges Porenvolumen gekennzeichnet. Eine Ausnahme bildet der Granit NB-Orange, der mit einer Porosität von 1.7 Vol.-% etwa doppelt bzw. dreifach soviel Hohlräume aufweist wie die übrigen Vertreter der Gruppe. Entsprechend hohe Porositäten können bereits in der Lagerstätte entstehen, wie etwa durch die Verwitterung oder während der Exhumierung des Gesteinskörpers in Verbindung mit Druckentlastung (Vollbrecht et al. 1991, Schild et al. 2001). Die makroskopisch erkennbaren Poren des Gesteins NB-Orange bewegen sich im Millimeter- bis Zentimeterbereich (Abb. 7.5a, b). Untersuchungen mehrerer Zentimeter großer Makroporen haben gezeigt, dass die Hohlräume teilweise vollständig, zumindest aber an den Porenwänden mit Calcit mineralisiert sind. Da Calcit nicht zu den Primärmineralen granitoider Gesteine zählt, muss bei diesem Gestein von sekundärem Mineralwachstum in den Porenräumen ausgegangen werden. Das ursprüngliche Gestein hat daher also einen erheblich höheren Anteil an Poren aufgewiesen (>1.7 Vol.-%), der anschließend durch die Ausfällung von Mineralen aus carbonatreichen Lösungen reduziert wurde (siehe dazu auch Kap. 7.3.2.5). Die Calcit-Mineralisationen im Porenraum sind entweder durch idiomorphe Einzelkristalle, als Kristallrasen oder durch xenomorphen Calcit gekennzeichnet (Abb. 7.5b). Da die xenomorphen Minerale der Porenfüllungen häufig eine angelöste Oberfläche zeigen, ist anzunehmen, dass ein Großteil des einst mineralisierten Porensystems vermutlich wieder durch Lösung und Abfuhr der Mineralphasen vergrößert worden ist. Je nach Ausmaß von Carbonatausfällungen und dem Einfluss der Verwitterung müssen also erhebliche Schwankungen in der Porosität des Gesteins angenommen werden.

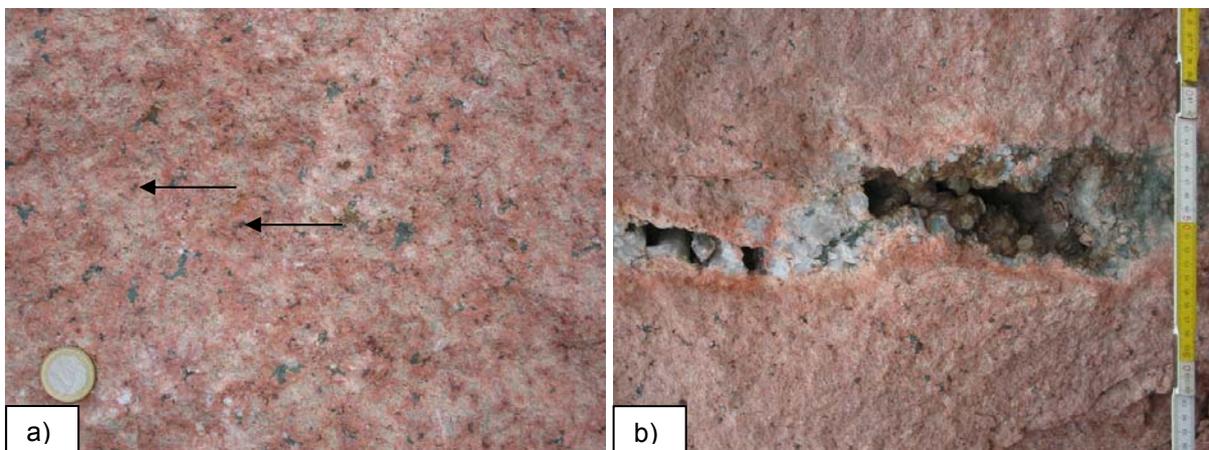


Abb. 7.5: Makroporen in dem Gestein NB-Orange. a) Poren mit einem Durchmesser von wenigen Millimetern. b) Poren mit einem Durchmesser von mehreren Zentimetern, die an der Porenraumoberfläche mit idiomorphen Calcit besetzt sind.

Die untersuchten Granitoide und Gneise weisen eine Porosität mit sehr niedrigen Porenradien auf. Die am häufigsten besetzte Porenradienklasse liegt dabei mehrheitlich im Mikroporenbereich ($<0.1 \mu\text{m}$). Obwohl sich die Lithologien in dieser Hinsicht durch recht einheitliche mittlere Porenradien auszeichnen, fallen bei der einzelnen Verteilung der Porenradienklassen Unterschiede auf. Der Granit NB-Orange zeigt beispielsweise in Bereichen jenseits der Zentimeter großen Makroporen einen nahezu kontinuierlichen Anstieg der Porenradiengrößen im Mikrobereich. Mit Ausnahme der Probe HH-Grey, die eine ähnliche Porengrößenverteilung aufweist wie der Granit NB-Orange, zeigen im Gegensatz dazu die übrigen Granitoide ein eher ausgeglichenes Verhältnis der Porenradienklassen, bei denen nur untergeordnet eine einzelne Porengröße dominiert (bspw. BT-Blue) (Abb. 7.6).

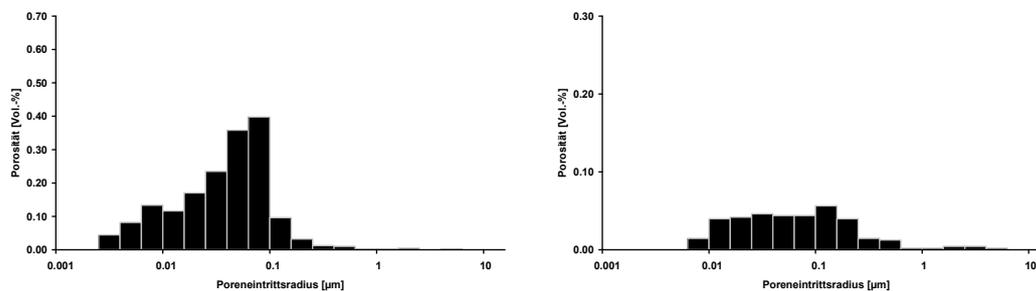


Abb. 7.6: Porenradienverteilung der Proben NB-Orange (links) und BT-Blue (rechts). Während die Probe NB-Orange einen kontinuierlichen Anstieg der Porenradien aufweist, zeigen die übrigen Proben wie BT-Blue eine relativ konstante Porengröße. Mehrheitlich befinden sich die Poren im Bereich $<0.1 \mu\text{m}$.

Der Porenradius lässt eine Aussage über den Wassertransport im Gesteinsinneren zu (Snethlage 1984, Klopfer 1985, Poschlod 1990), der im Allgemeinen durch Wasserdampfdiffusion (bei Porenradien $<0.1 \mu\text{m}$) oder Kapillarwirkung (bei Porenradien $>0.1 \mu\text{m}$) erfolgen kann. Da die Ergebnisse der mittleren Porenradienverteilung mehrheitlich unter $0.1 \mu\text{m}$ liegen, stellt die Wasserdampfdiffusion den wesentlichen Wassertransportmechanismus des granitoiden Probenmaterials dar. Lediglich die mafischen Vertreter BT-Black und PTC-Black zeigen höhere Werte für die mittleren Porenradien, so dass sich diese Gesteine demnach durch eine kapillare Wasseraufnahme auszeichnen sollten. Eventuell ist das Ergebnis der Probe BT-Black auf feine, unzureichend mineralisierte Epidot-Adern im Gestein zurückzuführen. Die Wasseraufnahme würde in diesem Fall also nur lokal über kapillare Saugkräfte gesteuert. Möglich wäre allerdings auch, dass die größeren Porenradien bei beiden Proben auf die höheren Gehalte an Hornblende zurückgeführt werden können. Das Mineral zeichnet sich durch eine ausgesprochen gute Spaltbarkeit aus, so dass hier eventuell eine Aufweitung der Spaltflächen erfolgte.

Trotz der relativ kleinen mittleren Porenradien ist bei den Granitoiden NB-Orange und HH-Grey aufgrund der hohen Porosität (vgl. Tab. 5.1, S. 76) eine hohe Wasseraufnahme zu erwarten. Für den Granit NB-Orange lässt sich aus den Widerstandszahlen der Wasserdampfdiffusion (vgl. Tab. 5.2, S. 77) erkennen, dass die Hohlräume keine bevorzugte Orientierung einnehmen. Im Gegensatz dazu ist die Wasseraufnahme des Gesteins HH-Grey

sehr wohl richtungsabhängig, da hierbei gut spaltbare, plattige und orientierte Schichtsilikate am Aufbau des Gesteins beteiligt sind. Diese Minerale bieten eine Vielzahl an Wegsamkeiten für Fluide entlang der Spalt- und Oberflächen. Exemplarisch zeigen die Widerstandszahlen für die Wasserdampfdiffusion der Probe HH-Grey (vgl. Tab. 5.2, S. 77), dass ein ausgeprägter metamorpher Lagenbau mit tafeligen oder plattigen Mineralen wie etwa Biotit und Feldspat den geringsten Wassertransport in der z-Richtung, also senkrecht zur Foliation zulässt. Da die Minerale der Probe parallel zur Foliation und parallel zur Lineation entsprechend kleinere Flächen aufweisen, ergeben sich in dieser Richtung günstigere Voraussetzungen für das Eindringen von Lösungen. Der Gneis zeigt dementsprechend parallel zur x-Richtung den geringsten Widerstandswert. Da die insgesamt niedrigen Widerstandszahlen in allen drei Raumrichtungen eine relativ schnelle Aufnahme von Fluiden signalisieren, kann das Gestein als äußerst hydrophil charakterisiert werden. Die recht geringen Unterschiede in der Richtungsabhängigkeit lassen sich vor dem Hintergrund der starken Texturierung lediglich durch offene Rissysteme senkrecht zur Foliation bzw. durch lokale Heterogenitäten in der Orientierung der Foliation erklären.

Die deutlich texturierte Probe PS-Grey zeigt ebenso wie die Probe HH-Grey eine hohe Tendenz zur Wasseraufnahme parallel zur x-Richtung (vgl. Tab. 5.2, S. 77). Aus den vergleichsweise niedrigeren Widerstandszahlen der Dampfdiffusion geht hervor, dass Fluide in diesem Gestein jedoch deutlich besser senkrecht zur Foliation, also parallel zur z-Richtung, in das Gesteinsinnere migrieren. Dies ist sehr wahrscheinlich auf die zweite Vorzugsrichtung der Glimmer zurückzuführen, die den Lagenbau (xy-Ebene) im Winkel von etwa 120° schneiden (vgl. Kap. 4). Der Einfluss dieser zusätzlichen Glimmerorientierung zeichnet sich darüber hinaus auch deutlich in der entsprechenden Lagerstätte ab, in der sich die Trennflächen im Gesteinsverband bevorzugt entlang dieser Lagen entwickeln.

Die untersuchten Lithologien zeichnen sich durch sehr unterschiedliche mechanische Eigenschaften aus (Abb. 7.7). Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass feinkörnige Gesteine wie BT-Black mit 13.8 MPa im Allgemeinen höhere Spaltzugfestigkeiten aufweisen als mittel- bis grobkörnige Gesteine wie BT-Violet, BT-Blue und MT-Orange mit Werten bis zu 8.9 MPa (Abb. 7.7).

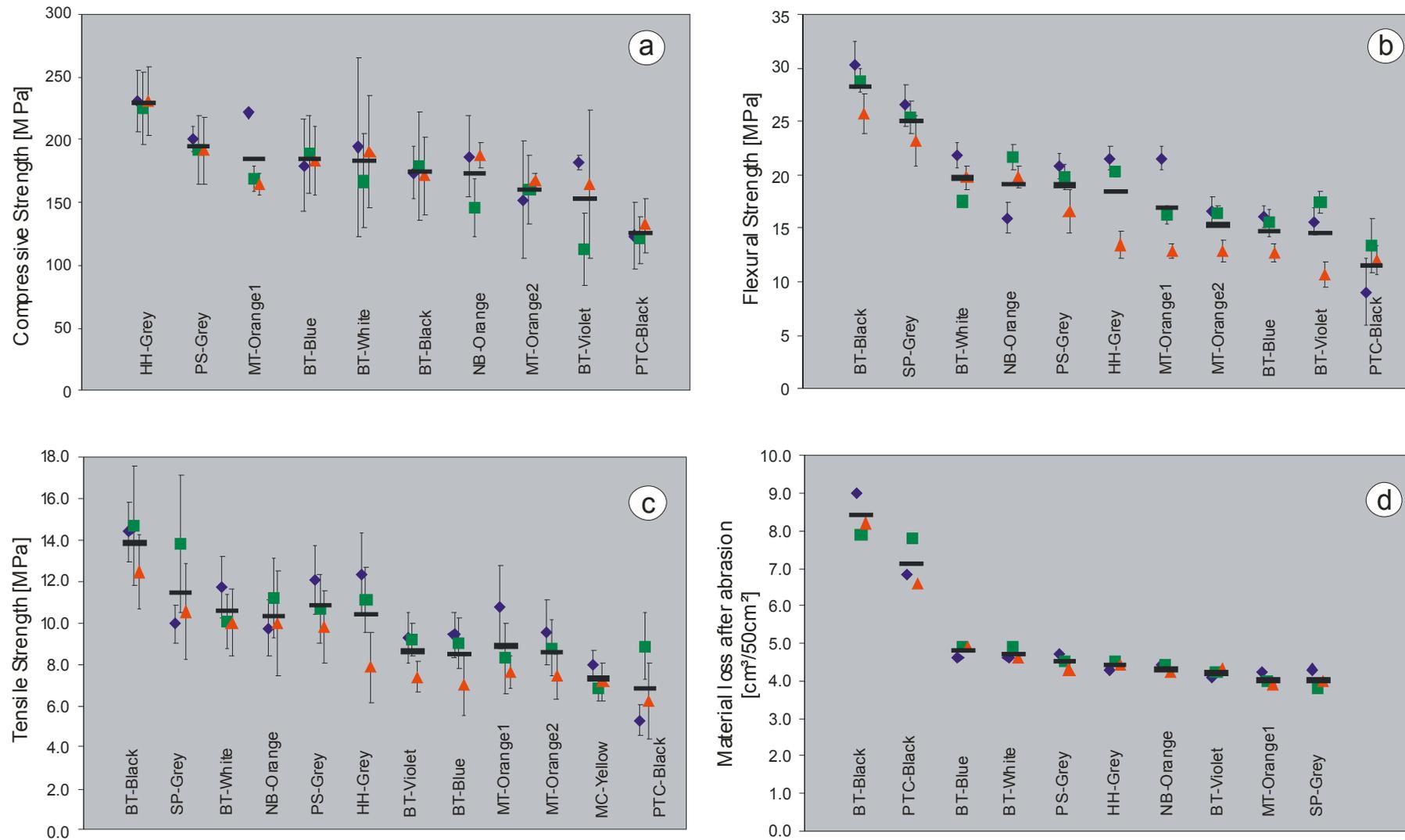


Abb. 7.7: Mechanische Eigenschaften der untersuchten Magmatite. a) Druckfestigkeiten. b) Biegezugfestigkeiten. c) Spaltzugfestigkeiten. d) Abriebfestigkeiten. Symbole: blaue Rauten = x-Richtung, grüne Quadrate = y-Richtung, rote Dreiecke = z-Richtung, schwarze Balken = Mittelwert

Die Ergebnisse der Biegezugfestigkeiten zeigen einen ähnlichen Trend, bei dem die mittel- bis grobkörnigen Varietäten durch relativ niedrige Werte im Bereich 14.6 bis 17.0 MPa charakterisiert sind, während feinkörnige Proben durchschnittlich höhere Festigkeiten zwischen 18.5 und 28.3 MPa anzeigen (Abb. 7.7). Ein weiteres Beispiel für die Abhängigkeit der Festigkeit von der Korngröße liefert der riesenkörnige Hornblendit PTC-Black, der mit Spaltzugfestigkeiten von 6.8 MPa und Biegezugfestigkeiten von 11.5 MPa die jeweiligen Werte der Granitoide und Gneise unterbietet (Abb. 7.7).

Bei Gesteinen mit gleicher Korngrengengeometrie (z.B. polygonal oder interlobat) steht der Einfluss der Korngröße in engem Zusammenhang mit der Ausbreitung von Rissystemen, die sich vornehmlich auf die Korngrenzen der Minerale konzentrieren und bei grobkörnigeren Gesteinen schon infolge relativ niedriger Belastungen aktiviert werden können (Prikryl 2001). Dass sich die Korngrenzen bei niedriger Belastung schon früh öffnen, geht auf die entsprechende Anzahl an Korn-zu-Korn-Kontakten zurück, die bei grobkörnigen Gesteinen im Vergleich zu feinkörnigen Gesteinen wesentlich niedriger ist. Für die Fortpflanzung der Risse müssen bei grobkörnigen Gesteinen also eine geringere Anzahl an Korngrenzen aufgebrochen werden (Abb. 7.8a, b), so dass sich hier entsprechend niedrigere Festigkeiten ergeben. Die Abhängigkeit der Festigkeiten von der Korngröße lässt sich mehrheitlich auch auf die Druckfestigkeiten übertragen. Ausnahmen bilden hierbei die relativ druckfesten Gesteine MT-Orange1 und BT-Blue, die makroskopisch als auch mikroskopisch mit den jeweiligen Varietäten MT-Orange2 und BT-Violet vergleichbar sind und daher ähnliche Festigkeiten im unteren Datenbereich aufweisen sollten.

Die insgesamt niedrigen Festigkeiten der Lithologien MT-Orange1 und MT-Orange2 sind zunächst überraschend, da sich beide Gesteine durch einen hohen Gehalt an Quarz auszeichnen, der als stabile Phase im Kornverband von Gesteinen bewertet werden kann. Darüber hinaus kennzeichnet die Varietäten ein sehr geringer Glimmeranteil, so dass Minerale mit ausgeprägten Spaltflächen nur untergeordnet vorhanden sind. Im vorliegenden Fall geht der Grund für die niedrigen Festigkeiten neben der Korngröße auf die Korngrenzengeometrie zurück. Im Allgemeinen gilt, dass glatte Korngrenzen eine geringere Kohäsion aufweisen als verzahnte Korngrenzen. Beide Gesteine MT-Orange1 und MT-Orange2 zeichnen sich durch überwiegend polygonale Korngrenzen aus, die einen wesentlich geringeren Zusammenhalt der Mineralphasen bewirken als etwa interlobat entwickelte Strukturen. Bei interlobaten, verzahnten Kontakten ermöglicht die Interaktion von Kristallflächen einen festeren Kornzusammenhalt, der eine erheblich größere Stabilität gegenüber destruktiv einwirkenden Kräften bewirkt (Abb. 7.8c, d).

Einen negativen Einfluss auf die technischen Eigenschaften sollte darüber hinaus auch die tektonische Überprägung der Gesteine besitzen. Die mikrostrukturellen Untersuchungen haben gezeigt, dass die Proben MT-Orange1 und MT-Orange2 einer spröden Deformation unterlagen, die zur Ausbildung von Knickfalten in Feldspäten und zu inter-, intra- und transgranularen Mikrorissen in Quarz geführt haben. Da das Rissystem der beiden Granite größtenteils offen ist, bieten sich hierdurch ideale Voraussetzungen für die Ausbreitung der Schwachstellen. Untersuchungen des Probenmaterials an der Elektronenstrahl-Mikrosonde zeigen, dass einige der Risse mit sekundärem Calcit verheilt sein können, der aber wegen seiner relativ geringen Härte und der stellenweise porösen Ausbildung keine zuverlässige

Kohäsion des Mineralbestands garantieren kann. Obwohl die mineralogische Zusammensetzung der orangen Granite also einen erheblichen Teil einer resistenten Mineralphase aufweist, wird keine Festigkeit von dieser Komponente ausgehen können. Lediglich die Abriebfestigkeiten werden durch den Quarzgehalt und dessen hohe Mineralhärte positiv beeinflusst. Der Granit MT-Orange1 zeigt aus diesem Grund sehr niedrige Materialverluste infolge abrasiv einwirkender Kräfte (Abb. 7.7).

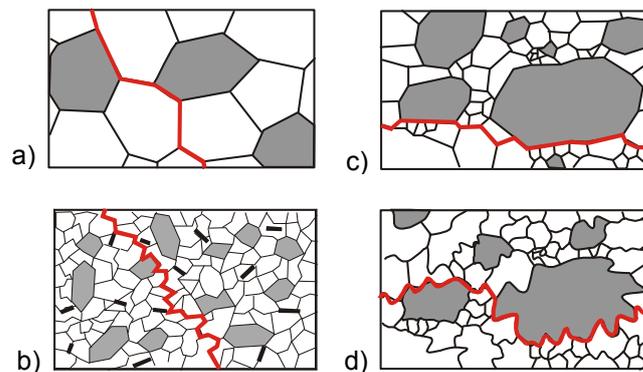


Abb. 7.8: Ausbreitung von Rissystemen in Gesteinen. a) und b) Rissbildung in Abhängigkeit der Korngröße. Bei grobkörnigen Gesteinen (a) müssen für die Fortpflanzung der Risse deutlich weniger Korngrenzen aufgebrochen werden als bei feinkörnigen Gesteinen (b). c) und d) Rissbildung in Abhängigkeit der Korngrenzengeometrie. Polygonale Korngrenzen (c) lassen sich aufgrund der geraden, glatten Kontakte im Allgemeinen leichter öffnen als interlobate Korngrenzen (d).

Von großer Bedeutung für das mechanische Verhalten der Granite MT-Orange1 und MT-Orange2 ist vermutlich auch der Alterationsgrad der Feldspäte. Grundsätzlich zeigen beide Lithologien Veränderungen dieser Mineralphase in Form von rauen oder vertieften Oberflächen sowie einem Überzug der Mineraloberfläche mit Hämatit. Dabei ist zu beobachten, dass die Alterationserscheinungen in der Probe MT-Orange2 deutlich intensiver ausgebildet sind als in der Probe MT-Orange1. Zusätzlich kann auch eine beginnende Zersetzung der Feldspäte in der Probe MT-Orange2 nachgewiesen werden, die in der Probe MT-Orange1 noch ausbleibt. Diese Umstände erklären eventuell, dass die Probe MT-Orange2 hinsichtlich der Zug- und Druckfestigkeiten jeweils niedrigere Werte aufweist (Abb. 7.7).

Bei einem Vergleich der Richtungsabhängigkeiten der beiden Granite fällt auf, dass sich die Probe MT-Orange1 durch wesentlich höhere Anisotropien hinsichtlich der Spaltzug-, Biegezug- und Druckfestigkeiten auszeichnet. Die Richtung mit der jeweils größten Festigkeit stellt in allen Untersuchungen die x-Richtung dar (Abb. 7.7). Dies ist im Allgemeinen lediglich bei stark texturierten Gesteinen der Fall, zu denen die Varietät jedoch nicht gezählt werden kann. Vermutlich ist der hohe Anisotropiegrad auf die häufige Ausbildung von Störungen in der Lagerstätte zurückzuführen, die das Gestein sehr regelmäßig mit ENE-WSW-streichender Orientierung durchziehen. Eine vergleichbare Kontinuität konnte in der Lagerstätte des Gesteins MT-Orange2 nicht beobachtet werden, so dass hier eventuell unterschiedliche Störungsrichtungen die geringere Anisotropie der Festigkeiten bewirken.

An dieser Stelle sollen kurz einige Referenzdaten zur näheren Charakterisierung der Varietäten MT-Orange1 und MT-Orange2 herangezogen werden. Die Eigenschaften der

Gesteine korrelieren weitestgehend mit Untersuchungen von Kyi (1991), die sich auf die physikalische und technische Charakterisierung eines orangen Granits im Tak Batholithen konzentrieren (Lagerstätte Khlong Sak, Distrikt Muang, Provinz Tak). Das Gestein stimmt der makroskopischen und mikroskopischen Beschreibung nach mit den hier untersuchten orangen Varietäten überein und wird etwa 2-3 km SSW der Lagerstätte MT-Orange2 als Naturwerkstein abgebaut. Im Einzelnen ergeben sich nur geringfügige Unterschiede in den gesteinsphysikalischen Eigenschaften. Alle Angaben stimmen im Übrigen auch mit einer Studie von Dakhal (1996) zur Eignung des Granits als Brechprodukt für den Verkehrswegebau überein. Mit Werten von etwa 160 MPa liegen die Druckfestigkeiten des Granits über den Ergebnissen des in der Nachbarschaft abgebauten MT-Orange2, korrelieren dabei jedoch mit den Angaben für die etwa 10 km weiter nördlich abgebaute Varietät MT-Orange1. Die Gemeinsamkeiten hinsichtlich der gesteintechnischen Eigenschaften ergeben sich nicht zuletzt dadurch, dass auch Kyi (1991) ein intensives Rissystem in den Quarzkörnern seines Probenmaterials dokumentiert und daher von ähnlich spröden Deformationsmustern des Probenmaterials ausgegangen werden muss. Die Daten von Kyi (1991) sind zusammen mit Referenzdaten für den Monzodiorit BT-Black in Tabelle 7.2 dargestellt. Studien von Lwin (1991) zeigen in diesem Zusammenhang, dass der Monzodiorit BT-Black noch weitaus höhere Werte erreichen kann, als im Rahmen der vorliegenden Arbeit ermittelt wurde. Lwin (1991) hatte einen Diorit der Provinz Tak hinsichtlich seiner bautechnischen Eigenschaften untersucht und Druckfestigkeiten über 200 MPa bzw. Spaltzugfestigkeiten von annähernd 18 MPa für das Gestein bestimmen können.

Tab. 7.2: Referenzdaten für ausgewählte gesteintechnische Eigenschaften für Granitoide der Provinz Tak (nach Kyi 1991, Lwin 1991).

	Dichte [g/cm ³]	Porosität [%]	Druckfestigkeit [MPa]	Spaltzugfestigkeit [MPa]
Granit	2.58	1.19	160.5	9.42
Granit	2.58	1.01	n/a	n/a
Diorit	2.68	0.74	n/a	n/a
Diorit	2.68	0.62	206.9	17.8

Die beiden Proben BT-Violet und BT-Blue zeigen ähnliche Festigkeiten wie die Proben MT-Orange1 und MT-Orange2, sind dabei jedoch durch weniger und zudem besser verheilte Risse gekennzeichnet. Die mineralogische Zusammensetzung der Gesteine zeigt allerdings auch wesentlich geringe Anteile an Quarz, so dass bei beiden Gesteinen von vorn herein die mechanisch stabilen Anteile in der Mineralkomposition fehlen. Die geringeren Quarzgehalte machen sich darüber hinaus auch in den Abriebfestigkeiten der Probe BT-Blue bemerkbar. Die Materialverluste infolge von Abrasivkräften sind im Vergleich zu den quarzreicheren Graniten wesentlich höher (Abb. 7.7).

Im Gegensatz zu den mechanisch schwachen Graniten MT-Orange1 und MT-Orange2 zeichnen sich die beiden Gneise PS-Grey und HH-Grey durch ausgesprochen günstige Festigkeiten aus. Bei beiden Gesteinen müssen sehr hohe Kompressions- und Zugkräfte aufgebracht werden, um die Kohäsion der Mineralkörner aufzubrechen. Die Festigkeiten für

den Gneis PS-Grey lassen sich dabei aus einer starken Rekristallisation der Quarze ableiten. Rekristallisierte Quarze umfließen hier oftmals größere Feldspat-Kristalle, was zu einer vollständigen Ummantelung der Feldspäte und damit zu einem Schutz der mechanisch schwächeren Mineralphase führen kann (vgl. Kap. 4.3). Einen ähnlichen Einfluss auf die Festigkeiten scheinen die kleineren Quarzkristalle der Probe HH-Grey zu haben, die dicht miteinander verwachsen sind und konzentriert entlang von Kornkontakten zu anderen Mineralen wie beispielsweise Biotit auftreten. Die Einbettung von Glimmern in diese Quarznester bewirkt dabei einen geringen Vernetzungsgrad der Schichtsilikate, so dass kein penetrativer Lagenbau ausgebildet werden kann, der die Festigkeiten des Gesteins herabsetzen könnte. Aus der Isolierung einzelner Glimmerpartien in dem Gestein HH-Grey ergibt sich wohl auch die geringe Anisotropie der Druckfestigkeiten (vgl. Abb. 7.7a), die aufgrund der deutlichen makroskopischen Texturierung wesentlich höher ausfallen könnte.

Aufgrund des extrem interlobaten, granophyrischen Korngefüges sollte der Zusammenhalt der Mineralkörner bei der Probe NB-Orange am stärksten ausgebildet sein. Darüber hinaus ist das Gestein durch kaum nachweisbare Mengen an Biotit gekennzeichnet, was zusätzlich vorteilhafte Voraussetzungen für die mechanische Stabilität des Gesteins mit sich bringt. Mit Ausnahme der Biegezugfestigkeiten zeigt der Granit jedoch vergleichsweise durchschnittliche Festigkeiten an (Abb. 7.7). Der Grund hierfür liegt allem Anschein nach in der Porosität des Gesteins, die sich bis hin zu den mechanischen Eigenschaften auswirkt und die äußerst günstigen Grundvoraussetzungen für maximale Festigkeiten relativiert.

Die Maximalwerte des thermischen Ausdehnungskoeffizienten bewegen sich innerhalb eines Spektrums von $\Delta\alpha_{20-90} = 7.26 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ und $\Delta\alpha_{20-90} = 9.32 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (vgl. Tab. 5.8, S. 101). Die Gesteine decken damit einen relativ eng gefassten Bereich ab, der lediglich geringe Differenzen in der thermisch induzierten Volumenausdehnung des Probematerials anzeigt. Die Ausdehnungskoeffizienten der Gesteine werden von den thermischen Dehnungseigenschaften des Mineralbestands definiert, der sich im Fall granitoider Gesteine vornehmlich aus Quarz, Feldspat und Glimmer zusammensetzt. Von diesen drei Indexmineralen besitzt Quarz den höchsten Ausdehnungskoeffizienten, der parallel zur a-Achse Werte von $\alpha = 14.3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ erreicht (Dreyer 1974).

Innerhalb des Probenmaterials ist daher zu erkennen, dass quarzreiche Lithologien wie etwa MT-Orange2, NB-Orange und PS-Grey die höchsten Ausdehnungskoeffizienten aufweisen und somit am sensibelsten auf den Einfluss zunehmender Temperatur reagieren (vgl. Tab. 5.8, S. 101). Die Beobachtung, dass quarzreiche Gesteine vergleichsweise hohe Dehnungsbeträge aufweisen, bestätigt sich durch einen Vergleich der Ausdehnungskoeffizienten mit dem des relativ quarzarmen Granits BT-White oder dem des Monzonits BT-Blue. Für beide liegen entsprechend geringere Werte vor.

Vor diesem Hintergrund sollte die Probe NB-Orange mit dem höchsten Quarzgehalt von 35.4 Vol.-% deutlich höhere Ausdehnungskoeffizienten besitzen als alle übrigen Proben, was sich anhand der Untersuchungen jedoch nicht bestätigen lässt. Die relativ geringe Längenänderung der Probe ergibt sich vermutlich aus einer Risspufferung, bei der sich die Minerale während der thermischen Beanspruchung in den Porenraum hineindehnen. Die

thermische Ausdehnung des Gesteins wird dadurch größtenteils kompensiert (Abb. 7.9, vgl. Strohmeyer 2003). Die Vermutung, dass eine Risspufferung die relativ niedrige Ausdehnung des NB-Orange bewirkt, wird durch die hohe Porosität des Materials gestützt. Das Vorhandensein von potentiellen Pufferzonen wird mit 1.7 Vol.-% Porosität deutlich belegt. Gleiches gilt für den relativ quarzreichen, aber sehr porösen Gneis HH-Grey, den der niedrigste Ausdehnungskoeffizient für granitoide Gesteine kennzeichnet.

In Bezug auf die thermische Dilatation definiert die Probe MT-Orangel mit Anisotropieanteilen von 10.2 % die obere Grenze der Richtungsabhängigkeit für das granitoide Probenmaterial. Für die drei Raumrichtungen der Granite NB-Orange, PS-Grey und BT-Violet sind fast gar keine Unterschiede im thermischen Dehnungsverhalten zu erkennen, was an den niedrigen Anisotropiewerten von $\leq 2\%$ zu erkennen ist. Die Anisotropien der Gesteine fallen damit sowohl für Varietäten mit geringer als auch für Varietäten mit stärkerer Gefügeanisotropie sehr niedrig aus. Als Ursache für die geringe Richtungsabhängigkeit stark texturierter Proben kann die Einkristallanisotropie der Glimmer angeführt werden, die wohl zu schwach ist, um sich auf das Gesamtgestein auszuwirken (vgl. Strohmeyer 2003).

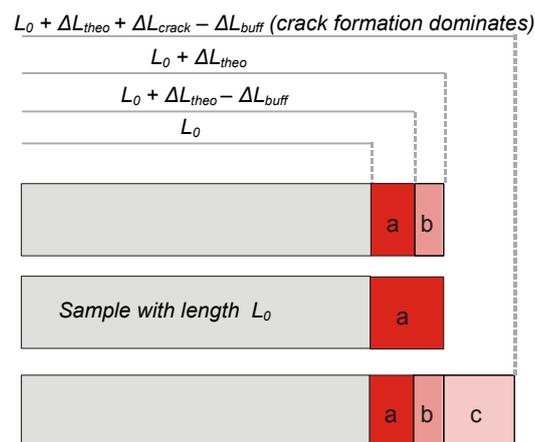


Abb. 7.9: Schematische Darstellung der thermischen Dehnung von Gesteinen (aus Strohmeyer 2003). ΔL_{theo} (a) – theoretische Längenänderung des Gesteins aufgrund der mineralogischen Zusammensetzung und den daraus hervorgehenden mittleren Ausdehnungskoeffizienten der Einzelminerale, ΔL_{buff} (b) – Längenänderung (negativ) durch Risspufferung. ΔL_{crack} (c) – Längenänderung der Probe aufgrund thermisch induzierter Rissbildung.

7.1.2.3 Möglichkeiten und Grenzen für die Anwendung der Gesteine

Aus den lithologischen Merkmalen und petrophysikalischen Eigenschaften der Gesteine ergeben sich differenzierte Verwendungsmöglichkeiten und Bearbeitungsaspekte, die im Folgenden anhand ausgewählter Proben näher erörtert werden. Einige Verwendungsmöglichkeiten sind beispielhaft in Tabelle 7.3 angeführt.

Deutliche Einschränkungen für die Anwendung ergeben sich bei dem Gestein NB-Orange. Der große Anteil an Hohlräumen und damit verbunden die hohe Bereitschaft zur Wasseraufnahme schließt beispielsweise nahezu vollständig die Verwendung des Gesteins im Außenbereich aus, da über die Wasseraufnahme ein relativ hoher Eintrag von Schadstoffen in das Porensystem der Varietät erfolgen kann. Dieser Eintrag könnte als Konsequenz den Mineralbestand des Gesteins, hier besonders die calcitischen Porenraumfüllungen, chemisch angreifen.

Carbonatanteile könnten aus dem Porensystem nicht nur gelöst und abgeführt, sondern auch an anderen Stellen wieder ausgefällt werden, so dass die Prozesse schließlich die Kristallisation von Salzen und die Verkrustungen auf der Oberfläche des Porenraums begünstigen würden. Zahlreiche Autoren (z.B. Fitzner & Sneath 1982) gehen davon aus, dass auch die Porengröße eines Gesteins einen wesentlichen Einfluss auf die Schädigung besitzt. Nach dem Kapillardruck-Modell (vgl. Wellmann & Wilson 1965) sollte das initiale Kristallwachstum aus Salzlösungen in großen Poren beginnen, wobei die vorhandenen Lösungen in den kleineren Poren das Kristallwachstum in den großen Poren unterstützen. Nähert sich das chemische Potential der großen Poren nach anhaltender Salzkristallisation dem der kleinen Poren bis zu einem Gleichgewichtszustand an, setzt schließlich auch eine Salzkristallisation in den Mikroporen ein (siehe dazu auch Ruedrich et al. 2005). Dies impliziert, dass Gesteine wie etwa NB-Orange besonders anfällig für die Kristallisation von Salzen sind, da hier eine hohe Gesamtporosität vorgegeben ist, die sich aus einem großen Volumen von Makro- und Mikroporen zusammensetzt.

Bei einem Temperaturabfall unter den Gefrierpunkt könnte es bei diesem Gestein auch zu physikalischen Verwitterungsprozessen in Verbindung mit Eiskristallisation und Frostsprengung kommen. Auf mögliche Schädigungen deutet in diesem Zusammenhang der hohe Sättigungsgrad der Porenräume, die bei vollständiger Wassersättigung zu 98 % gefüllt sind. Da die Volumenexpansion beim Phasenübergang von Wasser zu Eis ca. 9 Vol.-% beträgt, würde das Gestein direkte Frostschäden erfahren, wenn das Wasser nicht aus den Poren herausgedrückt wird (vgl. Hirschwald 1908). Eine Verwendung des Gesteins im Freien, also unter dem Einfluss von Feuchtigkeit und Nässe, wäre aus diesem Grunde ebenso wenig zu empfehlen, wie die Anwendung im Küchenbereich. Hier könnte sich nämlich der Gebrauch von säurehaltigen Reinigern und Kochzutaten in Verbindung mit der schnellen Löslichkeit von Calcit negativ auf die Porenfüllungen auswirken.

Die Diskussion der mechanischen Eigenschaften hat gezeigt, dass die Festigkeiten feinkörniger, quarzreicher Granitoide bei entsprechend geringer tektonischen Überprägung und geringem Alterationsgrad den bautechnischen Anforderungen in hohem Maße entgegenkommen. Gesteine mit hohem Quarzgehalt kennzeichnet im Allgemeinen eine hohe Abriebfestigkeit, so dass Varietäten wie etwa MT-Orange1 oder SP-Blue eventuell als Bodenbelag zur Anwendung kommen könnten. Als ungeeignet auf diesem Anwendungsfeld qualifiziert sich u. a. der Hornblendit PTC-Black, dessen mafische Komponenten wie bei dem Monzodiorit BT-Black nach längerer Beanspruchung in hohem Maße von der Bodenoberfläche abgelöst werden.

Mehrere feinkörnige und/ oder quarzreiche Gesteine des Probensatzes würden sich unter Umständen aufgrund ihrer Festigkeiten für die Verwendung als statisch anspruchsvolles

Bauelement eignen. Die drei Gesteine BT-White, BT-Black oder SP-Grey kennzeichnet eine hohe Biegezugfestigkeit, so dass hier beispielsweise der Einsatz als Fassadenverkleidung im Innen- und Außenbereich möglich wäre (Tab. 7.3). Für quarzarme und grobkörnige Varietäten, wie etwa den Hornblendit PTC-Black, wäre dieser Bereich auszuschließen, was die geringe Biegezugfestigkeit des Gesteins deutlich unterstreicht. Einschränkungen ergeben sich bei dem Gestein PTC-Black zudem durch den intensiven Wechsel der Korngröße von Millimeter bis zu mehreren Dezimetern, wodurch sich über kurze Distanzen zwangsläufig extreme Heterogenitäten in den Zugfestigkeiten entwickeln können. Eine Prognose zur Stabilität des Gesteins würde dieser Umstand praktisch ausschließen. Da die thailändische Werksteinindustrie gewöhnlich Platten mit einer Stärke von 2-3 cm produziert und diese damit deutlich unter der Korngröße des Hornblendits liegen kann, wäre es möglich, dass sich Kristallgrenzen vieler Minerale des PTC-Black über die gesamte Mächtigkeit einer Fassadenplatte erstrecken. Dadurch beinhalten die Produkte wiederum eine hohe Anzahl mechanischer Schwachstellen, die sowohl instabile Bedingungen während der Produktion als auch Sicherheitsrisiken für das jeweilige Bauteil hervorrufen.

Tab. 7.3: Verwendungsmöglichkeiten und Bearbeitung ausgewählter Granite, Gneise und des Hornblendits (+++ vorläufig bis bedingt geeignet, ++ bedingt bis wenig geeignet, + wenig bis nicht geeignet).

		NB-Orange	BT-Black	MT-Orange	MC-Yellow	HH-Grey	PTC-Black
Boden	Innen	++	++	+++	+	+++	+
	Außen	+	+	+++	+	+	+
Treppen	Innen	++	+++	+++	+	++	+
	Außen	++	+	+++	+	+	+
Fassade	Innen	+++	+++	++	++	+++	+++
	Außen	++	+++	++	+	+	++
Küche		+	+++	++	+	++	++
Bearbeitung		+	++	+	++	+	+++

7.1.3 Qualitative Bewertung thailändischer Carbonatgesteine

7.1.3.1 Optische Eigenschaften

Die petrographischen Analysen der Carbonatgesteine haben gezeigt, dass sich die Lithologien mehrheitlich durch Calcit als Hauptmineralphase auszeichnen. Neben Calcit

beteiligt sich nur eine geringe Anzahl anderer Minerale am Aufbau der Gesteine (insbes. Dolomit und Quarz), so dass bei den Kalksteinen und Marmoren ein deutlich homogener Mineralbestand vorliegt als bei den Granitoiden. Da Calcit, Dolomit und Quarz in der Regel als sehr stabil hinsichtlich der Farbkontinuität gewertet werden können, sollte der Hauptmineralbestand auch unter dem Einfluss der Verwitterung keine wesentlichen Veränderungen in der makroskopischen Erscheinung aufweisen.

Dennoch treten bei der Mehrheit der Proben auch kritische Nebengemengteile auf, welche die Stabilität des Dekors beeinflussen und zu Einschränkungen bei der Verwendung im Außenbereich führen können. Dies gilt insbesondere für die Marmore PC-White und PC-Red, die stark schwankende Anteile an Tonmineralen in der Zusammensetzung anzeigen. Hier kann es unter Umständen zu einer Anlösung der Tonminerale und damit verbunden zu einer Freisetzung von inkorporiertem Eisen kommen, was sich bei anschließender Fällung in rostigen Verfärbungen auf der Oberfläche der Gesteine äußern könnte. Geschehen solche Lösungen und Ausfällungen am Kontakt zwischen Marmorklasten und der Tonmatrix, können auch die weißen Partien der Marmore eine Beeinträchtigung der Farbe erfahren.

In der Probe PK-Grey sind Beimengungen von Pyrit ein limitierender Verwendungsfaktor, da an dem Mineral durch den Kontakt mit Wasser unästhetische Oxidationserscheinungen auftreten können. Eine Verwendung des Gesteins im Außenbereich wäre unter optischen Gesichtspunkten daher wenig ratsam. Auch der Marmor BTD-White ist aufgrund seiner hellen Farbe sehr empfindlich gegenüber einer Farbveränderung, die hier u. a. durch die Bildung von Limonit möglich wäre.

7.1.3.2 Gesteinstechnische Eigenschaften

Die Matrixdichten der untersuchten Marmore und Kalksteine liegen zwischen 2.69 und 2.72 g/cm³ (vgl. Tab. 5.1, S. 76), so dass die Dichte der Gesteine mit der Dichte des Minerals Calcit gleichzusetzen ist. Da Calcit die Mineralogie der Carbonatgesteine dominiert, zeigen alle Lithologien nahezu einheitliche Werte für die Matrixdichte. Die recht geringen Unterschiede zwischen der Matrix- und der Rohdichte demonstrieren, dass die Gesteine mehrheitlich sehr niedrige Porositäten aufweisen, die mit 0.15 Vol.-% für das Gestein PC-Grey am geringsten ausfallen. Ursächlich für das niedrige Hohlraumvolumen ist hier wohl eine Kombination aus der mikritischen Korngröße der Grundmasse und der leichten metamorphen Überprägung, in deren Rahmen durch Rekristallisation der Calcitphase ein Teil des ursprünglichen Porenraums reduziert werden konnte.

Die beiden Marmore TS-Pink und TS-Grey weisen mit Werten von 0.9 bzw. 1.2 Vol.-% die höchsten Porositäten auf (vgl. Tab. 5.1, S. 76), was vermutlich aus Lösungsvorgängen resultiert, die an den Korngrenzen oder entlang von Stylolithen einsetzen. Bei beiden Lithologien wäre es zudem möglich, dass ein Teil des Porenvolumens auf die Extensionstektonik im regionalen Umfeld des Abbaugbietes zurückzuführen ist (siehe dazu auch Kap. 7.3.3.2). Durch eine Zerrung kam es bei dem untersuchten Material wahrscheinlich über einen längeren Zeitraum zu einer Zugbeanspruchung der Korngrenzen, die sich daraufhin wesentlich zahlreicher öffnen konnten als bei vergleichbaren Lithologien ohne

spröde Überprägung. Im Fall der kataklastisch beeinflussten Marmore PC-White und PC-Red ist ein erheblicher Teil der geöffneten Hohlräume mit Tonmineralen verfüllt, so dass für die Gesteine vergleichsweise geringe Porositäten vorliegen.

Die beiden Kalksteine MP-Yellow und KH-Red sind durch Porositäten von 0.5 und 0.3 Vol.-% gekennzeichnet (vgl. Tab. 5.1, S. 76) und zeigen damit ein Porenvolumen an, das vergleichbar mit der Mehrheit ihrer metamorphen Äquivalente ist. Wie bei den Marmoren TS-Pink und TS-Grey scheinen Zugkräfte auf den Kalkstein KH-Red eingewirkt zu haben, was anhand der Wachstumsrichtung der Calcitkristalle in den Rissen der Gesteine dokumentiert ist (vgl. Abb. 4.22). Dass dieser Mechanismus dabei keinen so großen Einfluss auf das Hohlraumvolumen der Lithologie nimmt wie bei den Marmoren TS-Pink und TS-Grey, liegt vermutlich an der wesentlich geringeren Korngröße der Grundmasse. Diese scheint dabei zwar vereinzelte Risse, aber keine systematische Öffnung der Korngrenzen zuzulassen.

Im Folgenden sollen die mechanischen Eigenschaften der Carbonatgesteine diskutiert werden. In Bezug auf die Druckfestigkeiten weisen die Varietäten PK-Grey und PK-Pink, sowie die Varietäten TS-Grey und TS-Pink die höchsten Werte bis durchschnittlich 123 MPa auf (Abb. 7.10). Die Mittelwerte der einzelnen Richtungen liegen teilweise noch deutlich höher und sind in wenigen Fällen sogar mit den Werten einzelner Granitoide vergleichbar. Andere Marmore dagegen, insbesondere die Varietäten PC-White und PC-Red, sind durch deutlich niedrigere Druckfestigkeiten gekennzeichnet, die lediglich drei Viertel der maximal aufgenommenen Mittelwerte erreichen. Ein ähnliches Verteilungsmuster lässt sich auch für die Spaltzugfestigkeiten und mit wenigen Einschränkungen auch für die Biegezugfestigkeiten feststellen.

Die beiden Kalksteine MP-Yellow und KH-Red sind wie die Gruppe der Marmore durch äußerst unterschiedliche Festigkeiten gekennzeichnet (Abb. 7.10). Die Probe MP-Yellow zeigt mit Spaltzugfestigkeiten von 5.8 MPa ähnlich niedrige Werte wie die Marmore PC-Red und PC-White, wohingegen die Probe KH-Red mit 8.5 MPa eher den sehr festen, feinkörnigen Marmoren gleicht. Die differenzierte Festigkeit der beiden Kalksteine geht im Wesentlichen auf Calcit-Adern zurück, die in der mechanisch schwächeren Probe MP-Yellow deutlich häufiger auftreten als in der mechanisch stabileren Probe KH-Red. Darüber hinaus ist die Ausbildung der Calcit-Adern in der Probe MP-Yellow sehr viel filigraner und netzartig strukturiert, so dass die Grundmasse des Gesteins durch die Rissysteme vollständig zergliedert wird. Zusätzlich sind die Calcit-Adern oft an einer Seite von Stylolithen begrenzt. Da diese Stylolithen lokal einen hohen Gehalt an Poren aufweisen (vgl. Kap. 4), können die Elemente ebenfalls für die relativ geringen Zugfestigkeiten verantwortlich gemacht werden.

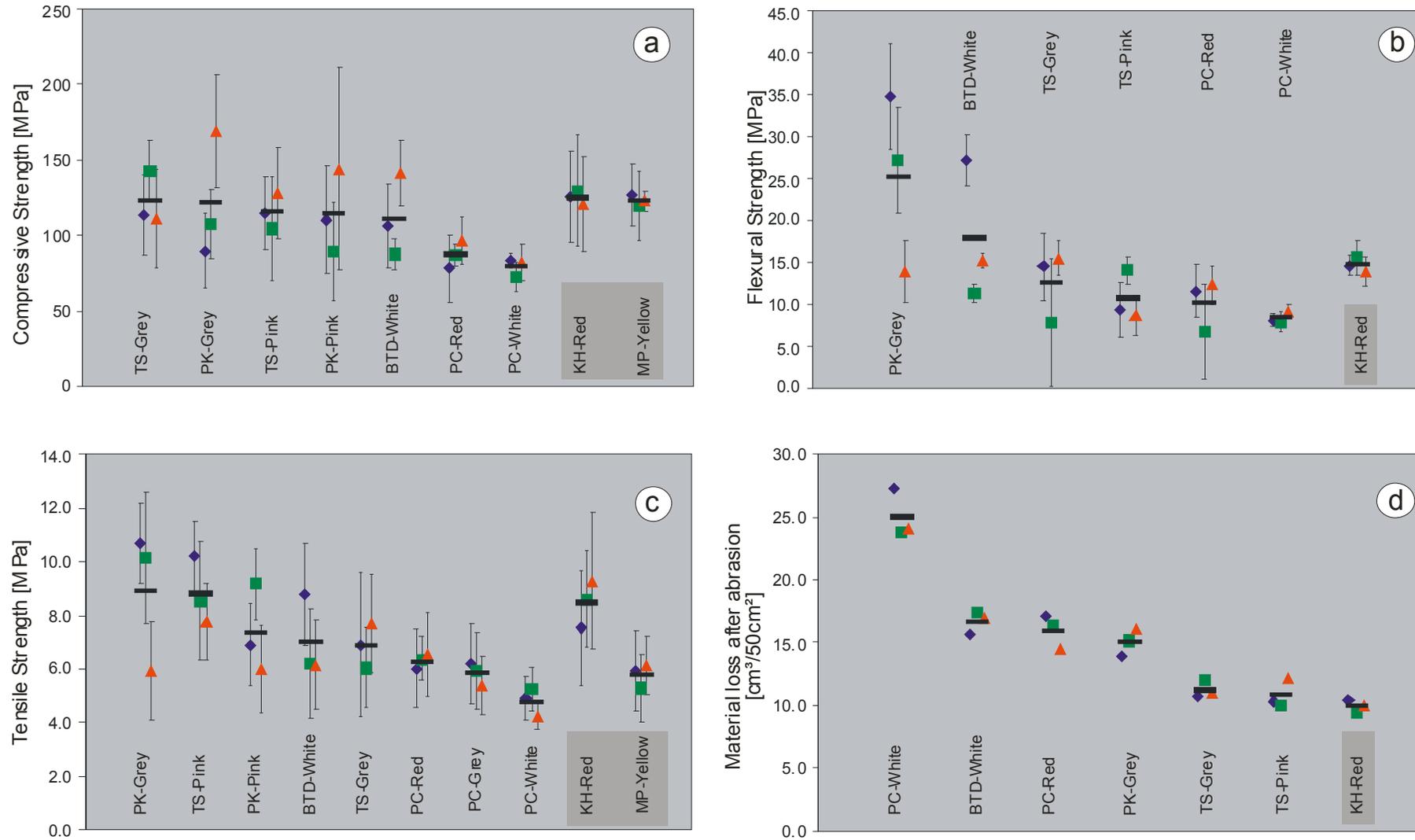


Abb. 7.10: Mechanische Eigenschaften der untersuchten Marmore und Kalksteine (grau unterlegt). a) Druckfestigkeiten. b) Biegezugfestigkeiten. c) Spaltzugfestigkeiten. d) Abriebfestigkeiten. Symbole: blaue Rauten = x-Richtung, grüne Quadrate = y-Richtung, rote Dreiecke = z-Richtung, schwarze Balken = Mittelwerte.

Wie bei den Graniten und Gneisen sind die unterschiedlichen Druck- und Spaltzugfestigkeiten der Marmore zu großen Teilen auf die Korngröße zurückzuführen. Die vier festen Varietäten PK-Grey, PK-Pink, TS-Grey und TS-Pink sind durch eine Korngröße gekennzeichnet, die mit 80-100 μm wesentlich feinkörniger ausfällt als die der Marmore PC-White und PC-Red mit durchschnittlich etwa 400 μm (vgl. Kap. 4). Die Anzahl der stabilisierenden Mineralkontakte ist damit bei den vier feinkörnigeren Proben deutlich höher. Zudem ist die Probe PC-Red neben dem Hauptbestandteil Calcit noch durch eine erhebliche Menge an Tonmineralen charakterisiert, die die einzelnen Marmorklasten umgibt. Die netzartige Verteilung der relativ weichen Tonminerale bewirkt dabei eine Vielzahl an Materialwechselln, deren Kontaktflächen bei mechanischer Beanspruchung aktiviert werden und zum Versagen der Gesteine führen können. Darüber hinaus durchziehen feinste Tonadern im μm -Bereich das Gestein, an denen ebenfalls ein Materialversagen einsetzen kann. Da die calcitischen Anteile durch glatte und teilweise suturierte Korngrenzen charakterisiert sind (vgl. Kap. 4), stellen auch die stabileren Intraklastenbereiche der Probe PC-Red mechanisch schwache Partien dar. Die Abhängigkeit der Materialeigenschaften von der Korngrenzengeometrie wird auch bei einem Vergleich der vier feinkörnigeren Proben PK-Grey/Pink und TS-Grey/Pink untereinander deutlich, da hinsichtlich der Druck-, Spaltzug- und Biegezugfestigkeiten stets höhere Werte für die Probe PK-Grey, also für eine Probe mit relativ höherem Anteil buchtiger Korngrenzen, zu verzeichnen sind.

Im Vergleich zu den im Vorfeld besprochenen Granitoiden zeigen die hier untersuchten Marmore ein sehr viel breiteres Spektrum der thermischen Ausdehnungskoeffizienten (vgl. Tab. 5.8, S. 101), was beinhaltet, dass das Längenänderungspotential der Marmore das der Granitoide noch deutlich überschreiten kann. Als thermisch sehr sensitiv müssen die beiden Marmore PC-White und PC-Red bewertet werden, da die Gesteine durch maximale Verformungen während der Temperaturzunahme gekennzeichnet sind ($\alpha_{\text{PC-White}} = 13.90 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $\alpha_{\text{PC-Red}} = 16.20 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$; vgl. Tab. 5.8, S. 101). Trotz der identischen Zusammensetzung der calcitischen Anteile reagieren beide Gesteine unterschiedlich auf den Einfluss von Temperatur (Abb. 7.11). Die Differenzen gehen dabei auf den Tonmineralgehalt der Probe PC-Red zurück, der bei einer Erhöhung der Temperatur kontrahiert und damit die Gesamtausdehnung des Marmors abmindert. Obwohl die Gesteine makroskopisch keine Vorzugorientierung der Minerale erkennen lassen, zeigen die beiden Marmore ein schwach bis deutlich anisotropes Dehnungsverhalten (Abb. 7.11), das dem eines intermediären Fasertyps entspricht. Beide Gesteine zeigen nach der Abkühlungsphase eine bleibende Verformung, so dass das Dehnungsverhalten der Gesteine als anisotrop mit bleibender Restdehnung klassifiziert werden kann.

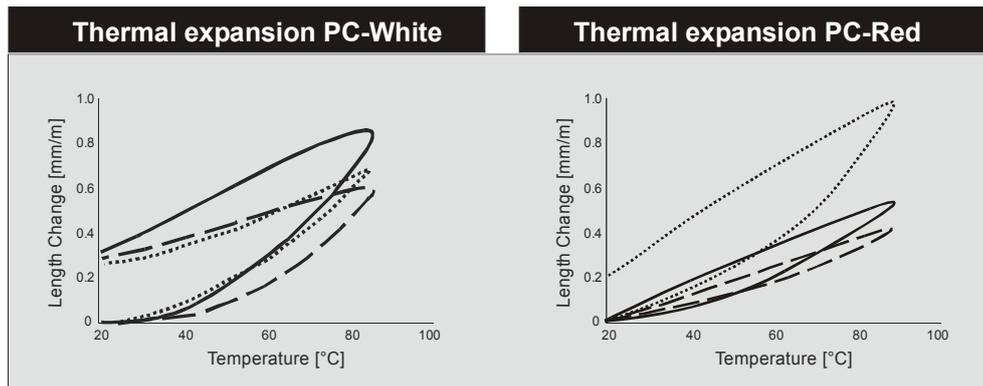


Abb. 7.11: Thermisches Dehnungsverhalten der Marmore PC-White und PC-Red unter Berücksichtigung der drei Raumrichtungen x (gepunktete Linie), y (gestrichelte Linie) und z (durchgezogene Linie).

Eine weniger signifikante Ausdehnung zeigen die beiden Varietäten PK-Grey und PK-Pink ($\alpha_{\text{PK-Grey}} = 11.70 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ und $\alpha_{\text{PK-Pink}} = 12.70 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), die im Vergleich zu den übrigen Gesteinen mittlere Dehnungsbeträge aufweisen. Noch geringere Ausdehnungskoeffizienten zeigen die Marmore BTD-White und TS-Grey ($\alpha_{\text{BTD-White}} = 8.34 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ und $\alpha_{\text{TS-Grey}} = 7.89 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), die damit am unempfindlichsten auf den Einfluss von Temperatur reagieren (vgl. Tab. 5.8, S. 101). Die Anisotropiewerte reichen bei den Marmoren PK-Grey, PK-Pink und BTD-White über 100% (Tab. 5.8, S. 101), so dass die drei Gesteine wesentlich größere Richtungsabhängigkeiten aufweisen als die beiden Marmore PC-White und PC-Red. Alle drei Marmore PK-Grey, PK-Pink und BTD-White sind durch maximale Ausdehnungen in z-Richtung, jedoch durch Kontraktion in der x-Richtung gekennzeichnet (Abb. 7.12). Das Längenänderungsverhalten entspricht dabei dem eines intermediären Fasertyps und ergibt sich aus der deutlichen Textur der Gesteine, deren c-Achsen senkrecht zur Foliation ausgerichtet sind (Abb. 7.12). Da diese Proben nach der Abkühlung wieder zu ihrer Ausgangslänge zurückkehren, lässt sich das Dehnungsverhalten der Gesteine als anisotrop ohne Restdehnung charakterisieren.

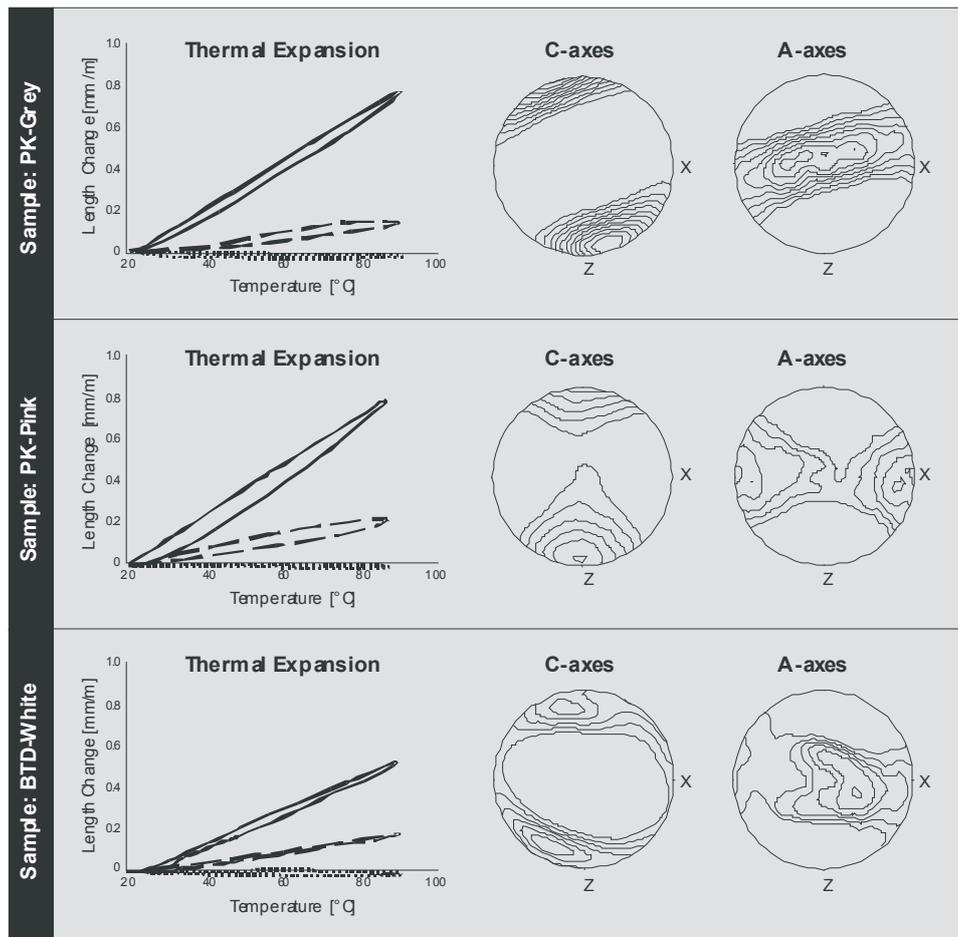


Abb. 7.12: Thermisches Dehnungsverhalten ausgewählter Marmore unter Berücksichtigung der drei Raumrichtungen x (gepunktete Linie), y (gestrichelte Linie) und z (durchgezogene Linie). Die Proben zeigen richtungsabhängige Dehnungsbeträge, die auf der kristallographischen Vorzugsrichtung der c- und a-Achsen basieren. Da die Marmore durch c-Achsen (sub-)parallel zur z-Richtung, also senkrecht zur Foliation charakterisiert sind (siehe Polpunktdarstellung in der rechten Bildhälfte), ergeben sich in dieser Richtung die maximalen Verformungen des Materials.

Im Gegensatz zu den Marmoren fällt das Dehnungsverhalten der beiden Kalksteinproben MP-Yellow und KH-Red mit Ausdehnungskoeffizienten von maximal $\alpha_{20-90} = 4.69 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ bzw. $\alpha_{20-90} = 4.21 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ relativ einheitlich aus (vgl. Tab. 5.8, S. 101). Die maximale Ausdehnung liegt dabei noch unter der der Marmore TS-Grey und BTD-White. Während bei den Marmoren jedoch die unterschiedlichen Richtungsabhängigkeiten berücksichtigt werden müssen, zeigen die beiden Kalksteine in allen Richtungen eine einheitlich geringe Expansion des Materials bis maximal 0.30 mm/m (Abb. 7.13). Darüber hinaus kehren beide Kalksteinproben nach Abkühlung des Materials zu ihrer Ausgangslänge zurück und zeigen keine bleibende Verformung an (Abb. 7.13). Die beiden Proben sind demnach durch ein nahezu isotropes Dehnungsverhalten ohne Restdehnung gekennzeichnet. Zusammen mit den relativ geringen Ausdehnungskoeffizienten zeigen die Gesteine damit vorteilhafte Voraussetzungen für die bautechnische Eignung als Naturwerkstein.

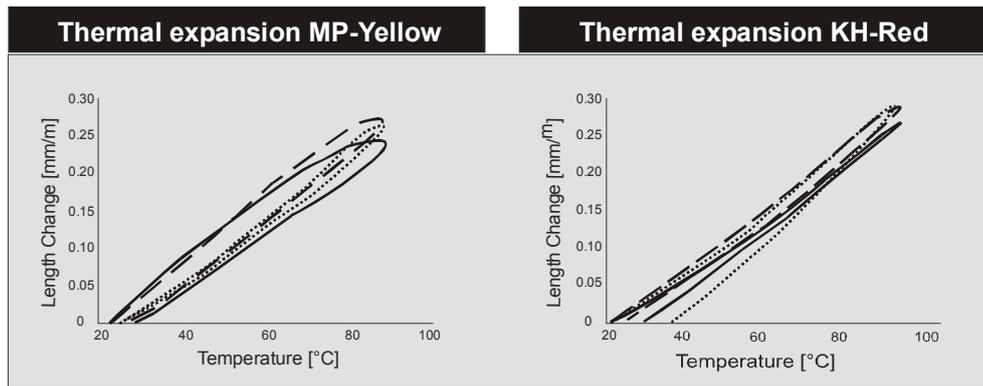


Abb. 7.13: Thermisches Dehnungsverhalten der Kalksteine MP-Yellow und KH-Red unter Berücksichtigung der drei Raumrichtungen x (gepunktete Linie), y (gestrichelte Linie) und z (durchgezogene Linie)..

7.1.3.3 Möglichkeiten und Grenzen für die Anwendung der Gesteine

Die Verwendungsmöglichkeiten der Carbonatgesteine sind auszugsweise in Tabelle 7.4 angeführt. Insgesamt zeigt sich, dass die feinkörnigen Gesteine PK-Grey und PK-Pink aufgrund der sehr hohen Festigkeiten grundsätzlich positiv hinsichtlich ihrer bautechnischen Anwendung zu bewerten sind. Zu beachten ist bei beiden Gesteinen jedoch die ausgesprochen hohe Richtungsabhängigkeit (vgl. Abb. 7.10), die bei den Druckfestigkeiten 47 % und bei den Zugfestigkeiten 60 % betragen kann (vgl. Tab. 5.6, S. 93). Sollten die Gesteine als Wandbekleidung für Bauprojekte mit hohen Belastungsstufen ausgewählt werden, muss diesem Umstand unbedingt Rechnung getragen werden. Die Gesteine sollten dann vorzugsweise parallel zum Lagenbau gesägt werden, um die Gefügeanisotropie der Varietäten vorteilhaft auszunutzen. Da die Strukturen beider Proben makroskopisch deutlich zu erkennen sind, sollte dieser Umstand für die Produktion der Werksteine keine Probleme darstellen. Einschränkungen einer richtungsorientierten Fertigung würden sich lediglich hinsichtlich der optischen Erscheinung ergeben, da die Gesteine senkrecht zum Lagenbau ein deutlich interessanteres Dekor aufweisen.

Die mechanisch instabilen Marmore PC-White und PC-Red verhalten sich unter Zug- und Druckbelastung wesentlich isotroper als die Varietäten PK-Grey und PK-Pink (vgl. Abb. 7.10). Während die Anisotropieanteile der Druck- und Spaltzugfestigkeiten deutlich unter 20 % liegen (vgl. Tab. 5.6, S. 93), zeigen die Werte für die Biegezugfestigkeit eine deutlich höhere Richtungsabhängigkeit, die mit 46 % (vgl. Tab. 5.6, S. 93) allerdings deutlich überhöht erscheint. Aufgrund der sehr heterogenen Ausbildung signalisiert der Prozentsatz jedoch vermutlich keine Richtungsabhängigkeit im eigentlichen Sinne, sondern lediglich Unterschiede in den Festigkeiten, die auf lokale Heterogenitäten der Gesteine zurückzuführen sind. Die geringen Anisotropien der Gesteine wirken sich sehr günstig auf die Verwendung am Bauwerk aus und relativieren damit einen Teil der niedrigen Festigkeiten. Im Gegensatz zu den Marmoren aus PK-Grey und PK-Pink wäre bei diesen Varietäten auch eine richtungsabhängige Materialproduktion nicht durchführbar, da keinerlei makroskopische Vorzugsorientierung der Komponenten vorliegt.

Die Marmore TS-Pink und TS-Grey eignen sich vorzugsweise als Bodenplatten und Treppenstufen, da beide Gesteine durch relativ hohe Abriebfestigkeiten gekennzeichnet sind. Zu berücksichtigen wäre allerdings die relativ geringe Biegezugfestigkeit der Gesteine, so dass der Einsatz als Treppenstufe nur unter Verwendung eines unterlagernden Stützbettes erfolgen sollte, das die einwirkenden Kräfte aufnimmt bzw. über eine größere Fläche verteilt. Der Kalkstein KH-Red würde sich ebenfalls gut als Bodenbelag eignen, da das Gestein mit durchschnittlich $9.9 \text{ cm}^3/50\text{cm}^2$ noch weniger Materialverluste durch Abrieb aufweist als die Marmore (vgl. Abb. 7.10). Diese vorteilhafte Eigenschaft ist vermutlich darin begründet, dass die Varietät durch Quarzanteile in der mineralogischen Zusammensetzung gekennzeichnet ist, die die Resistenz des Materials in Bezug auf Abrasion erhöhen. Nachteilig bei der Verwendung als Stufenbelag dürfte sich bei dem Gestein der sehr hohe Fossilgehalt auswirken, der sich an den Kantenbereichen infolge von Stoßeinwirkungen aus dem Gesteinsverband lösen kann. Von ähnlichen Materialverlusten an den Kanten muss bei weiteren Marmoren ausgegangen werden. Bei der Probe PC-Red könnten sich beispielsweise die Marmorlasten von der relativ weichen Tonmatrix ablösen. Neben dem insgesamt hohen Materialverlust, der bei dem tonreichen Marmor durch Abrieb zu erwarten wäre, könnte sich zudem aufgrund der differenzierten Mineralhärten von Dickit und Calcit die Gesteinsoberfläche ungleichmäßig abnutzen, was wiederum zu einer Qualitätsminderung hinsichtlich optischer und funktioneller Aspekte führen könnte.

Die Mehrheit der untersuchten Carbonatgesteine würde sich aufgrund der mechanischen Eigenschaften für die Verwendung als Fassadenplatten im Innenbereich eignen (Tab. 7.4). Dies gilt insbesondere für die Lithologien PK-Grey und BTD-White, die durch ausgesprochen hohe Biegezugfestigkeiten gekennzeichnet sind. Da gerade im Innenbereich relativ wenig extrinsische Faktoren (bspw. Sonne, Wind oder Regen) auf das Material einwirken und Gesteine damit keinen nennenswerten Beanspruchungen ausgesetzt sind, sollten sich auch andere Varietäten wie etwa TS-Grey oder PC-Red, bei denen die Biegezugfestigkeit ein kritischen Qualitätsfaktor darstellt, als Bauelement in diesem Bereich eignen.

Da diese Konditionen für die äußeren Gebäudepartien nicht gelten, ergeben sich hier für die Mehrheit der Proben Einschränkungen in der Verwendung. In dem Kapitel 7.1.1.2 wurde bereits auf die Schadensbilder aufmerksam gemacht, die Marmore unter dem Einfluss von Temperatur und Feuchtigkeit, also vornehmlich im Außenbereich, erfahren können. Um hier die Verwendungsmöglichkeiten abzuklären, soll im Folgenden das thermische Dehnungsverhalten der Carbonatgesteine berücksichtigt werden, das als Folge einer Kombination aus Sonneneinstrahlung und Niederschlag die bautechnische Anwendung von Marmoren vielfach limitiert.

Kritisch zu bewerten sind in diesem Zusammenhang die beiden Marmore PC-White und PC-Red, da beide Gesteine eine permanente Längenänderung nach einer thermischen Beanspruchung aufweisen können. Während diese Restdehnung bei dem Marmor PC-White in allen drei Richtungen einen nahezu identischen Betrag anzeigt, ist bei dem Marmor PC-Red lediglich eine Restdehnung in der x-Richtung zu verzeichnen (vgl. Abb. 7.11). In den beiden anderen Richtungen y und z reagiert das Material ohne irreversible Verformung. Dieses bautechnische Materialverhalten muss als äußerst unvorteilhaft bewertet werden, da das Gestein anscheinend sehr verschiedene Dehnungsbeträge je nach Orientierung der

Marmorfragmente und dem Gehalt an Tonmineralen aufweisen kann. Diese Elemente sind jedoch aufgrund der vollkommen richtungslosen Ausbildung nicht zu quantifizieren und zu prognostizieren. Falls das Gestein als Fassadenverkleidung für ein Bauprojekt ausgewählt wird, ist seitens der Bauplanung nicht zu garantieren, dass das Gestein nach mehrmaliger thermischer Belastung geschädigt wird oder nicht.

Bei beiden Proben PC-White und PC-Red würden sich aufgrund des Dehnungsverhaltens der Mineralbestandteile Schäden abzeichnen. Neben der Rissbildung, die durch die Längenänderungen in den calcitischen Anteilen hervorgerufen werden kann, wären weitere Mängel, etwa Verbiegungen der Fassadenelemente, möglich. Ferner ist davon auszugehen, dass der Tonmineralanteil des Gesteins PC-Red bei erhöhten Wassergehalten plastisch reagiert und sich durch die permanente Restdehnung der Marmorklasten duktil verformt. Bei behinderter Seitenausdehnung und entsprechend hohen Verformungsraten könnte dieses unter Umständen zu einer Verdrängung der Tonmatrix führen, die sich nach längerer Zeit in einer unregelmäßigen, welligen Oberflächenstruktur der Platten ausdrückt.

Da der Mineralbestand von Carbonatgesteinen sehr sensibel auf säurehaltige Lösungen reagiert, disqualifizieren sich die Marmore und Kalksteine im Grunde auch für jeden Einsatz im Küchenbereich. Bei den Kalksteinen KH-Red und MP-Yellow oder bei dem Marmor TS-Pink könnten schädigende Substanzen in die Vertiefungen an Styolithen bzw. in Risse eindringen und hier den Mineralbestand über einen längeren Zeitraum hinweg angreifen. Während bei den Marmoren TS-Pink und TS-Grey beispielsweise Lösungen durch die vernetzten Rissysteme entlang der Korngrenzen bis tief in das Innere des Materials migrieren können, sollten bei dem Kalkstein KH-Red lediglich einzelne Risse an der Oberfläche, jedoch keine verbundenen Porensysteme, für Lösungen zugänglich sein. Die Lösungen können in diesem Fall also nicht bis in die zentralen Bereiche des Materials vordringen.

Tab. 7.4: Verwendungsmöglichkeiten für ausgewählte Proben der Carbonatgesteine (+++ vorläufig bis bedingt geeignet, ++ bedingt bis wenig geeignet, + wenig bis nicht geeignet).

		PK-Grey	BTD-White	TS-Grey	PC-Red	KH-Red
Boden	Innen	+++	++	+++	++	+++
	Außen	++	++	+++	+	+++
Treppen	Innen	+++	++	++	+	+
	Außen	++	++	++	+	++
Fassade	Innen	+++	+++	+++	+++	+++
	Außen	++	++	+	+	+++
Küche		+	+	+	+	+
Bearbeitung		+++	+++	+++	+++	+++

Ein weiterer Aspekt, der eine Verwendung von Carbonatgesteinen im Küchenbereich ausschließen sollte, ist die relativ geringe Mineralhärte und die daraus resultierende Kratzempfindlichkeit der Calcitkristalle, da beim Arbeiten mit metallischen Gegenständen erhebliche Beeinträchtigungen in der Qualität der Gesteinsoberflächen zu erwarten sind. Gerade die geringe Härte der Calcitkristalle muss andererseits als günstige Voraussetzung für die Bearbeitung der Lithologien angesehen werden, da sich das Material dadurch optimal formen lässt. Alle Lithologien sollten sich daher grundsätzlich positiv in der Verwendung als Dekor- oder Ornamentgestein verhalten (Tab. 7.4).

7.1.4 Qualitative Bewertung thailändischer Sandsteine

7.1.4.1 Optische Eigenschaften

Aufgrund der recht homogenen mineralogischen Zusammensetzung der sechs untersuchten Sandsteine sind bei den Varietäten relativ stabile Dekoreigenschaften zu erwarten. Alle Varietäten könnten zudem aufgrund der silikatischen Kornbindungen eine hochwertige Oberflächenbearbeitung erfahren. Die Ausbildung silikatischer Kornbindungen kann als wesentliche Voraussetzung für die Polierfähigkeit der untersuchten Sandsteine angesehen werden, da nur geringe, im Falle der quarzreichen Varietäten sogar gar keine Härteunterschiede zwischen detritischen Körnern und den Matrixanteilen bestehen. Der Mineralbestand der quarzreichen Varietäten sollte die Politur daher nahezu einheitlich aufnehmen. Bei den feldspatreicheren grünen und roten Sandsteinen sollte ebenfalls eine Oberflächenveredelung der Fertigwaren möglich sein, da auch hier mehrheitlich gut polierfähige Minerale am Aufbau des Varietäten beteiligt sind. Zu beachten sind bei den zwei Sandsteinen allerdings die tonigen Anteile, die sich aufgrund der geringeren Härte von der Oberfläche lösen und die Güte der Politur beeinträchtigen können.

7.1.4.2 Gesteinstechnische Eigenschaften

Die untersuchten Sandsteine weisen mit Porositäten zwischen mehrheitlich 10 und 14 Vol.-% sehr einheitliche Werte auf (vgl. Tab. 5.1, S. 76), wobei sich die Differenz von 4 Vol.-% vermutlich aus der inhomogenen Verteilung der Tonhorizonte ergibt. Eine Ausnahme bildet der grüne Sandstein, der mit einer Porosität von ca. 7 Vol.-% den mit Abstand niedrigsten Wert anzeigt. Die Abweichung ist zum einen in der geringen Korngröße des Materials und der schlecht gerundeten detritischen Körner begründet, die eine sehr dichte Packung der Minerale erlauben. Von wesentlich größerer Bedeutung ist der erhebliche Anteil sekundärer Carbonatmineralisationen, die den primären Porenraum des Gesteins auskleiden und damit das Hohlraumvolumen verringern. Eine weitere Ausnahme stellt mit 21 Vol.-% Porosität der weiße Sandstein dar, was eventuell auf ein deutlich gröberes Korngefüge im Vergleich zu den

übrigen Varietäten oder aber auch auf die Einlagerung von Tonlinsen zurückzuführen ist, die teilweise herauswittern und so zu einem erhöhten Porenvolumen beitragen.

Die Matrixdichten der untersuchten Sandsteine beschränken sich mit Werten zwischen 2.65 und 2.73 g/cm³ auf einen sehr kleinen Bereich (vgl. Tab. 5.1, S. 76). Bei allen vier Subarkosen mit Quarz als Hauptbestandteil sollte die Matrixdichte der Mineralkomponenten annähernd mit der Dichte eines reinen Quarzes vergleichbar sein (2.65-2.66 g/cm³), was sich anhand der vorliegenden Ergebnisse bestätigt. Der relativ quarzarme aber feldspatreiche rote Sandstein zeigt ebenfalls die Dichte der Quarzsandsteine an, was vermutlich darin begründet ist, dass Plagioklas in dieser Varietät die dominierende Feldspatkomponente darstellt und die Dichte des Minerals nur unwesentlich unter der von Quarz liegt. Die recht hohe Dichte des grünen Sandsteins dagegen ergibt sich aus der wechselnden Zusammensetzung von Quarz und den in ihrer Mehrheit spezifisch schwereren Glimmeranteilen und Carbonaten.

Die entsprechenden Rohdichten der Sandsteine decken ein deutlich größeres Spektrum ab, wobei sich eine Korrelation zwischen den einzelnen Werten der Rohdichte und der Porosität erkennen lässt. In gleicher Weise wie die Porosität wird auch die Wasseraufnahme unter Vakuum bei gleicher Matrixdichte lediglich von der Porosität gesteuert, so dass die niedrigsten Werte für die Wasseraufnahme den niedrig porösen, grünen Sandsteinen und die höchsten Werte den höher porösen, weißen Sandsteinen zugesprochen werden können.

Alle Sandsteine zeichnen sich durch hohe Festigkeiten aus, wobei die Maximalwerte mehrheitlich für die quarzreichen Varietäten aufgenommen wurden (braune, gelbe und weiße Sandsteine) (Abb. 7.14). Die vorliegenden Höchstwerte sind dabei dem hohen Gehalt an mechanisch stabilem Quarz zuzuschreiben, der in den Varietäten sowohl als Detritus, als auch in Form von intergranularem Zement vorliegt. Insbesondere die quarzitisches Mineralbindung kann als wesentliche Voraussetzung für die Festigkeit der Gesteine gewertet werden. Obwohl alle quarzreichen Sandsteine annähernd die gleiche Mineralogie aufweisen, können sich Unterschiede in den mechanischen Eigenschaften ergeben. Diese Unterschiede, die beispielsweise anhand der Druckfestigkeiten für braune, gelbe und weiße Varietäten dokumentiert sind (Abb. 7.14), gehen - wie schon bei Granitoiden und Carbonatgesteinen beobachtet - vermutlich auf eine gröbere Korngröße (weiße Sandsteine) und eine höhere Porosität (gelbe und weiße Sandsteine) zurück.

Obwohl die grünen Sandsteine wesentlich geringere Quarzanteile und höhere Gehalte an mechanisch schwächerem Feldspat aufweisen, zeigen beispielsweise die Druckfestigkeiten der grünen Sandsteine teilweise höhere Werte als die der quarzreichen Sandsteine (Abb. 7.14). Als Ursache dafür kann die Carbonatmineralisation im Porenraum gewertet werden, die ergänzend zur silikatischen Bindung die Anzahl der Korn-zu-Korn-Kontakte erhöht.

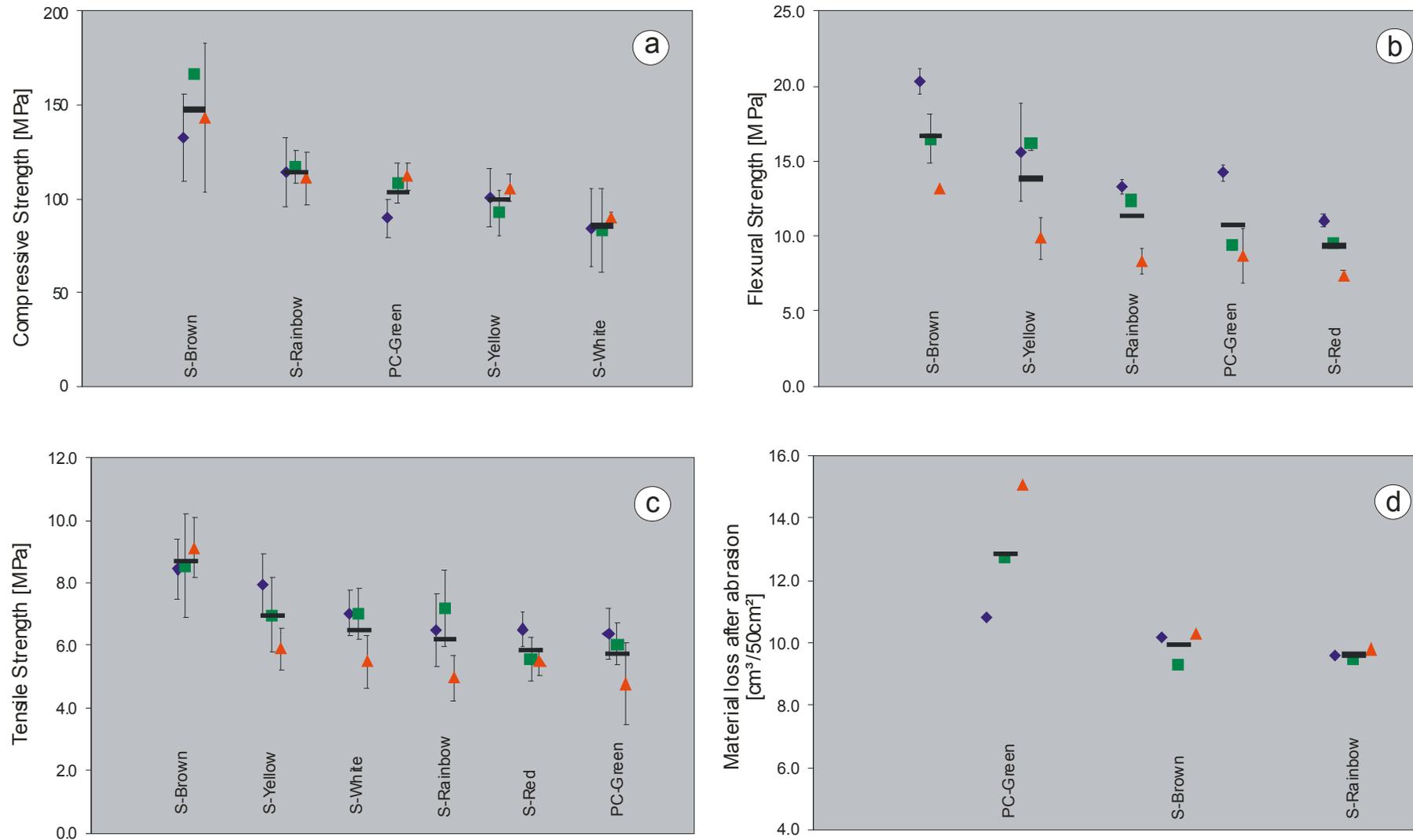


Abb. 7.14: Mechanische Eigenschaften der untersuchten Sandsteine. a) Druckfestigkeiten. b) Biegezugfestigkeiten. c) Spaltzugfestigkeiten. d) Abriebfestigkeiten. Symbole: blaue Rauten = x-Richtung, grüne Quadrate = y-Richtung, rote Dreiecke = z-Richtung, schwarze Balken = Mittelwerte.

Der grüne Sandstein zeigt eine relativ geringe Resistenz gegen Materialverluste infolge von Abriebkräften, was sich in den recht hohen Durchschnittswerten von $13 \text{ cm}^3/50\text{cm}^2$ (Abb. 7.14) äußert und auf den höheren Gehalt an Tonmineralen zurückgeführt werden kann. Nachteilig wirken sich die eingeschalteten Tonhorizonte auch hinsichtlich anderer mechanischer Eigenschaften aus. So müssen die Tonlagen beispielsweise als potentielle Bruchstellen im Gesteinsverband definiert werden, die maßgeblich die Biege- und Spaltzugfestigkeiten kontrollieren. Grundsätzlich ist aus dem Probensatz zu erkennen, dass diejenigen Gesteine mit dem höchsten Tonmineralgehalt (z.B. grüne und rote Sandsteine) die niedrigsten Zugfestigkeiten anzeigen, während umgekehrt diejenigen Proben mit dem niedrigsten Tonmineralgehalt (braune Sandsteine, vgl. Tab. 4.5, S. 52) die höchsten Zugfestigkeiten aufweisen (Abb. 7.14). Bei der Beanspruchung auf Zugkräfte kontrollieren Tonhorizonte und der damit verbundene sedimentäre Lagenbau auch die Richtungsabhängigkeit der Materialeigenschaften. Die Annahme ergibt sich aus der Beobachtung, dass sich jeweils die höheren Festigkeiten eines Sandsteins in der x- und y-Richtung ergeben, während die z-Richtung vergleichsweise niedrigere Werte aufweist (Abb. 7.14). Eine Ausnahme bildet dabei die Spaltzugfestigkeit der braunen Sandsteine, bei der die höchsten Kräfte beim Spalten entlang der Lagerflächen aufgebracht werden müssen.

Bei den untersuchten Sandsteinen kann in Bezug auf die thermische Dehnung ein differenziertes Dehnungsverhalten ermittelt werden, das sich durch relativ geringe Ausdehnungen unter $10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ und vergleichsweise hohe Ausdehnungen über $10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ definiert (vgl. Tab. 5.8, S. 101). Die Ausdehnungskoeffizienten (α) des Probenmaterials liegen dabei innerhalb der von Schuh (1987) und Peschel (1983) definierten Grenzen für Sandsteine, die sich zwischen $7.6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ und $12.3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ bzw. zwischen $9.0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ und $13.3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ bewegen. Generell ist dabei zu beobachten, dass rote und grüne Sandsteine die niedrigsten Ausdehnungskoeffizienten aufweisen, während die weißen, gelben, Rainbow und braunen Sandsteine (hier geordnet nach dem ansteigenden Mittelwert) durch deutlich höhere Ausdehnungskoeffizienten charakterisiert sind.

Unter Berücksichtigung der mineralogischen Zusammensetzung lässt sich folgern, dass wie bei den Granitoiden quarzreiche Varietäten ein größeres Längenänderungspotential aufweisen als feldspatreiche Varietäten. Ursächlich sind auch hier die Dehnungseigenschaften der Einzelkristalle, so dass sich bei nahezu monomineralischen Subarkosen höhere Dehnungsbeträge einstellen als bei den kompositionell heterogeneren Arkosen (vgl. Tab. 5.8, S. 101). Darüber hinaus wirken die zwischen den Quarzkörnern eingelagerten Tonpartikel bei der thermischen Ausdehnung nicht starr, sondern elastisch, was zu einer Pufferung des α -Wertes führen kann. Da die grünen und roten Sandsteine durch einen relativ hohen Tonmineralgehalt gekennzeichnet sind, kann dieser Anteil zusätzlich zu einer Minderung der Ausdehnungskoeffizienten beitragen und die niedrigen Dehnungsbeträge erklären. Der Einfluss von Tonmineralen auf die Dehnungseigenschaften der Gesteine lässt sich auch innerhalb der Suite quarzreicher Subarkosen feststellen, da die weißen Sandsteine, gekennzeichnet durch relativ hohe Tonmineralgehalte, die geringste Ausdehnung anzeigen.

Der spezifische Gehalt an Tonmineralen in den Sandsteinen spiegelt sich neben der Intensität der thermischen Längenänderung noch in der Anisotropie des Dehnungsverhaltens wieder, da die größten Unterschiede der Ausdehnungskoeffizienten in den jeweiligen

Richtungen x, y und z bei den tonmineralreichen roten und grünen Sandsteinen zum Ausdruck kommen (vgl. Tab. 5.8, S. 101).

Die untersuchten Sandsteine können eine weitaus größere Schädigung als die der thermischen Dehnung erfahren, wenn die Materialien unter dem Einfluss von Feuchtigkeit aufquellen. Die Ursache für die Quellung wird als komplexe Funktion der Struktur sowie der am Gefügebau beteiligten Mineralphasen gewertet (siehe Weiss 1992). Schuh (1987) sieht das Dehnungsverhalten im Wesentlichen in den in Sandsteinen enthaltenen Tonmineralen (Illit, Chlorit, Kaolinit) begründet, welche das Bestreben haben, Wassermoleküle an ihren Oberflächen anzulagern. Durch osmotischen Druck kann bei großem Wasserangebot weiteres Wasser zwischen die Tonpartikel gesogen werden, wodurch sich der Abstand zwischen den Körnern vergrößert und damit das Gestein an Volumen zunimmt. Die vorliegenden Messungen der Sandsteinproben demonstrieren deutlich, dass zwischen dem Ausmaß der hygrischen Dehnung und dem Tongehalt der Proben ein direkter Zusammenhang besteht.

In Bezug auf die hygrische Dehnung lassen sich wie bei der thermischen Dehnung zwei Gruppen hinsichtlich der hygrischen Sensibilität klassifizieren, wobei sich die hygrischen Längenänderungen annähernd reziprok zur thermischen Längenänderung verhalten. Als hygrisch sehr empfindlich gelten demnach die grünen Sandsteine (20 Vol.-% Tonminerale) mit Dehnungsbeträgen von 1.3 mm/m sowie die roten Sandsteine (12 Vol.-% Tonminerale), die mit bis zu 0.76 mm/m mittlere Verformungsbeträge aufweisen. Alle übrigen Sandsteine (7-12 Vol.-% Tonminerale) sind durch niedrigere Dehnungsbeträge gekennzeichnet (vgl. Tab. 5.9, S. 102). Die Tatsache, dass die weißen Sandsteine zwar durch identisch hohe Tonmineralgehalte wie die roten Sandsteine gekennzeichnet sind, dabei aber u. a. die niedrigsten hygrischen Dehnungen aufweisen, liegt eventuell in der relativ hohen Porosität der weißen Sandsteine begründet. Die relativ feinen Tonpartikel könnten sich demnach beim Quellen in die Hohlräume ausdehnen, die auf diese Weise eine stärkere Verformung des Sandsteins abpuffern (vgl. Abb. 7.9). Die Größenordnung, in der sich die hygrische Längenänderung der Sandsteinproben bewegt, korreliert mit den Messwerten von Felix (1983) und Schuh (1987). Beide Autoren ermittelten durch das Eintauchen von Sandsteinen in Wasser sogar deutlich höhere Dehnungsbeträge, welche bis zu 4 mm/m erreichen.

7.1.4.3 Möglichkeiten und Grenzen für die Anwendung der Gesteine

Für die thailändischen Sandsteine ergeben sich aufgrund der unterschiedlichen gesteintechnischen Eigenschaften sowie der Zusammensetzung detritischer Minerale und der Kornbindung differenzierte Verwendungsmöglichkeiten, von denen einige in Tabelle 7.5 angeführt sind.

Die bautechnische Eignung der Sandsteine erscheint dabei insbesondere für die quarzreichen Varietäten sehr vielfältig. Aufgrund der nahezu monomineralischen Komposition der Gesteine S-Brown, S-Yellow und S-Rainbow wäre grundsätzlich eine Verwendung als Bodenbelag denkbar, da die hohen Quarzgehalte eine hohe Resistenz gegenüber Abrieb bewirken. Einschränkungen ergeben sich für die Probe S-White, die aufgrund ihrer recht hohen Porositäten anfällig gegenüber dem Eintrag von Schmutzpartikeln

in das Porensystem ist und im Rahmen der Verwendung als Bodenmaterial optische Mängel erfahren kann. Braune und gelbe Varietäten könnten sich zudem für den Einsatz als Treppenstufen oder Fassadenplatten eignen, da die Gesteine durch hohe Biegezugfestigkeiten und Abriebfestigkeiten charakterisiert sind. Im Gegensatz zu den braunen und gelben Sandsteinen ist der Einsatz grüner und roter Sandsteine in vielen Fällen limitierter. Eine Anwendung als Bodenbelag ist nicht zu empfehlen, da aufgrund der hohen Tonmineralgehalte erhebliche Materialverluste bei langfristiger Anwendung auftreten können. Auch als Fassadenplatte sollten die Gesteine keinen großen Beanspruchungen ausgesetzt werden: die relativ niedrigen Biegezugfestigkeiten könnten hier zu einer Materialermüdung führen. Insbesondere gilt dies, wenn der Einfluss von Feuchtigkeit zu einer Volumenvergrößerung der quellfähigen Tonminerale führt, da gerade die grünen und roten Sandsteine relativ niedrige Spaltzugfestigkeiten aufweisen. Somit kann es zu Rissen im Gestein und folglich zu Sicherheitsproblemen am Bauwerk kommen.

Aufgrund ihrer Polierfähigkeit und der damit verbundenen glatten Oberflächen sind die Gesteine grundsätzlich weniger anfällig gegenüber Witterungseinflüssen als in naturbelassenem Zustand (Müller 2001). Vor diesem Hintergrund wäre es möglich, dass sich die thailändischen Sandsteine im polierten Zustand voraussichtlich auch für die Verwendung im Außenbereich innerhalb mitteleuropäischer Klimate eignen. Dafür spräche in diesem Zusammenhang auch der Sättigungsgrad des Porenraumes, der bei den untersuchten Varietäten mehrheitlich unter 70 % liegt. Für das Verwitterungspotential der Sandsteine bedeutet dies, dass die untersuchten Sandsteine mit Ausnahme der grünen Varietät als verwitterungs- und frostbeständig zu bewerten sind (nach Peschel 1983) und somit auch im Außenbereich unter dem Einfluss von Temperaturschwankungen zur Anwendung kommen könnten. Grüne Sandsteine sind auf Grund der hohen Porensättigung im durchfeuchteten Zustand (85 %) als zweifelhaft hinsichtlich der Verwitterungsresistenz einzustufen und sollten daher nur bedingt im Freien angewendet werden. Der Einsatz dieser Sandsteine im Außenbereich sollte nicht zuletzt auch deshalb vermieden werden, da die Carbonatanteile der Varietät beim Kontakt mit Regenwasser angelöst und an anderer Stelle als Gips ausgefällt werden könnten.

Während der hohe Quarzgehalt und die intensive silikatische Bindung der Gesteine S-Brown, S-Yellow und S-White im Allgemeinen positive Eigenschaften hervorbringen, wirkt sich gerade diese mineralogische Zusammensetzung nachteilig auf die Bearbeitung des Materials aus. Der Grund dafür liegt in der ausgesprochen hohen Materialhärte, die bei Arbeiten mit einem hohen Formungseinsatz zu Schwierigkeiten in der Ausführung sowie zu hohem Werkzeugverschleiß führen kann. Als Ornamentgesteine sind daher lediglich die feldspatreicheren und damit relativ weicheren grünen und roten Varietäten geeignet.

Tab. 7.5: Verwendungsmöglichkeiten für die untersuchten Sandsteinproben (+++ vorläufig bis bedingt geeignet, ++ bedingt bis wenig geeignet, + wenig bis nicht geeignet).

		S-Brown	S-Yellow	S-White	S-Rainbow	PC-Green	S-Red
Boden	Innen	+++	+++	++	+++	++	++
	Außen	+++	+++	++	+++	+	++
Treppen	Innen	+++	+++	++	++	++	+
	Außen	+++	+++	++	++	+	+
Fassade	Innen	+++	+++	+++	+++	++	++
	Außen	+++	+++	++	++	+	+
Küche		+	+	+	+	+	+
Bearbeitung		+	+	+	+	+++	+++

7.2 Bewertung der Trennflächensysteme und der Rohblockhöflichkeit

Im Verlauf der vorliegenden Arbeit wurde bereits an unterschiedlichen Stellen deutlich, dass die Eignung eines geographischen Areals als Lagerstätte für Naturwerksteine entscheidend vom Trennflächengefüge des Abbaubereiches abhängig ist. Die Charakterisierung der thailändischen Abbaubereiche in vorherigen Kapitel 6 hat gezeigt, dass eine Vielzahl an Lagerstätten durch ausgesprochen weitständige Trennflächen gekennzeichnet ist, so dass sich dem Werksteinabbau in dieser Hinsicht grundsätzlich positive Voraussetzungen bieten.

In Abbildung 7.15 ist die Abstandsverteilung der Klüfte zusammen mit den Blockgrößen und der monatlichen Produktion für Lagerstätten in magmatischen Gesteinen graphisch illustriert. Mit wenigen Ausnahmen lässt sich dabei erkennen, dass mit einer zunehmenden Abstandsverteilung der Klüfte auch deutlich mehr Rohmaterial ausgebracht werden kann. Während beispielsweise die Lagerstätte BT-Blue1 durch maximale Kluftabstände bis lediglich 2.4 m und durch einen monatlichen Durchschnittsertrag von 50 m³ gekennzeichnet ist, zeigen andere Lagerstätten deutlich weitere Kluftabstände und damit verbunden auch deutlich höhere monatliche Erträge (Abb. 7.15). Die Ertragszahlen einiger Lagerstätten lassen sich dabei jedoch nicht in ein solches Schema integrieren. Diejenigen Abbaubereiche, in denen die Erträge nicht ausschließlich von der Abstandsverteilung der Trennflächen abhängen, werden beispielsweise durch die Lagerstätte BT-Blue2 repräsentiert. Die Produktion fällt hier mit durchschnittlich 140 m³/ Monat relativ hoch aus. Die Ertragszahlen lassen sich dabei jedoch aus der Größe des Abbaufeldes ableiten, so dass trotz durchschnittlicher Abstandsweiten relativ viel Material ausgebracht werden kann. Gleiches gilt für die

Lagerstätte MT-Orange1 mit einer monatlichen Förderung von 700 m³, wobei hier die strukturellen Vorgaben des Kluftsystems weitaus günstiger ausfallen (Abb. 7.15).

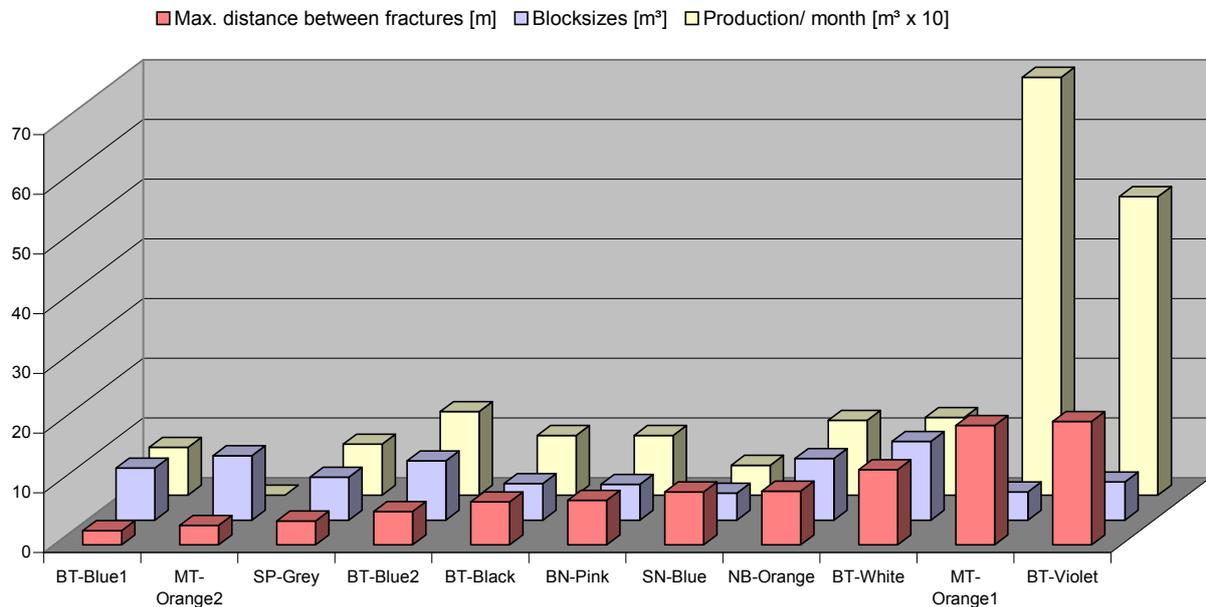


Abb. 7.15: Kluftabstände, Blockgrößen und monatliche Produktion für eine Auswahl von Lagerstätten mit Gesteinen magmatischer Herkunft.

Die weitesten Kluftabstände konnten innerhalb des Tak Batholithen, hier in der Lagerstätte BT-Violet aufgenommen werden (vgl. Anhang IV). Abbildung 7.16a zeigt die prozentuale Verteilung der Trennflächen für zwei vertikale Kluftscharen und die Lagerklüfte, einschließlich solcher mit bis zu 45° Abweichung von der horizontalen Ebene. Für beide vertikalen Kluftscharen dieser Lagerstätte ist kennzeichnend, dass 50 % der Klüfte über eine Distanz von mehr als 1 m, im Fall NNE-SSW-streichender Klüfte sogar über eine Distanz von mehr als 3 m auftreten. Als weitständig erweisen sich zudem auch etwa 35 % der horizontalen Trennflächen (Abb. 7.16a). Während vertikale Klüfte einen Abstand von maximal 20.7 m aufweisen, können horizontale bzw. subhorizontale Klüfte im Abstand von bis zu 14.4 m entwickelt sein (vgl. Anhang IV). Da die Gewinnung in der Lagerstätte an einem Boulder von etwa 30 m Länge und 15 m Höhe erfolgt, kann sich der gesamte Abbau aufgrund der weitständig ausgebildeten Trennflächen auf einen nahezu kluftfreien Körper konzentrieren (Abb. 7.16b). Die insgesamt vorteilhaften Bedingungen in Bezug auf die Abstandsverteilung der Trennflächen spiegeln sich entsprechend in den Erträgen der Lagerstätte wieder, die mit 500 m³ pro Monat außerordentlich hoch sind (Abb. 7.15).

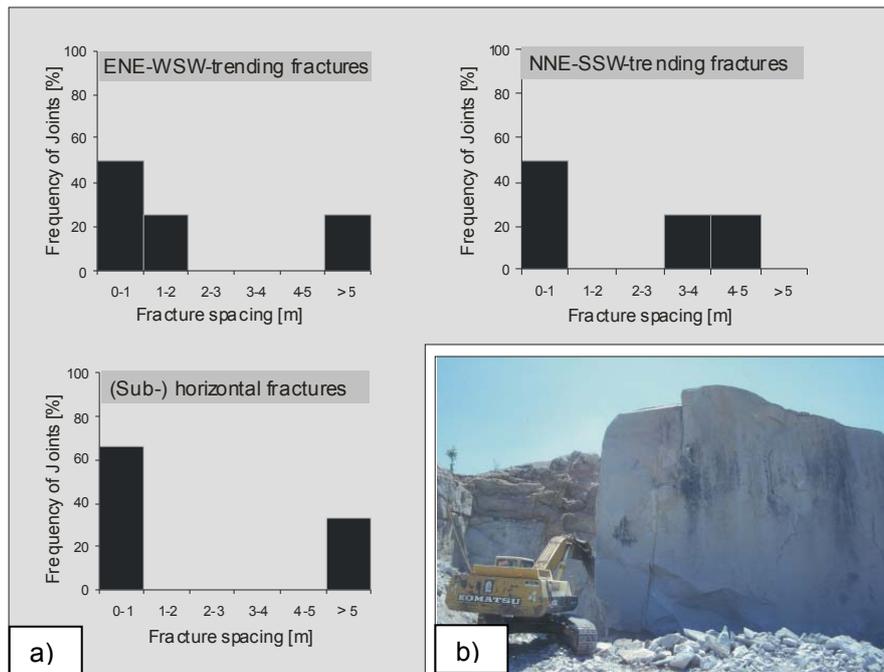


Abb. 7.16: Lagerstätte BT-Violet. a) Prozentuale Abstandsverteilung der Trennflächen. Das Abbaugelände ist durch ausgesprochen positive Voraussetzungen für die Werksteingewinnung gekennzeichnet, da die Klüfte zu einem großen Anteil weitständig bis sehr weitständig ausgebildet sind. b) Boulderabbau in der Lagerstätte. Der Boulderabbau ist aufgrund der intensiven oberflächennahen Verwitterung besonders in tropischen und subtropischen Klimaten zu finden.

Das Trennflächengefüge der Lagerstätten BT-Violet muss jedoch als Ausnahmefall gewertet werden, da der überwiegende Anteil granitoider Lagerstätten deutlich geringere Abstandsverteilungen der Klüfte aufweist. Die Mehrheit an Lagerstätten in magmatischen Gesteinen weist vertikale Kluftabstände auf, deren maximale Weite in einem Bereich zwischen 5 und 10 m liegt. Zu nennen sind hier etwa die Lagerstätten BT-Black, BN-Pink oder NB-Orange (vgl. Abb. 7.15).

Sehr geringe Abstände sowohl für vertikale als auch (sub-)horizontale Trennflächen wurden in der Lagerstätte MT-Orange2 aufgenommen (Abb. 7.17). In dieser Lagerstätte zeigt sich, dass die Mehrheit der vertikalen Klüfte eine Distanz von unter 2 m zueinander aufweist und lediglich ein geringer Prozentsatz an Klüften durch Abstandsweiten über 2 bzw. 3 m charakterisiert ist. Innerhalb der Kluftschar mit NE-SW-streichender Orientierung treten sogar mehr als 60 % aller Trennflächen mit Abständen unter 1 m auf (Abb. 7.17a). Die Lagerstätte ist damit äußerst unwirtschaftlich. Als Folge der vielen engständig bis sehr engständig ausgebildeten Klüfte wurde die Naturwerksteingewinnung ab dem Zeitraum 2004/2005 eingestellt. Verantwortlich für die sehr hohe Kluftdichte ist die tektonische Überprägung in den S' Teilen des Tak Batholithen. Beobachtungen im regionalen Umfeld der Lagerstätte MT-Orange2 belegen beispielsweise, dass das Abbaugelände relativ häufig von NE-SW-streichenden Störungen durchzogen wird (vgl. auch Abb. 6.8), die zu einer bruchhaften Überprägung des Lagerstättenpotentials geführt haben (Abb. 7.17b). Die Analyse der Trennflächenabstände in der Lagerstätte belegt in diesem Zusammenhang, dass bevorzugt Klüfte mit NE-SW-streichender Orientierung die geringsten Abstandsweiten aufweisen (Abb. 7.17a).

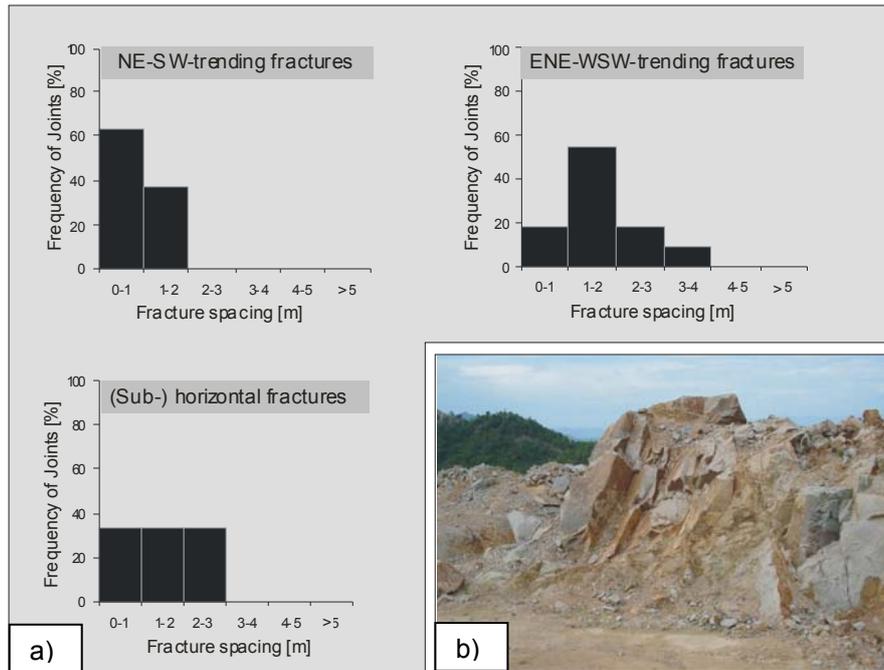


Abb. 7.17: Lagerstätte MT-Orange2. a) Prozentuale Abstandsverteilung der Trennflächen. Das Abbaugelände ist durch einen relativ hohen Prozentsatz engständiger bis sehr engständiger Klüfte gekennzeichnet, die einen Werksteinabbau in der Lagerstätte nicht mehr zulassen. b) Stark zerklüfteter Bereich in der Lagerstätte, der u.a. aus der tektonischen Überprägung des Abbaugeländes resultiert.

In anderen Lagerstätten spielt weniger die Abstandsverteilung, sondern vielmehr die spezifische Orientierung der Klüfte eine entscheidende Rolle für das Ausbringen großformatiger Rohblöcke. Besonders deutlich geht dies aus der Lagerstätte SN-Blue hervor, da hier trotz weiter Kluftabstände vergleichsweise niedrige Ertragszahlen erzielt werden (Abb. 7.15). Die Lagerstätte befindet sich in unmittelbarer Nähe zu einer NNE-SSW-streichenden Scherzone (vgl. Abb. 6.8), die sich auf die Granite des Abbaugeländes durchpaust und die Orientierung des Trennflächengefüges mit diktiert. Neben der NNE-SSW-Vorzugsrichtung treten ENE-WSW-streichende Trennflächen auf, wodurch das Trennflächensystem der Lagerstätte durch zwei Kluftscharen definiert ist, die sich im Winkel von etwa 55° kreuzen. Abbildung 7.18a skizziert schematisch die Ausbildung von Trennflächen in der Lagerstätte. Durch die räumliche Verteilung der Klüfte hat der Abbau unter erheblichen Konsequenzen zu leiden, da die ausgebrachten Rohblöcke deutlich von der Orthogonalität abweichen (Abb. 7.18b) und unter hohen Materialverlusten formatiert werden müssen (Abb. 7.18c). Dieser Umstand spiegelt sich auch in den Abmessungen der Blockware wider, die mit maximal 4.5 m^3 (vgl. Anhang III) im Vergleich zu anderen Lagerstätten sehr geringe Größen aufweist (Abb. 7.15).

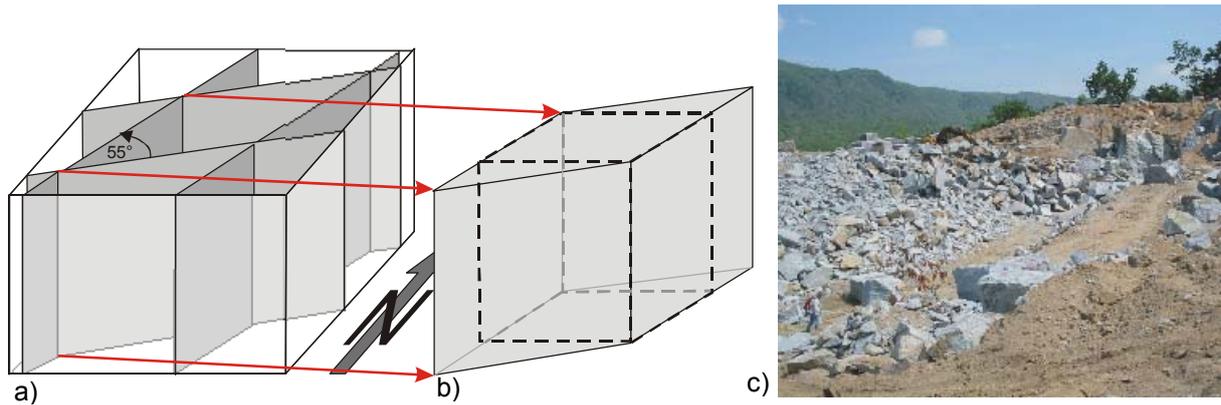


Abb. 7.18: Auswirkung der Trennflächenorientierung auf den Abbau in der Lagerstätte SN-Blue. a) Schematische Darstellung der Hauptkluftrichtungen im Festgestein. Beide Klufscharen (hier vereinfacht mit vertikalen Einfallswinkeln dargestellt) schneiden sich in einem Winkel von etwa 55°. Zur Orientierung des Trennflächengefüges siehe auch Abbildung 6.8. b) Die Trennflächen präparieren relativ spitzwinkelige Rohblöcke aus dem Gesteinsverband, die unter hohen Materialverlusten zu idealen Blockgeometrien (gestrichelte Linien) formatiert werden müssen. c) Abraummengen in der Lagerstätte als Resultat der Rohblockformatierung.

Lagerstätten für Carbonatgesteine sind wie die Lagerstätten für Magmatite durch eine Abstandsverteilung der Trennflächen gekennzeichnet, die relativ häufig auch weitständige bis sehr weitständige Klüfte beinhaltet. Als maximale Distanz zwischen den vertikalen Klüften wurden dabei Werte bis 14.8 m aufgenommen (Anhang IV). Das Trennflächengefüge der Carbonatgesteine lässt sich im Rahmen einer Bewertung wie bei den Magmatiten mit den Produktionszahlen der jeweiligen Lagerstätten korrelieren, da auch hier diejenigen Lagerstätten mit den weitesten Kluftabständen durch die höchsten Erträge gekennzeichnet sind (Abb. 7.19). Im Gegensatz zu den Magmatiten reichen die Ertragszahlen bei den Marmor-Lagerstätten jedoch bis 1000 m³ monatlich, so dass deutlich mehr Rohmaterial gefördert werden kann als etwa in den granitischen Lagerstätten.

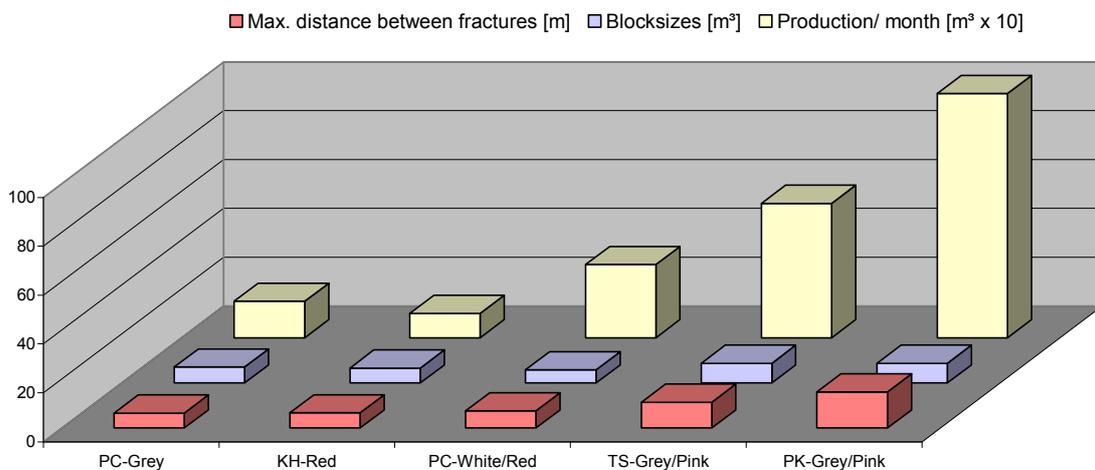


Abb. 7.19: Kluftabstände, Blockgrößen und monatliche Produktion für eine Auswahl von Lagerstätten mit Carbonatgesteinen.

Abbildung 7.20 fasst die wesentlichen Merkmale des Trennflächensystems derjenigen Lagerstätte zusammen, die sich durch die höchsten Ertragszahlen auszeichnet. Die Klüfte der Lagerstätte sind mehrheitlich NE-SW- bzw. NW-SE-streichend ausgebildet und zeigen dabei steile Einfallswinkel. Abgesehen von einer Minderheit steiler E-W- und NNE-SSW-streichender Klüfte sowie diagonal einfallender NW-SE-streichender Klüfte gibt die Orientierung ein sehr homogenes und relativ orthogonales Kluftmuster vor (vgl. Abb. 6.9). Sämtliche aufgenommenen NE-SW-streichenden Trennflächen befinden sich in einem Abstand von mehr als 5 m. Gleiches gilt für die wenigen, diagonal einfallenden Flächen, so dass diese sich nur untergeordnet auf die Rechtwinkeligkeit des Kluftnetzes auswirken.

In keiner der übrigen Lagerstätten für Carbonatgesteine wurden vergleichbar weite Distanzen zwischen den Klüften aufgenommen. Aus den Charakteristika des Abbaugebietes lässt sich ableiten, dass sich die Lagerstätte PK-Grey/Pink im Gegensatz zu den vorstehend angeführten Lagerstätten MT-Orange2 und SN-Blue sowohl durch eine sehr weitständige Abstandsverteilung als auch durch eine relativ orthogonale Raumstellung der Trennflächen zueinander auszeichnet. Die Lagerstätte vereint damit wesentliche Qualitätsmerkmale für den Werksteinabbau, die optimale Abbaukonditionen und hohe Ausbeute rechteckiger Rohblöcke erlauben.

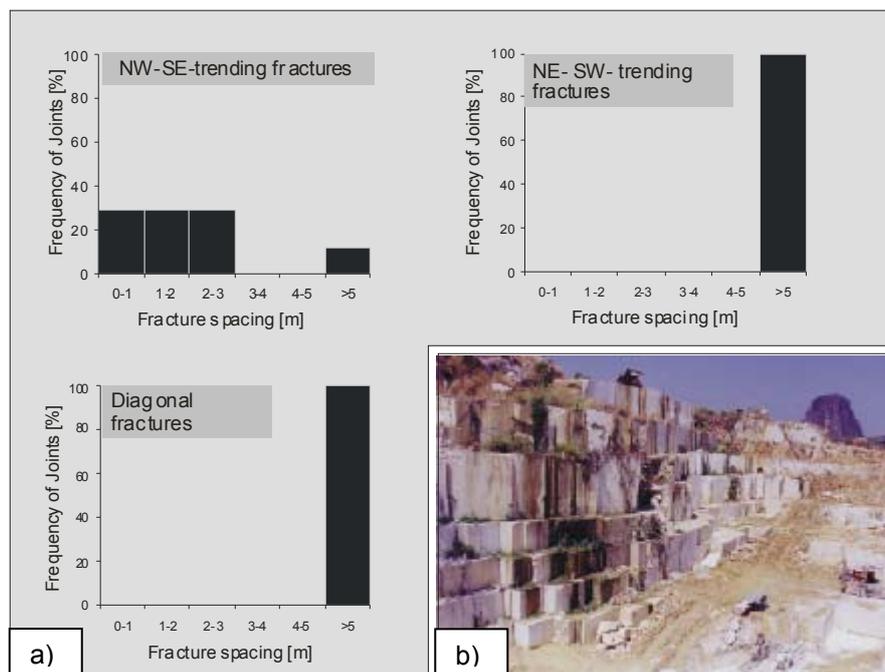


Abb. 7.20: Trennflächensystem in der Lagerstätte PK-Grey/Pink. a) Prozentuale Abstandsverteilung der Trennflächen, von denen insbesondere diejenigen mit NE-SW-streichender Orientierung sowie die diagonalen Klüfte sehr weitständig ausgebildet sind. b) Einblick in die Lagerstätte.

In den Sandstein-Lagerstätten zählen als limitierende Faktoren für die Blockgröße die Schichtmächtigkeiten sowie der Abstand vertikaler Trennflächen. Die weitesten Abstände für vertikale Trennflächen konnten mit 14,0 m in einer Lagerstätte mit gelben Sandsteinen aufgenommen werden (vgl. Anhang IV). Es handelt sich hierbei allerdings um einen Ausnahmewert, da die weitesten Trennflächenabstände in dieser Lithologie üblicherweise in

einem Bereich angesiedelt sind, der mit etwa 5 bis 6 m denen der weißen und braunen Sandsteine ähnlich ist (vgl. Anhang IV). Die roten Sandsteine sind mit 3.3 m durch die geringsten Maximalwerte für vertikale Diskontinuitäten gekennzeichnet. Ein vergleichbares Verteilungsmuster zeichnet sich auch bei den Schichtmächtigkeiten ab, da auch hier die maximalen Abstände von Lagerklüften bei roten Sandsteinen mit 1.5 m am geringsten ausgebildet sind. Der Maximalwert von 1.5 m repräsentiert dabei erneut einen Einzelwert, da die Lagerstätten roter Sandsteine im Allgemeinen durch dünnbankiges Material definiert sind. Bei Lagerstätten der Phra Wihan Formation schwanken die Maximalwerte in einem Bereich zwischen 1.6 m und 2.4 m. Die Ausbildung von Schichten in dieser Formation ist damit sehr massiv, so dass die Maximalwerte lediglich noch von den grünen Sandsteinen der Phu Krabung Formation überboten werden (vgl. Anhang IV).

Die Abstandsverteilung der Trennflächen zeigt damit einen Trend, der sich auch in den Nettoblockgrößen der Varietäten widerspiegelt. Bei einem Vergleich der Blockvolumina wird deutlich, dass in den Lagerstätten der weißen, braunen und grünen Sandsteine durchschnittlich größere Nettoblöcke ($>4.0 \text{ m}^3$) abgebaut werden können als in den Lagerstätten der gelben (2.3 m^3) und roten (2.0 m^3) Sandsteine (Tab. 7.6). Darüber hinaus sind auch Unterschiede in den einzelnen Blockmaßen festzustellen, die zwischen 1.0 m und 2.7 m variieren (Tab. 7.6). In diesem Zusammenhang kann festgehalten werden, dass die Lagerstätten der roten Sandsteine sowohl die geringste Blockmaße als auch die geringste durchschnittliche Blockgröße aufweisen. Da rote Sandsteine durch das dichteste Trennflächennetz gekennzeichnet sind, können in den Lagerstätten nur relativ kleine Rohblöcke mit geringen Kantenlängen und geringem Volumen abgebaut werden. Die durchschnittlich dünnbankige Schichtung erklärt in diesem Zusammenhang auch die Dominanz von Lagerstätten in dieser Formation, die sich auf den Abbau von Bodenplatten spezialisiert haben. Im Gegensatz dazu demonstrieren grüne Sandsteine eine sehr mächtige Schichtung und zusätzlich ein weitständiges vertikales Kluftsystem, was sich wiederum in dem maximalen Nettoblockvolumen von 4.8 m^3 für diese Varietät ausdrückt.

Tab. 7.6: Durchschnittliche Nettoblockgrößen und -volumina der Khorat Sandsteine. Die Ermittlung der Daten erfolgte unter Berücksichtigung bis zu 12 repräsentativer Einzelblöcke pro Lithologie. Die Höhe kennzeichnet dabei die Fläche gegen das sedimentäre Lager.

	S-White	S-Brown	S-Yellow	PC-Green	S-Red
Länge [m]	1.9	1.9	1.9	2.7	1.9
Breite [m]	1.5	1.3	1.0	1.2	1.0
Höhe [m]	1.6	1.7	1.2	1.5	1.1
Ø Blockgröße [m³]	4.7	4.1	2.3	4.8	2.0

Die Größe der thailändischen Sandsteinblöcke deckt sich im Wesentlichen mit den Blockgrößen, die Singewald (1992) für deutsche Sandsteinvorkommen, beispielsweise für den Schilfsandstein und für den Mainsandstein, angibt. Nicht zuletzt unter der

Berücksichtigung, dass es sich bei diesen Angaben um Bruttoblockgrößen handelt, erreicht die Mehrheit der thailändischen Sandsteine sogar deutlich höhere Werte für die Rohblockgröße (Tab. 7.7).

Tab. 7.7: Durchschnittliche Bruttoblockgrößen ausgewählter Sandstein-Lagerstätten in Deutschland (aus Singewald 1992)

Lithologie:	Obernkirchen-Sandstein	Mainsandstein		Schilfsandstein	Wesersandstein	
Lokation:	Obernkirchen	Eichenbühl	Remlingen	Hassberge	Arholzen	Eckberg
Blockgröße [m³]:	0.42	2.34	1.28	2.03	0.94	0.38

7.3 Ableitung von Lagerstättenmodellen und Strategien für deren Erkundung

Um die Vorkommen weiterhin lagerstätten-geologisch zu bewerten und Strategien für deren Erkundung zu erarbeiten, müssen die wesentlichen Charakteristika der Abbaugebiete, hier insbesondere die lagerstätten-kontrollierenden Elemente der Vorkommen, erkannt und zu Lagerstättenmodellen zusammengefasst werden.

Für die thailändischen Granitvorkommen lassen sich gemäß Kapitel 6.4 die folgenden Lagerstättenmodelle ableiten:

- a) Lagerstätten mit Feldspat-Alteration infolge Tektonik und hydrothermalen Beeinflussung,
- b) Lagerstätten im Kontaktbereich zu benachbarten Lithologien,
- c) Lagerstätten, die durch Änderungen im Gefüge des Abbauproduktes kontrolliert werden,
- d) Lagerstätten, die durch die Intrusion von Gängen kontrolliert werden,
- e) Lagerstätten mit subvulkanischer Genese und
- f) Lagerstätten mit abbautechnisch schwieriger Orientierung der Klüfte.

Für die Vorkommen von Carbonatgesteinen lassen sich ableiten:

- a) Lagerstätten mit Änderungen im Metamorphosegrad und
- b) Lagerstätten im Einflussbereich tektonischer Aktivitäten.

Für die thailändischen Sandsteinvorkommen ergeben sich:

- a) Lagerstätten, die durch differenzierte Farben kontrolliert werden,
- b) Lagerstätten im Einfluss von Tonhorizonten und Mangan-Ausfällungen,
- c) Lagerstätten mit eventuell unterschiedlichem Grad der Silifizierung.

Bevor nun die Lagerstättenmodelle und Strategien für deren Abbau vorgestellt werden, sollen zunächst die allgemeinen Grundzüge einer magmatischen, metamorphen und sedimentären Lagerstättenbildung sowie Methoden zur Exploration der Vorkommen kurz erörtert werden.

7.3.1 Grundzüge der Lagerstättenbildung und Explorationsmethoden

Die Bildung einer magmatischen Lagerstätte erfolgt, wenn Schmelze an Subduktionszonen oder Intraplattenbereiche gebunden in die Erdkruste eindringt, dort auskristallisiert und die auflagernden Gesteinspartien durch Abtragung im Laufe der Erdgeschichte freigelegt werden. Ist ein Vorkommen magmatischer Gesteine an der Erdoberfläche aufgeschlossen, steht es nach Erfüllung einer Reihe geologischer Auflagen, z.B. der Abstandsverteilung der Klufflächen (siehe Kap. 6.3) für den Abbau als Naturwerkstein zur Verfügung. Die laterale Ausbreitung an der Erdoberfläche sowie die Tiefe der magmatischen Gesteinskörper, die von entscheidender Bedeutung für die Erkundung der Lagerstätten sind, sind dabei abhängig von der Intrusionsform des Magmas. Zu den häufigsten Intrusionsformen zählen neben steilstehenden Gängen und flachliegenden Lagergängen (Abb. 7.21a) auch batholithische Intrusionen, die sich wie in der thailändischen Provinz Tak aus mehreren Plutonen zusammensetzen. Die Form der Plutone kann dabei ebenfalls unterschiedlich ausfallen (Abb. 7.21b, c). Im Allgemeinen kann beim Auftreten von Batholithen eine laterale und vertikale Ausdehnung von mehreren Kilometern angenommen werden. Die Ausmaße von Gängen variieren von Millimetern bis zu über einem Kilometer in der Breite und von Zentimetern bis über 100 km in der Länge. Ist also eine Lagerstätte mit der Größe von z.B. einigen hundert Metern in den zentralen Bereichen eines Batholithen erschlossen, sollte das Abbauprodukt in jeder Richtung und Tiefe auftreten (Primavori 1999) und die Lagerstätte somit dreidimensional erweiterbar sein.

Lagerstätten klastischer Sedimente wie beispielsweise Sandsteine gehen aus dem Transport und der Ablagerung des durch Verwitterung entstandenen klastischen Materials hervor. Nachdem das Verwitterungsmaterial in einem Liefergebiet flächenhaft abgetragen und den Flüssen zugeführt worden ist, wird es in die Sammelbecken der kontinentalen Senken und der Meere transportiert. Besonders groß ist die Menge des in Flusswasser suspendierten Materials, das fast immer das offene Meer erreicht, während die größeren klastischen Bestandteile meistens unterwegs längs der Flussläufe oder in Senken noch innerhalb des kontinentalen Bereichs zur Ablagerung kommen. Aufgrund der flächenhaften Ausbreitung des Materials während der Ablagerung sind Lagerstätten mit Sedimentgesteinen im Gegensatz zu Lagerstätten in den großvolumigen, quasi-dreidimensionalen Vorkommen von Graniten meist mit dem Problem konfrontiert, dass das Abbauprodukt im Hangenden und Liegenden durch benachbarte, nicht-bauwürdige Einheiten begrenzt ist. Um den schichtgebundenen Abbau sedimentärer Gesteine nicht in den Einflussbereich qualitativ geringwertiger Einheiten zu führen, ist eine Erweiterung der Lagerstätten lediglich lateral in zwei Dimensionen möglich.

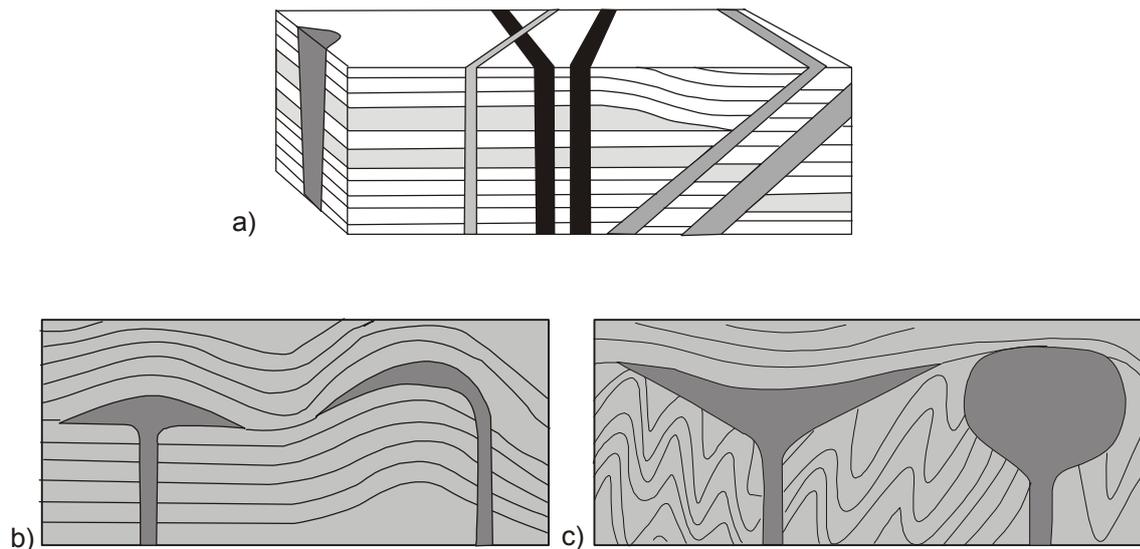


Abb. 7.21: Grundzüge der Lagerstättenbildung für magmatische Gesteine (nach Wimmenauer 1985). a) Verschiedene Formen magmatischer Gänge. b) Formen plutonischer Intrusivkörper: Lakkolith (links) und Phakolith (rechts). c) Formen plutonischer Intrusivkörper: Lopolith (links) und Stock (rechts).

Entgegen der zuvor genannten Modelle, nach denen beispielsweise granitische Abbaugelände in größeren Batholithen 3-dimensional und sedimentäre Abbaugelände 2-dimensional erweitert werden können, zeigen die in den folgenden Kapiteln vorgestellten Lagerstättenmodelle, dass nicht alle Lagerstätten diesem Grundsatz nachkommen und jedes Vorkommen individuelle Charakteristika zeigt, die den Ausbau der Lagerstätten begrenzen können.

Einige der im Folgenden vorgestellten Modelle beinhalten Ansatzpunkte für die Exploration weiterer Vorkommen auf der Grundlage geophysikalischer Messmethoden. Der Einsatz geophysikalischer Messmethoden kommt bei der modernen Erkundung von Naturwerksteinen im Allgemeinen nur in sehr begrenztem Umfang zur Anwendung. Dies ergibt sich im Wesentlichen daraus, dass die Abbauprodukte vornehmlich an der Erdoberfläche anstehen und dort im Tagebau, der selten eine Tiefe von 100 m überschreitet, gewonnen werden. Die Erkundungshorizonte befinden sich dadurch automatisch im Einflussbereich der Verwitterung, welche zu scheinbaren lithologischen Veränderungen führt und damit äußerst schwer zu interpretierende Datensätze hervorbringt.

Die Methoden der geophysikalischen Exploration (Tab. 7.8) gehen im Grunde auf ein einheitliches Prinzip zurück, bei dem Energie in Form von beispielsweise Elektrizität, Schallwellen oder Radarwellen durch einen Impulsgeber ausgesendet und von einem Empfänger aufgezeichnet wird. Die Daten, die sich aus den jeweiligen Messungen ableiten lassen, resultieren in erster Linie aus Veränderungen der Untergrundstrukturen, die sich aus unterschiedlichen Mineralogien oder Feuchtegehalten sowie aus verschiedenen Arten von Diskontinuitäten ableiten lassen. Die gesteintechnischen Eigenschaften, die in diesem Zusammenhang eine bedeutende Rolle spielen, sind im Wesentlichen die Dichte, die Elastizität, die Magnetik und die Elektrizität.

Tab. 7.8: Auswahl geophysikalischer Erkundungsmethoden (aus Keary & Brooks 1991).

Methoden	Gemessene Parameter	„Wirksame“ physikalische Eigenschaften
Seismik	Laufzeiten der reflektierten/ gebrochenen seismischen Wellen	Dichte und elastischer E-Modul (Faktoren für die Geschwindigkeit seismischer Wellen)
Gravimetrie	Regionale Abweichungen in der Intensität des Gravitationsfelds der Erde	Dichte
Magnetik	Regionale Abweichungen in der Intensität des geomagnetischen Felds der Erde	Magnetische Suszeptibilität und Remanenz
Elektrik: spezifischer Widerstand	Erdwiderstand	Elektrische Leitfähigkeit

7.3.2 Lagerstättenmodelle für thailändische Granitoide

7.3.2.1 Feldspat-Alteration infolge Tektonik und hydrothermalen Beeinflussung

Feldspat-Alterationen treten in allen Lagerstätten des Tak Batholithen mit Ausnahme der beiden nördlichsten Abbaugebiete SN-Blue und BT-Violet auf und beeinflussen im Wesentlichen das Dekor der Abbauprodukte durch einen Wechsel der Feldspatfarbe von grau zu orange. Das Ausmaß dieser Verfärbungen reicht von lokalen Änderungen im Zentimeterbereich bis zu einer flächenhaften Farbausprägung, die ganze Lagerstättenbereiche und damit den Grundton individueller Varietäten definiert. Die Alteration von Feldspat ist am deutlichsten in den Abbaugebieten im südlichen Teil des Batholithen zu erkennen (MT-Orange1, MT-Orange2), wo die Erscheinungen als Ursache für das differenzierte Auftreten der intensiv und schwach orange gefärbten Graniten angenommen werden darf.

Die Alteration der Feldspatphase ist mit dem Auftreten von Epidot und Chlorit assoziiert. Diese Sekundärminerale sind vorzugsweise als millimeterbreite, linear verlaufende Adern in den ansonsten massiven Gesteinen ausgebildet und können bei einer Öffnung dieser Adern freigelegte Klüfte großflächig tapezieren. Der Zusammenhang zwischen der Feldspat-Alteration und der Ausbildung von Epidot-Chlorit-Adern ergibt sich aus der Beobachtung, dass die orange Farbe der Granite in der näheren Umgebung von Epidot-Adern sehr intensiv ausgebildet ist (Abb. 7.22a, b) und mit zunehmender Entfernung der Sekundärminerale abnimmt. Vereinzelt ist dabei eine graduelle Reduktion der Farbintensität zu beobachten. In der Lagerstätte MT-Orange1, in der mehrheitlich Granite mit schwach oranger Grundfarbe gewonnen werden, ist das Material in der Nähe von Klüftflächen und Störungsflächen durch derart kräftig orange Farbtöne definiert, dass es vollkommen identisch ist mit dem benachbarten Vorkommen intensiv oranger Granite der Lagerstätte MT-Orange2.

Der Grad der Feldspat-Alteration scheint in Relation damit zu stehen, welches der beiden Minerale (Chlorit oder Epidot) als Ader auftritt. Während die schwach gefärbten orangen Gesteine vornehmlich durch Epidot- und weniger durch Chlorit-Adern gekennzeichnet sind, ist bei intensiv orange gefärbten Graniten ein umgekehrtes Verhältnis zu beobachten. Dabei

kann ein massives, überdurchschnittlich konzentriertes Auftreten von Chlorit-Adern eine noch stärkere Alteration als bei Epidot-Mineralisationen hervorrufen, die sich in kräftig roten bis bordeaux-farbenen Feldspattönen ausdrückt. In gleicher Weise, in welcher die Alterationserscheinungen bei orangen Feldspäten mit zunehmender Entfernung von Epidot-Adern abnehmen, lässt sich eine Abminderung der Farbintensität bei rötlichen Feldspäten mit zunehmender Entfernung von Chlorit-Mineralisationen feststellen.

Das Auftreten von Epidot und Chlorit im Gesteinsverband und die damit verbundene Alteration des Mineralbestandes ist eventuell auf infiltrierende Lösungen zurückzuführen, die angereichert mit Calcium und Eisen in das Gestein eindringen konnten. Bei Übersättigung der Lösungen wurden anschließend Epidot und Chlorit in offenen Rissystemen ausgeschieden, während Eisenverbindungen weiter in das Gestein migrierten und dort die Feldspatkomponenten mit Hämatit überziehen konnten.

Bei der oberflächennahen Position der Lagerstätten innerhalb tropischer Klimate und dem Auftreten von Alterationsphänomenen entlang von Klüften liegt die Vermutung nahe, dass es sich bei den eindringenden Lösungen um supergene Fluide handelt, die zur Modifikation der Feldspatphase geführt haben. Dennoch ist es ungewiss, ob die spezifische Farbe der Feldspäte mit oberflächennahen Prozessen in Verbindung gebracht werden kann, da es keine Indikatoren für eine Verwitterung des Abbauproduktes gibt und der Mineralbestand mit Ausnahme weniger alterierter Biotite in vollkommen frischem Zustand vorliegt. Sollte dennoch eine Beziehung zwischen der Feldspat-Farbe und oberflächennaher Verwitterung bestehen, müsste dies bei einem Ausbau der Lagerstätten berücksichtigt werden. In diesem Zusammenhang wäre eine Fortsetzung der orangen Farbe in tieferen Stockwerken fragwürdig.

Im südlichen Teil des Batholithen werden ENE-WSW- und WNW-ESE-streichende Störungen durch ein Netzwerk von hellgrünen Epidot- und dunkelgrünen Chlorit-Adern begleitet, die parallel zur Streichrichtung der tektonischen Bruchflächen ausgebildet sind und sich bis zu 50 cm in das Rahmengestein ausbreiten können. Das vernetzte Auftreten von Chlorit-Bahnen entlang von Bewegungszonen deutet damit auf kinematische Ereignisse als Ursache der Sekundärmineralisationen hin. Einerseits wäre es möglich, dass tektonisch induzierte Spannungen nach der Kristallisation der Schmelze auf bereits existierende Adern eingewirkt und vereinzelt zur Öffnung der Diskontinuitäten geführt haben. Somit wäre ein spät magmatisches Stadium als Zeitpunkt der Epidot-Chlorit-Mineralbildung anzunehmen. Andererseits könnten syn- bis post-tektonische hydrothermale Aktivitäten zu der Fluidzirkulation geführt haben. Diese Szenario würde beinhalten, dass Epidot- und Chlorit-Adern nicht oder nur geringfügig durch tektonische Überprägungen beeinflusst worden sind, da es zu Bewegungen und zum Versatz der Gesteinspakete bereits vor der Injektion von Lösungen gekommen ist. Als Konsequenz könnten Rissysteme durch die post-tektonische Zufuhr von Fluiden derart fest geschlossen und versiegelt worden sein, dass sie keine potentiellen Schwachstellen für die Produktion mehr darstellen. Die temporäre Abfolge beider Prozesse stellt damit also ein Kriterium für den Zusammenhalt der Adern und die Stabilität des Materials während der Weiterverarbeitung dar.

Die Alteration von Feldspäten nimmt innerhalb des Batholithen von S nach N hin ab. Dabei scheinen sich die Phänomene relativ deutlich innerhalb des N' Tak Plutons zu reduzieren, da die Orangefärbungen von Gesteinen im Western Pluton und im Mae Salit

Pluton nicht mehr flächenhaft, sondern lediglich in Form zentimeterbreiter, oranger bis fleisch-farbener Säume zu beiden Seiten einer Epidot-Ader auftreten. Chlorit-Adern treten außerhalb des Tak Plutons gar nicht mehr in Erscheinung. Der Einfluss der Elemente auf die Abbausituation ist in den zentralen und nördlichen Bereichen des Batholithen erheblich kleiner als im südlichen Teil, da die Epidot-Mineralisationen bei den Varietäten BT-Blue, BN-Pink und BT-White sowie bei dunklen Monzodioriten BT-Black lediglich noch zu einer Beeinträchtigung des Dekors in Form feiner, grüner Lineare führt.

Für die Granite MT-Orange1 und MT-Orange2 lässt sich zusammenfassen, dass die Dekor Anforderungen an tektonische und hydrothermale Überprägungen gebunden sind. Durch die Bindung des Vorkommens an Störungen wird die Gewinnung der Werksteine jedoch auch durch engständig geklüftete Partien diktiert, die für erhebliche Mengen an Abraum verantwortlich sind (Abb. 7.22c, d). In der Lagerstätte MT-Orange1 ziehen sich Störungen mit flachen Einfallswinkeln durch die mittleren Abschnitte des Abbauberges. Aufgrund einer sehr hohen Kluftdichte in der oberen Hälfte des Berges, die aus der tektonischen Überprägung der Gesteine abzuleiten ist, muss der gesamte Top-Bereich der Lagerstätte als Abraum gewertet werden.

Die Partien im Hangenden der Bewegungsbahnen stellen in diesem Fall nicht nur wertloses Material in Bezug auf den Werksteinabbau dar, sondern beeinträchtigen darüber hinaus noch den Abbau unterhalb der Störung, da das Lösen von Blöcken am Fuß des Berges die überlagernden Sequenzen destabilisiert. Die Sicherheitsrisiken, die sich durch das Abgleiten großer Gesteinspakete von der oberen Berghälfte ergeben, sind enorm und führen zu umfangreichen Einschränkungen der Produktion am Bergfuß. Eine kontrollierte Beseitigung der Abraum mengen wäre mit hohem technischen Aufwand verbunden und vor dem Hintergrund der Unzugänglichkeit dieser Bergpartien nur schwer zu realisieren.

Darüber hinaus führen der tektonische Einfluss und die Infiltration von Lösungen zu einer deutlichen Einschränkung hinsichtlich der Lagerstättenerweiterung. Eine weiträumige laterale Ausdehnung beider Lagerstätten MT-Orange1 und MT-Orange2 scheint nicht möglich zu sein, da sich die Produktion ausschließlich auf den Einflussbereich von Störungszonen in isolierten Bergkegeln konzentriert.

Um innerhalb des Tak Batholithen Lagerstätten mit ähnlichem Material, aber vorteilhafteren Abbaubedingungen zu erkunden, könnten bei der Exploration sowohl morphologische als auch struktureologische Aspekte berücksichtigt werden. Die derzeitige Abbauregion ist durch eine Vielzahl an Kegelbergen charakterisiert, die weitere Vorkommen quarzreicher oranger Granite repräsentieren dürften. Zusammen mit der Tatsache, dass massive Feldspat-Alterationen in nördliche Richtungen immer seltener werden und schließlich gar nicht mehr vorkommen, würde sich das Erkundungsgebiet für orange Granite auf einzelne morphologische Erhebungen im südlichen Teil des Batholithen eingrenzen lassen.

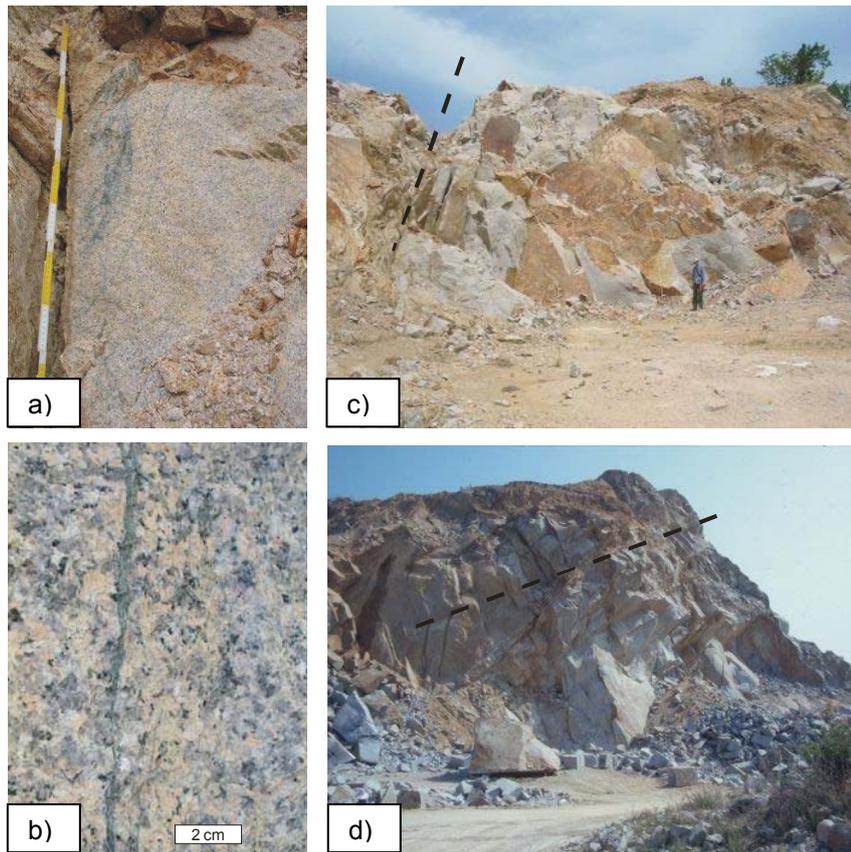


Abb. 7.22: Auftreten von Epidot- und Chlorit-Adern im S' Teil des Tak Batholithen. a) Netzartig arrangierte Adern parallel zum Streichen tektonischer Klüfte in der Lagerstätte MT-Orange2. b) Intensive Verfärbung der Feldspäte entlang einer Epidot-Ader in der Lagerstätte MT-Orange1. c) Steil einfallende Störungszone (gestrichelte Linie) begleitet von erheblichen Abraummengen, Lagerstätte MT-Orange2. d) Relativ flach einfallende, ENE-WSW-streichende Störung in den mittleren Partien der Lagerstätte MT-Orange1. Durch die intensive Tektonik ergeben sich auch hier hohe Abraummengen.

7.3.2.2 Kontakte einzelner Vorkommen zu benachbarten Lithologien

Ein weiteres Lagerstättenmodell ergibt sich aus der Kontaktbeziehung einzelner Lithologien zum Nebengestein. Dieser Faktor kommt insbesondere im W' Bereich der NNE-SSW-streichenden Bergkette innerhalb des Tak Batholithen zum Tragen, in dem auf relativ begrenztem Raum drei deutlich unterschiedliche Varietäten aufgeschlossen sind (BT-Black, BT-Blue, BT-White).

In den Monzodioriten der Lagerstätte BT-Black ist relativ häufig das Auftreten isolierter, leukokrater Partien zu beobachten, die mit unregelmäßigen Formen, überwiegend jedoch als gestreckte Linsen ausgebildet sind (Abb. 7.23). Die Formen ähneln dabei sehr den Vorkommen bläulicher Granite bzw. weißer Granite, die in der unmittelbaren Nachbarschaft abgebaut werden. Die hellen Anteile in dem sonst dunklen Gestein besitzen Ausmaße von mehreren Dezimetern bis Metern und treten besonders konzentriert im Schnittpunkt von zwei flach einfallenden Störungszonen auf, welche die Lagerstätte BT-Black mit NW-SE- und ENE-WSW-streichender Orientierung durchziehen. Die Abbausituation innerhalb des Vorkommens wird immer wieder durch das Auftreten dieser Körper beeinflusst, so dass die

Elemente hinsichtlich der Ableitung eines Lagerstättenmodells in ihrer drei-dimensionalen Geometrie und ihrer Verteilung im Rahmengestein näher klassifiziert werden müssen.

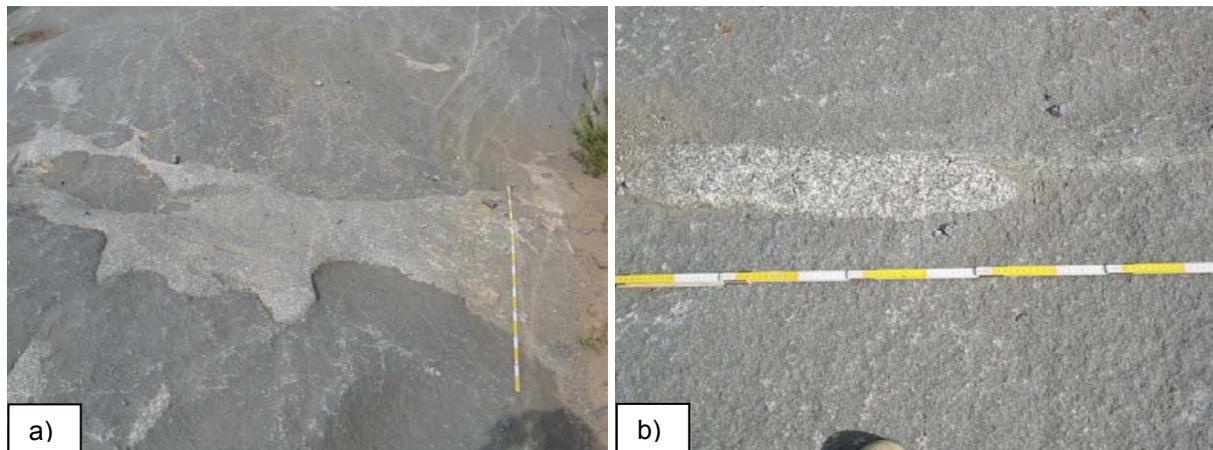


Abb. 7.23: Auftreten leukokrater Partien in der Lagerstätte BT-Black mit relativ unregelmäßiger Verteilung (a) sowie in Form linsenartiger Einschlüsse (b).

Einerseits könnte es sich bei hellen Partien um jüngere horizontale Intrusionen eines Leukogranits handeln, die rezent nur noch als „lakkolith-artige“ Überreste aufgeschlossen sind (Abb. 7.24a). In diesem Fall könnte sich der Abbau schwarzer Monzodiorite gezielt an dem Auftreten dieser Lagergänge orientieren, da schwarze Diorite im Liegenden des Leukogranits erwartet werden könnten. Um bei diesem Modell eine optimale Sicherheit im Abbau zu gewährleisten, sollten an verschiedenen Stellen des Vorkommens Bohrungen abgeteuft werden, welche die Ausbildung des Monzodiorits in größeren Tiefen bestätigen.

Andererseits geben die linsenförmige Ausbildung und die Einregelung mafischer Minerale des Monzodiorits in den Kontaktbereichen zu dem Leukogranit Hinweise darauf, dass es sich bei den hellen Partien um scheibenförmige Xenolithe eines älteren Granits handelt, die von dem schwarzen Monzodiorit inkorporiert wurden (Abb. 7.24b). In einigen Fällen kann in den Kontaktbereichen des Leukogranits eine Abmagerung mafischer Minerale erkannt werden. Da an denselben Kontakten eine sehr dichte Akkumulation mafischer Minerale innerhalb des Monzodiorits identifiziert werden kann, wäre eine Migration der Mineralphasen aus einem Granit im sub-solidus Zustand hin zu einem liquid-magmatischen Monzodiorit möglich.

Im Falle einer relativ jungen Intrusion des Monzodiorits und der Aufnahme granitischer Schollen in das monzodioritische Magma müsste der Abbau aufgrund der wohl sehr unregelmäßigen Verteilung von Xenolithen individuell und kurzfristig geplant werden. Grundsätzlich ließe sich bei diesem Modell der Abbau schwarzer Monzodiorite bis in größere Tiefen führen, wobei lediglich eine Zunahme leukokrater Anteile in Richtung der benachbarten Granit-Lagerstätten prognostiziert werden kann.

Ein weiteres Modell ergibt sich aus der Kontaktbeziehung schwarzer Monzodiorite zu den blau-grauen Graniten, die in der benachbarten Lagerstätte BT-Blue aufgeschlossen sind. Bei diesem Modell muss ebenfalls von einem jüngeren Alter des Monzodiorits, jedoch von einer anderen Geometrie der Lagerstätte BT-Black ausgegangen werden (Abb. 7.24c). In der

Lagerstätte BT-Blue ist deutlich dokumentiert, dass schwarze Monzodiorite den blau-grauen Granit überlagern. Das Auftreten eines mächtigen E-W-streichenden mafischen Ganges, der den Granit durchschlägt, liefert dabei Anhaltspunkte für eine Interpretation, nach der es sich bei dem dioritischen Vorkommen um eine lakolithische Intrusion handelt, die gangförmig aufgestiegen ist und sich lateral vermutlich entlang von Diskontinuitäten über den blau-grauen Graniten ausbreiten konnte (Abb. 7.25). Entlang der horizontalen Kontakte zwischen dem Diorit und dem Granit ist so genanntes „Slumping“ entwickelt, bei dem offensichtlich monzodioritische Anteile aufgrund der spezifisch höheren Dichte in den randlich aufgeschmolzenen Granit eingesunken sind. Der Aufschluss in der Lagerstätte BT-Blue befindet sich nur wenige Meter unterhalb des Höhenniveaus der Lagerstätte BT-Black, so dass für das dioritische Vorkommen eine entsprechend geringe Mächtigkeit abgeleitet werden kann.

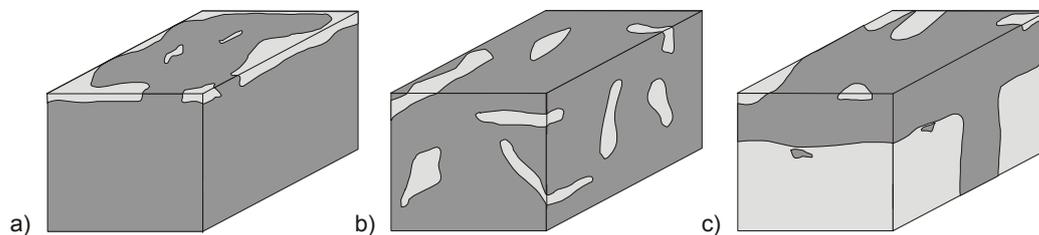


Abb. 7.24: Verschiedene Modelle für die Lagerstätte BT-Black. a) Ausbildung dunkler Monzodiorite im Liegenden eines horizontal liegenden Leukogranits. b) Monzodiorit mit Xenolithen des Leukogranits aufgrund einer relativ jüngeren Intrusion des Monzodiorits. c) Lakolithische Intrusion des Monzodiorits. Der wesentliche Teil des Vorkommens ist in diesem Fall zur Tiefe hin begrenzt.

Zusätzlich bedeutet dies, dass mit fortschreitendem Abbau zur Tiefe hin deutlich mehr leukokrate Einschaltungen erwartet werden müssen. Tatsächlich konnten bei einem Vergleich der Fertigprodukte des Jahres 2003 mit denen des Jahres 2005 deutlich mehr leukokrate Einschlüsse dokumentiert werden. Die Lagerungsverhältnisse bestätigen sich darüber hinaus auch anhand von Kernbohrungen im Auftrag früherer Bruchegner, die das Auftreten heller Granite in tieferen Stockwerken der Lagerstätte nachweisen konnten. Abweichend von der Vorstellung, dass magmatische Lagerstätten quasi drei-dimensional erweitert werden können, ergibt sich für die Lagerstätte BT-Black die Geometrie einer Schichtlagerstätte, in der das Abbauprodukt zur Tiefe hin begrenzt ist. Da es sich in diesem Fall um die bereits auf dem Markt etablierten grau-blauen Granite handelt, auf die der Abbau mit zunehmender Tiefe stößt, ließe sich die Produktion von Naturwerksteinen in der Lagerstätte dennoch fortsetzen.

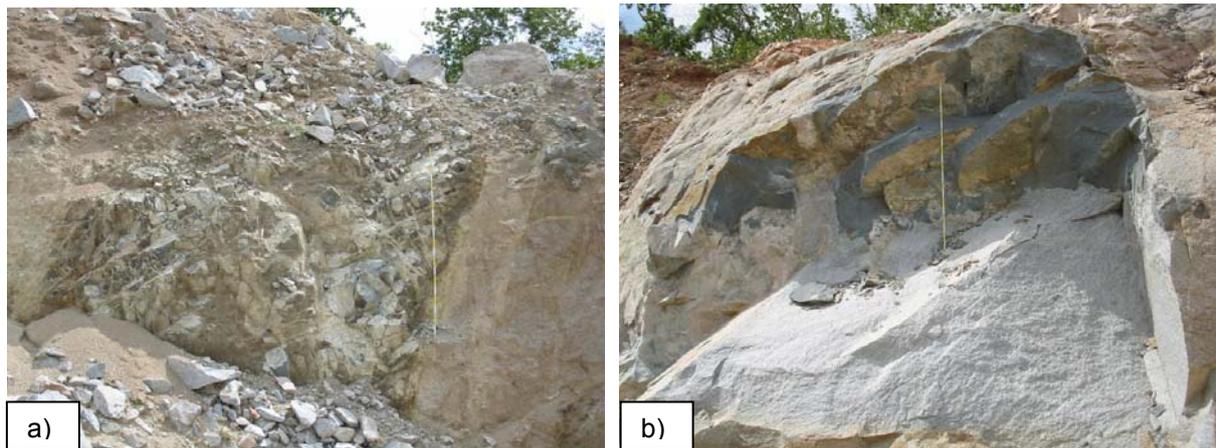


Abb. 7.25: Auftreten des Monzoniorits in der Lagerstätte BT-Blue. a) Gangförmige Intrusion. b) Ausbildung des Monzoniorits im Hangenden des Granits BT-Blue. Maßstab jeweils 2 m.

7.3.2.3 Änderungen im Gefüge

Während sich die Abbausituation in dem vorherigen Beispiel über die Beziehung individueller, deutlich voneinander abgegrenzter Natursteinvarietäten definiert, wird der Abbau weißer Granite in der benachbarten Lagerstätte BT-White durch eine Sub-Varietät erschwert, die sich wesentlich subtiler von dem eigentlichen Abbauprodukt unterscheidet. Die Produktion in der Lagerstätte BT-White konzentriert sich auf weiße, fein- bis mittelkörnige Granite mit heller Feldspatfarbe. Neben dieser Variante treten untergeordnet aber auch Granite auf, die im Vergleich zu dem Abbauprodukt ein deutlich gröberes Korngefüge aufweisen (Abb. 7.26). Die Korngröße dieser Sub-Varietät bleibt weitestgehend konstant, doch weisen die Feldspäte auffällige Veränderungen in der Farbe auf, die zu violetten Grundtönen tendieren. Diese Variante diktiert den Abbau der feinkörnigen weißen Granite durch eine sehr heterogene und unkontrollierte Verteilung innerhalb der Lagerstätte. Diese Art der Verteilung behindert maßgeblich einen zielorientierten Abbau, da eine Prognose zum Auftreten grobkörniger Gesteine und damit eine Abgrenzung der beiden Varietäten nicht eindeutig erfolgen kann.

Im Vergleich zu den vorherigen Beispielen aus der Lagerstätte BT-Black ergeben sich wesentlich komplexere Lagerungsverhältnisse, zu denen auch Kernbohrungen wegen der unregelmäßigen Verbreitung der Sub-Varietät keine eindeutigen Aussagen liefern könnten. Ein weiterer Unterschied ergibt sich durch die relativ geringe Häufigkeit der grobkörnigeren Partien, die zwar ausreicht, um die Gewinnung des Hauptproduktes zu beeinträchtigen, jedoch keinen kommerziellen Abbau der grobkörnigen Sub-Varietät als Naturwerkstein erlaubt.

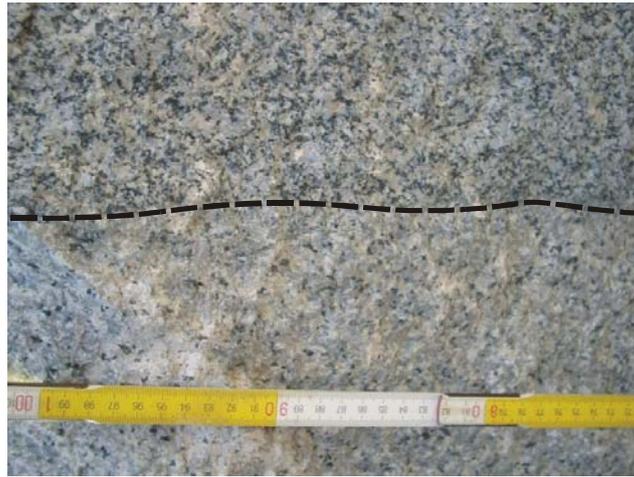


Abb. 7.26: Grobkörnige Partien mit relativ geringem Anteil mafischer Minerale (unterhalb der gestrichelten Linie) und feinkörniges Abbauprodukt mit relativ hohem Anteil mafischer Minerale (oberhalb der gestrichelten Linie).

Für den Abbau weißer Granite und die Exploration weiterer Lagerstätten ist eine Klärung der Beziehung zwischen beiden Gesteinstypen unerlässlich. Dazu gehört auch die Klärung, ob es sich bei den beiden Gesteinstypen der Lagerstätte lediglich um Edukte und Produkte einer partiellen Aufschmelzung handelt. Sollte es sich bei den weißen feinkörnigen Graniten nämlich um ein Aufschmelzungsprodukt der grobkörnigeren Gesteine handeln, muss ein genetischer Zusammenhang zwischen beiden Einheiten bestehen. Ein genetischer Zusammenhang würde implizieren, dass feinkörnige weiße Granite lediglich in Verbindung mit mittelkörnigen, quarzreichen und mafitarmen Graniten auftreten. Eine teilweise Aufschmelzung der grobkörnigen Gesteine würde darüber hinaus bedeuten, dass die Vorkommen an weißen feinkörnigen Graniten durchaus sehr begrenzt sein können. Kontaktbeziehungen zwischen feinkörnigem und grobkörnigem Material geben jedoch Grund zu der Annahme, dass es sich bei den feinkörnigen Partien um jüngere Schmelze handelt, die in grobkörniges Material eingedrungen ist. An vielen Stellen innerhalb der Lagerstätte kann beobachtet werden, dass grobkörnigere Gesteine blasenartig als Xenolithe in feinkörnigen Gesteinen eingeschlossen sind. Darüber hinaus ist das relativ jüngere Alter der feinkörnigen Granite anhand quarzitischer Gänge in den grobkörnigen Partien belegt, die abrupt am Kontakt zu feinkörnigen Gesteinen enden. Bei den feinkörnigen weißen Graniten scheint es sich daher um eine eigenständige Intrusion zu handeln. Das Auftreten von Xenolithen lässt dabei die Folgerung zu, dass die Lagerstätte BT-White im Randbereich dieser Intrusion liegt. Möglicherweise sind daher feinkörnige weiße Granite in anderen Gebieten des Batholithen weniger stark durch granitische Xenolithe beeinflusst, so dass sich anderenorts, etwa in den zentraleren Bereichen der Intrusion, vorteilhaftere Abbaubedingungen ergeben könnten.

Trotz der teilweise dicht aufeinander folgenden Lithologien kann bei der Produktion eine eindeutige Aushaltung der Sorten erfolgen, da der Kontakt zwischen feinkörnigen und grobkörnigen Einheiten scharf ausgebildet und in den meisten Fällen durch mafische Schlieren abgegrenzt ist. Lithologische Veränderungen, die von entscheidender Bedeutung für die Blockproduktion in dieser Lagerstätte sind, können daher kurzfristig erkannt und vermieden werden.

7.3.2.4 Intrusion von Gängen

Das Auftreten von Gängen ist ein weiteres Element, das eine Lagerstätte für Naturwerksteine kontrollieren kann. Ein signifikanter Einfluss von Gängen ergibt sich bei den untersuchten thailändischen Vorkommen für den Granit der Lagerstätte BT-Violet (vgl. auch Abb. 7.16). Der Abbau des Gesteins wird in ESE' Richtungen senkrecht zum Streichen eines Boulders geführt, der durch ein sehr weitständiges Kluftsystem gekennzeichnet ist und nach SE hin abflacht. Trotz der soweit günstigen geologischen Konditionen sieht sich die Gewinnung der Granite mit erheblichen Schwierigkeiten konfrontiert, da die annähernd NE-SW-streichende Orientierung des Boulders auf die Intrusion eines quarzitisches Ganges mit mehreren Metern Mächtigkeit zurückzuführen ist, der mit diagonalem Einfallswinkel nach SE, also in Richtung des fortschreitenden Abbaus hin abtaucht. Die Orientierung des Ganges parallel zum Boulderrücken und der Lagerstättenwand hat erhebliche Konsequenzen zur Folge, da der Granitabbau nicht an einer einzelnen Stelle, sondern über den gesamten Lagerstättenbereich hinweg beeinflusst wird.

Für eine Ausdehnung des Abbaus in ESE' Richtungen sind sowohl die Neigung des Ganges als auch die Topographie des Abbaugebietes von entscheidender Bedeutung. Bei gleich bleibendem Relief in SE' Richtungen und einer annähernd horizontalen Lagerung des Ganges wären nur geringe Einflüsse auf die Abbausituation zu erwarten, da hier die Quarzite als Deckschicht abgetragen und der Abbau der Granite wie gehabt fortgesetzt werden könnte. Ähnlich wäre der Einfluss saiger stehender Gänge auf die Abbausituation zu bewerten. Die Granitproduktion könnte bereits nach einer einmaligen Räumung der Quarzite von der Abbauwand weitergeführt werden, ohne dass eine weitere Beeinträchtigung durch den Gang in SE' Richtungen zu erwarten wäre (Abb. 7.27a).

Die geologischen und topographischen Rahmenbedingungen der Lagerstätte BT-Violet erfüllen diese Kriterien jedoch nicht, so dass sich unter Beibehaltung der Abbaurichtung und des Aufschlussniveaus massive Behinderungen und Abraumengen ergeben würden (Abb. 7.27b). Da die Morphologie des Boulders zusätzlich noch nach SE hin abflacht, erscheint ein Boulderabbau in dem Umfang wie er bislang durchgeführt wurde nicht mehr rentabel. Darüber hinaus müssen aufgrund zahlreicher quarzitischer Lesesteine SE' des Abbaugebietes weitere Gangintrusionen in dieser Richtung angenommen werden. Eine mögliche Konsequenz für die Abbauführung wäre die Erweiterung der Lagerstätte in die Tiefe, um auf diese Weise außerhalb des Einflussbereichs des Quarzits zu operieren.

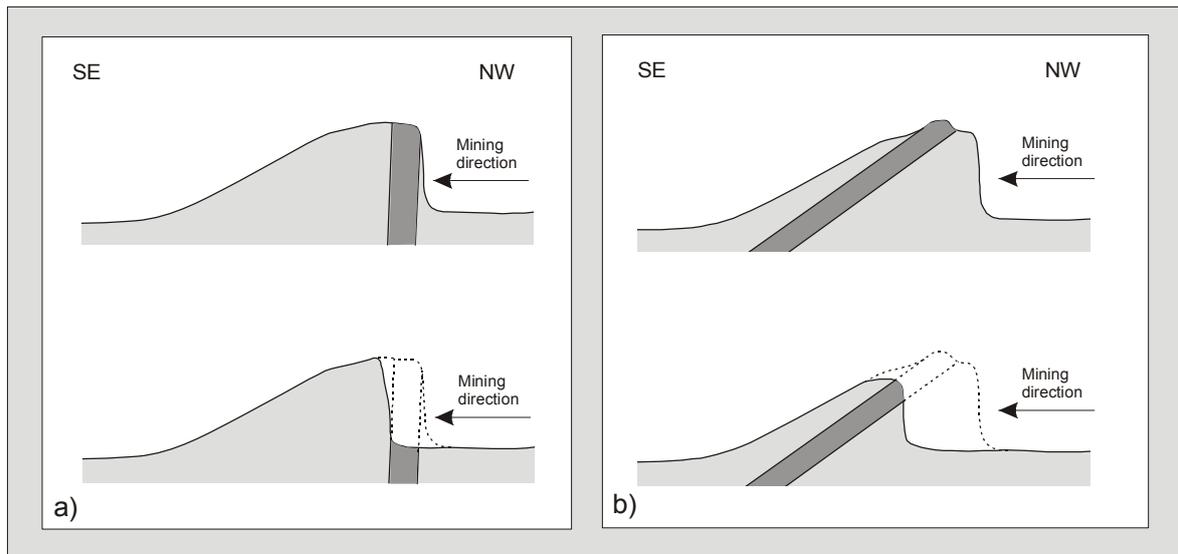


Abb. 7.27: Abbausituationen in Abhängigkeit der Einfallswinkel von Gängen, Störungen, etc. a) Steil einfallende Elemente. Oben: Ausgangssituation des Abbaus. Unten: Situation nach fortgeschrittenem Abbau. Das störende Element ist nach relativ kurzer Distanz überwunden, so dass sich der Abbau auf einen unbeeinflussten Körper konzentrieren kann. b) Relativ flach einfallende Elemente wie der Quarzgang in der Lagerstätte BT-Violet. Oben: Ausgangssituation des Abbaus. Unten: Situation nach fortgeschrittenem Abbau. Der größte Teil der Lagerstätte wird in diesem Fall durch die unerwünschte Gangintrusion dominiert.

Die Menge an wirtschaftlich abbaubarem Material sollte sich durch die Verlagerung der Lagerstätte in die Tiefe nicht ändern. Im Gegenteil: Wenn große Boulder mit weitständiger Klüftung an der Erdoberfläche aufgeschlossen sind, kann meist von vorteilhaften Abbaubedingungen in tieferen Stockwerken ausgegangen werden (Primavori 1999). Abbildung 7.28 demonstriert, wie günstig sich beispielsweise die Abstände der horizontalen Klüfte in einem Granitvorkommen mit zunehmender Tiefenlage ändern können.

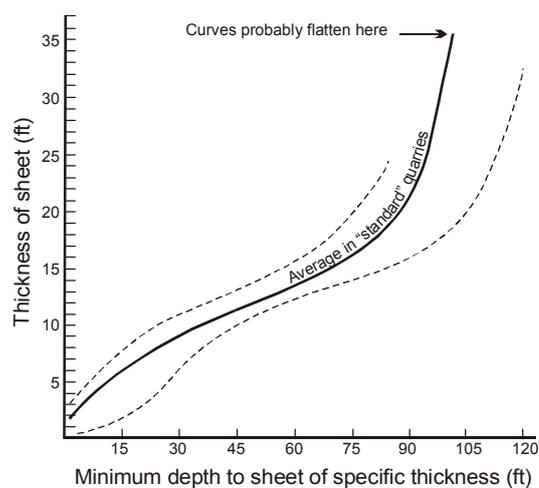


Abb. 7.28: Zunahme der horizontalen Kluftabstände in der Tiefe. Gestrichelte Linien stellen dabei Messergebnisse für zwei britische Granitbrüche dar (aus Goodman 1993).

Probleme ergeben sich hierbei allerdings hinsichtlich des Dekors, das in tieferen Horizonten variieren kann und damit den optischen Anforderungen eventuell nicht mehr genügt. Zudem würde ein beginnender Kesselabbau einen deutlich höheren technischen Aufwand bedeuten, da beispielsweise Fördereinrichtungen zum Transport der Blöcke aus der Lagerstätte installiert werden müssten oder Grundwasser unter hohem Kostenaufwand aus der Lagerstätte gepumpt werden müsste. Insgesamt wäre der Abbau mit erheblich größeren Produktionskosten verbunden und damit gegebenenfalls nicht mehr rentabel. Alternativ müsste der Abbau bei vorheriger Analyse von Kluftsystemen in andere Bereiche des Konzessionsgebietes verlagert werden.

Für die Erkundung weiterer Abbaugelände in der näheren Umgebung der Lagerstätte BT-Violet liegen dem Autor Ergebnisse auf der Grundlage geophysikalischer Untersuchungen vor. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden sechs parallele Messprofile durch das Konzessionsgebiet gelegt und elektrisch vermessen (Abb. 7.29a). Die ermittelten geoelektrischen Daten wurden anschließend in geologische Strukturaussagen (Abb. 7.29b) bzw. Aussagen über die Verteilung (Abb. 7.29c) relevanter physikalischer Eigenschaften umgesetzt. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Granite im Abbaugelände teilweise deutlich in Bezug auf die elektrischen Widerstände unterscheiden, woraus verschiedene Verwitterungsintensitäten des Gesteins abgeleitet werden können. Die Verwitterung ist lokal derartig stark ausgeprägt, dass die Anteile an Festgestein teilweise von bis zu 12 m Lockermaterial überlagert werden (Abb. 29b, Line 1200N, blaue Bereiche). Die Ergebnisse zeigen weiterhin, dass mittels geoelektrischer Verfahren die Verteilung von Quarzitgängen im Untergrund nicht erfasst werden kann, was wahrscheinlich auf die Überschneidung des spezifischen Widerstandes (Ωm) von Graniten ($\Omega m = 3 \times 10^2 - 10^4$) und Quarziten ($\Omega m = 3 \times 10^3 - 10^5$) zurückzuführen ist (siehe Beblo 1997).

Dennoch lassen sich aus den Messungen Erkenntnisse für die Abbauplanung gewinnen, da die geophysikalischen Profile Aufschluss über die Ausbreitung von Festgestein im Untergrund geben. Auf der Grundlage dieser Informationen kann beispielsweise die Mächtigkeit des Abraums über potentiellen Abbaupartien realistischer eingeschätzt werden. Bereiche mit Abraumhöhen in der Größenordnung mehrerer Meter ließen sich darüber hinaus gezielt als Deponie für anfallenden Abraum einplanen. Bei einer solchen Planung würde das anfallende Restmaterial lediglich nicht-bauwürdiges Material, nicht aber bauwürdige Partien überlagern. Bei der Auswertung der geoelektrischen Daten zeichnen sich zudem N-S- bis NNE-SSW-streichende Kluftzonen ab, in die bevorzugt meteorische Wässer eindringen können (Abb. 7.30). Der Abbau sollte von diesen Zonen möglichst ferngehalten werden, da innerhalb der tektonischen Bereiche neben einem dichteren Kluftsystem auch mit deutlichen Alterationen des Mineralbestandes zu rechnen wäre. Besonders die Biotite des Granits zeigen in einigen Bereichen des Abbaugeländes, insbesondere in der Nähe engständiger Trennflächensysteme, eine starke Zersetzung, die offensichtlich auf den Einfluss einsickernder Lösungen zurückzuführen ist.

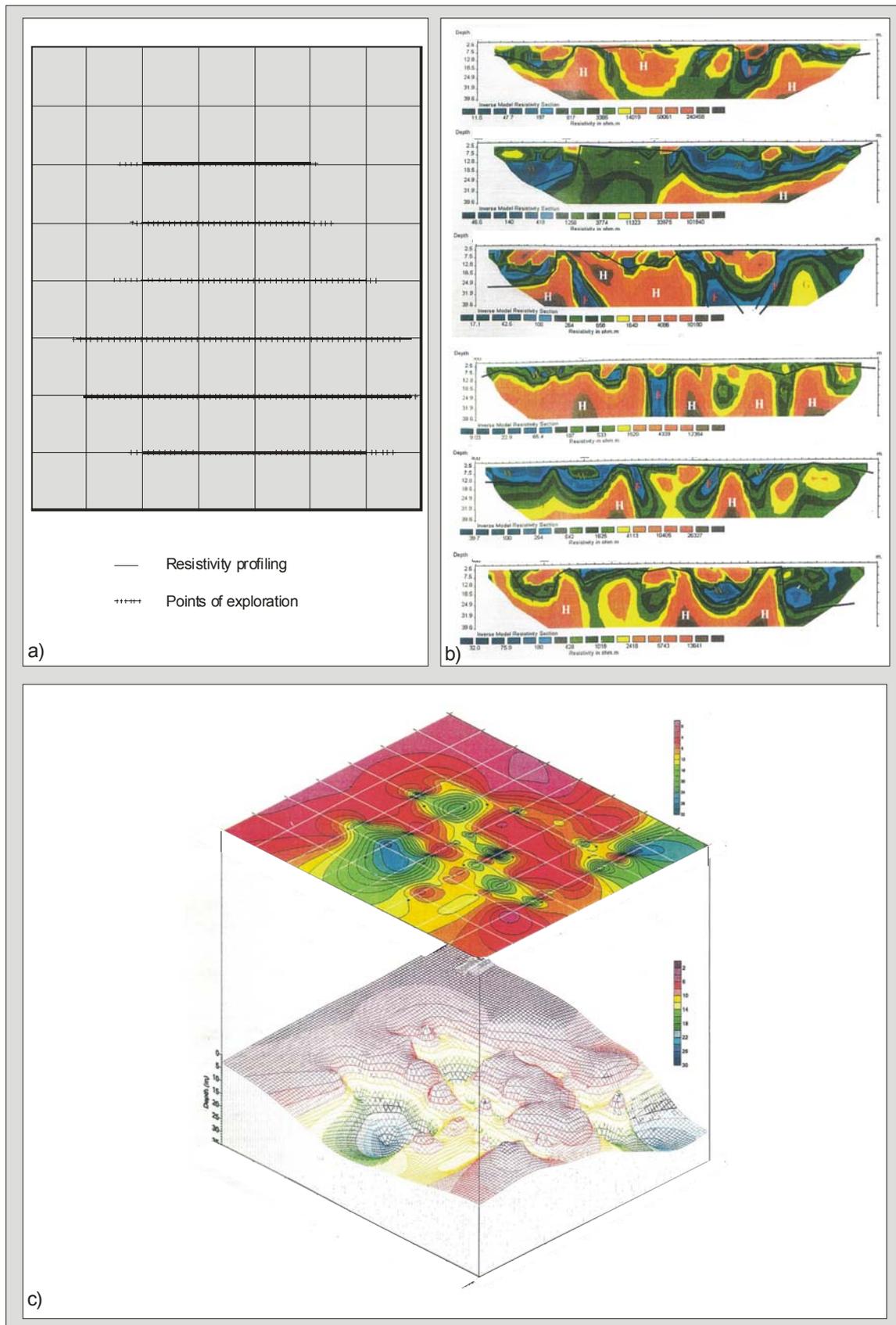


Abb. 7.29: Geophysikalische Erkundung im Abbaugbiet des Granits BT-Violet (Quelle: Granito Granite Co., Tak.). a) Parallele Anordnung der sechs Messprofile. b) Ergebnisse der elektrischen Widerstandsmessungen für jedes der sechs Messprofile bis in eine Tiefe von etwa 40 m. Orange Farbtöne repräsentieren dabei Zonen mit unverwittertem Granit. Blaue Farbtöne repräsentieren stark verwitterten Granit. Grüne und gelbe Farbtöne stellen Übergangsbereiche dar. c) Flächenhafte Projektion der Messergebnisse auf das Konzessionsgebiet.

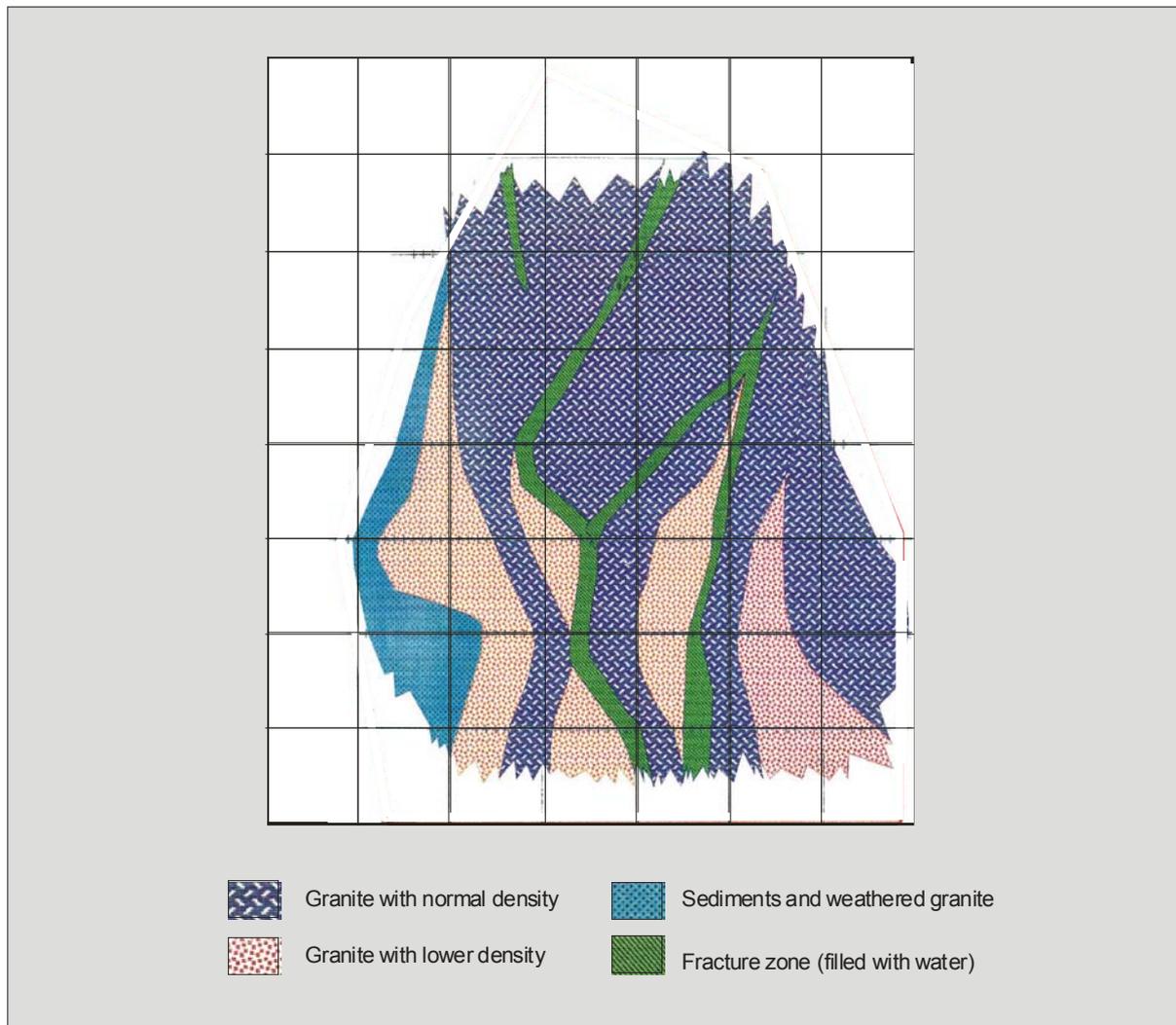


Abb. 7.30: Position von stark geklüfteten Bereichen (grüner Farbton) im Abbaugbiet. In den umliegenden Bereichen könnte das Abbauprodukt durch Alterationen des Mineralbestandes beeinträchtigt sein, so dass der Abbau möglichst in den zentralen Bereichen der dunkelblau ausgehaltenen Gebiete erfolgen sollte (Quelle: Granito Granite Co., Tak.).

7.3.2.5 Subvulkanische Intrusionen

In den Ausführungen der Kapitel 4 und 5 wurde bereits deutlich, dass sich der Granit NB-Orange durch eine Reihe von lithologischen Eigenschaften auszeichnet, die das Gestein von den übrigen Plutoniten des Probestandes abgrenzen. Zu diesen Eigenschaften zählen u. a. das granophyrische Gefüge (vgl. Kap. 4.3) sowie die hohe Porosität (vgl. Kap. 5.1.3), die für einen frischen, unverwitterten Granit als relativ ungewöhnlich angesehen werden darf.

In Kapitel 3 wurde darüber hinaus angesprochen, dass in Bezug auf die Genese der Varietät NB-Orange durchaus Widersprüche bestehen. Das Gestein wird von verschiedenen Bearbeitern (siehe geologische Karte ND 47-4) als Rhyolith des Central Thailand Volcanic Belts (CTVB) ausgewiesen, zu dem auch die weit verbreiteten Vulkanite im E des Erkundungsgebiets (vgl. Abb. 3.7) gestellt werden. Obwohl im direkten Umfeld der

Lagerstätte NB-Orange vulkanische Gesteine in einem oberflächennahen Schürfaufschluss angetroffen wurden (Abb. 7.31), kann eine Klassifikation der Lithologie als Vulkanit nicht vollständig überzeugen. Würde es sich bei der Varietät um ein reines Effusivgestein handeln, sollte aufgrund der relativ schnellen Abkühlung an der Erdoberfläche eine wesentlich feinkristallinere Matrix vorliegen.

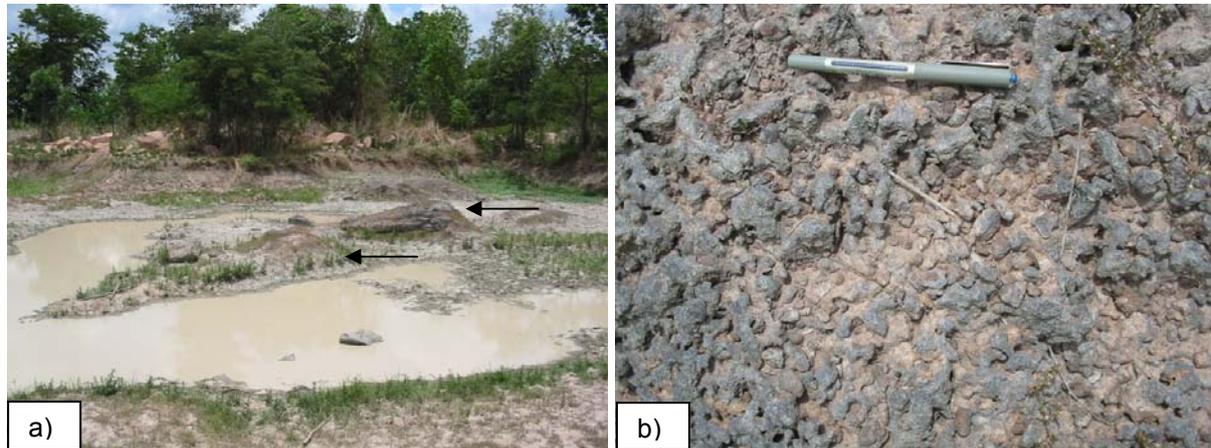


Abb. 7.31: Vulkanische Gesteine im direkten Umfeld der Lagerstätte NB-Orange. a) Probeaufschluss, in dem dunkle, feinkörnige Vulkanite anstehen. Die Gesteine sind in Form zweier N-S- bzw. NE-SW-streichender Rücken aufgeschlossen (Pfeile). b) Oberfläche der vulkanischen Gesteine mit unebenen, wulstigen Strukturen.

Vor diesem Hintergrund lässt sich für die Varietät NB-Orange ein Lagerstättenmodell aufstellen, nach dem die Genese des Vorkommens auf einen Intrusivkörper zurückgeht, der sich direkt von den Magmen vulkanischer Gesteine des CTVB ableitet. Im Rahmen dieses Modells kommt es zur Lagerstättenbildung, nachdem sich Schmelze aus einem vulkanischen Förderkanal absondert, anschließend jedoch nicht mehr bis an die Erdoberfläche aufdringen kann und in sehr oberflächennahen Krusteneinheiten auskristallisiert (Abb. 7.32).

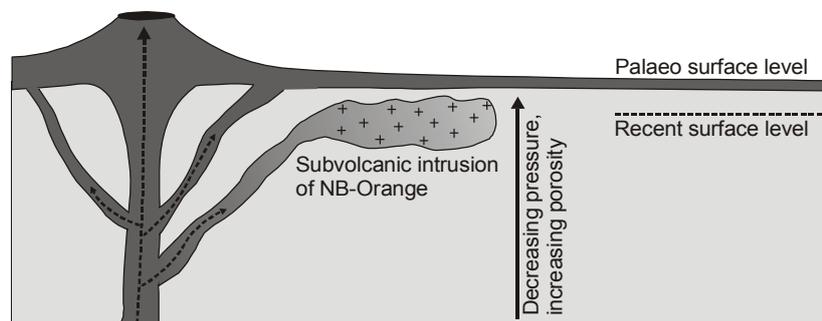


Abb. 7.32: Lagerstättenmodell des NB-Orange. Im Rahmen effusiver Ereignisse in der Trias kommt es zur Abscheidung von Magmen aus dem Förderkanal eines Vulkans. Die Schmelzansammlung dringt dabei jedoch nicht an der Oberfläche aus sondern erstarrt als subvulkanische Intrusion in oberflächennahen Bereichen.

Einen deutlichen Hinweis darauf geben zunächst die granophyrischen Strukturen des Gesteins, die typisch für subvulkanische Intrusionen sind (pers. Mitt. A. Vollbrecht). Durch

zunehmende Druckentlastung während des Magmenaufstiegs bis unterhalb der Erdoberfläche konnte sich in der Schmelze eine Gasphase formieren, die aufgrund des umschließenden Rahmengesteins jedoch nicht entweichen konnte. Eine plutonische, oberflächennahe Genese des Gesteins würde daher auch die für einen Granit vergleichsweise hohe Porosität erklären.

Eine nähere Analyse der durch die Gasbildung entstandenen Hohlräume ermöglicht, das Lagerstättenmodell des NB-Orange zu präzisieren und entscheidende Ereignisse in der Entwicklungsgeschichte des Gesteins zu bestimmen. Aus den lagerstätten-geologischen Untersuchungen geht hervor, dass eine hohe Anzahl an Makroporen durch charakteristische Mineralassoziationen gekennzeichnet ist. Während in vielen relativ kleinen Poren eine vollständige Füllung mit Chlorit vorliegt (Abb. 7.33a), sind Poren mit einem Durchmesser von mehreren Zentimetern oftmals mit einer Mineralparagenese bestehend aus Chlorit, Quarz und Calcit ausgekleidet (Abb. 7.33b). Der lagige Aufbau zahlreicher Porenquerschnitte signalisiert, dass es relativ häufig zu einem flächenhaften, vollständigen Ausscheiden von Chlorit kam und erst anschließend die Mineralisation einer xenomorphen Quarzphase einsetzte. In einigen Fällen ist die Abfolge der beiden Minerale jedoch invers dokumentiert. Chlorit und Quarz zeigen sehr regelmäßig eine helle oder auch dunkle Calcitkruste. Diese Beobachtung beinhaltet, dass die Carbonatanteile der Paragenese erst relativ spät im Porenraum auskristallisieren konnten.

Abweichend von der Ausbildung als dichter Belag erscheinen Quarz und Calcit auch noch in Form großer idiomorpher Kristalle (<2 cm), die den Chlorit-Quarz-Lagen aufsitzen. Kennzeichnend sind dabei die vielfältigen Farben dieser Minerale. Während Calcit in Form grünlich-gelblicher Kristalle auftritt (Abb. 7.33b, c), sind Quarze gelegentlich dunkelgrau, blau-grau, farblos (Abb. 7.33d) oder als Rauchquarz ausgebildet. Da oftmals ein carbonatischer Überzug auf einzelnen idiomorphen Quarzkristallen nachgewiesen werden konnte, gilt auch hier, dass die Bildung von Calcit das Wachstum von Quarz post-datiert.

Die vollständige Auffüllung einzelner Poren mit Chlorit sowie die lagig auftretende Mineralparagenese Chlorit – Quarz ist vermutlich auf spät-magmatische bzw. post-intrusive Prozesse zurückzuführen. Möglich wäre in diesem Zusammenhang eine hydrothermale Überprägung unter niedrig metamorphen Bedingungen, die lokal zu einer Mobilisierung verschiedener Elemente in den Mineralen des NB-Orange geführt hat. Grund zu der Annahme geben die weit verbreiteten Porensäume in Verbindung mit signifikanten Bleichungszonen, die in der näheren Umgebung dieser mineralisierten Poren auftreten (z.B. Abb. 7.33a, b). Diese Bleichungszonen beeinflussen entscheidend das Dekor des Gesteins und könnten daraus resultieren, dass wesentliche Mineralbestandteile von Quarz und Chlorit wie Si^{4+} bzw. Al^{3+} , Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , Fe^{2+} und Mg^{2+} aus Feldspäten sowie Biotiten gelöst und über mehrere Zentimeter in Richtung der Poren transportiert wurden. Die Elemente für die Mineralisation des Porenraumes waren demnach schon im Ausgangsgestein vorhanden, so dass lediglich H_2O aus metamorphen Fluiden für die Bildung von Chlorit bereitgestellt werden musste. Vor diesem Hintergrund ließe sich auch die nahezu vollständige Abstinenz von Biotit in dem Granit erklären, da nach der Modellvorstellung das massive Auftreten von Chlorit, der das Dekor des Gesteins in vielen Bereichen dominiert, eine intensive Desintegration der Biotitphase bedingt. Darüber hinaus liegen die Plagioklase des NB-Orange ausnahmslos in Form von Albit vor (vgl. Datenblatt in Anhang II). Sollte es sich bei der Feldspatvariante um

das Produkt einer Albitisierung von primären Plagioklasen handeln, hätte dieser Prozess eine Freisetzung von Al^{3+} zur Folge, was ebenfalls die Bildung von Chlorit begünstigen würde (Shau & Peacor 1992, Schmidt & Robinson 1997).

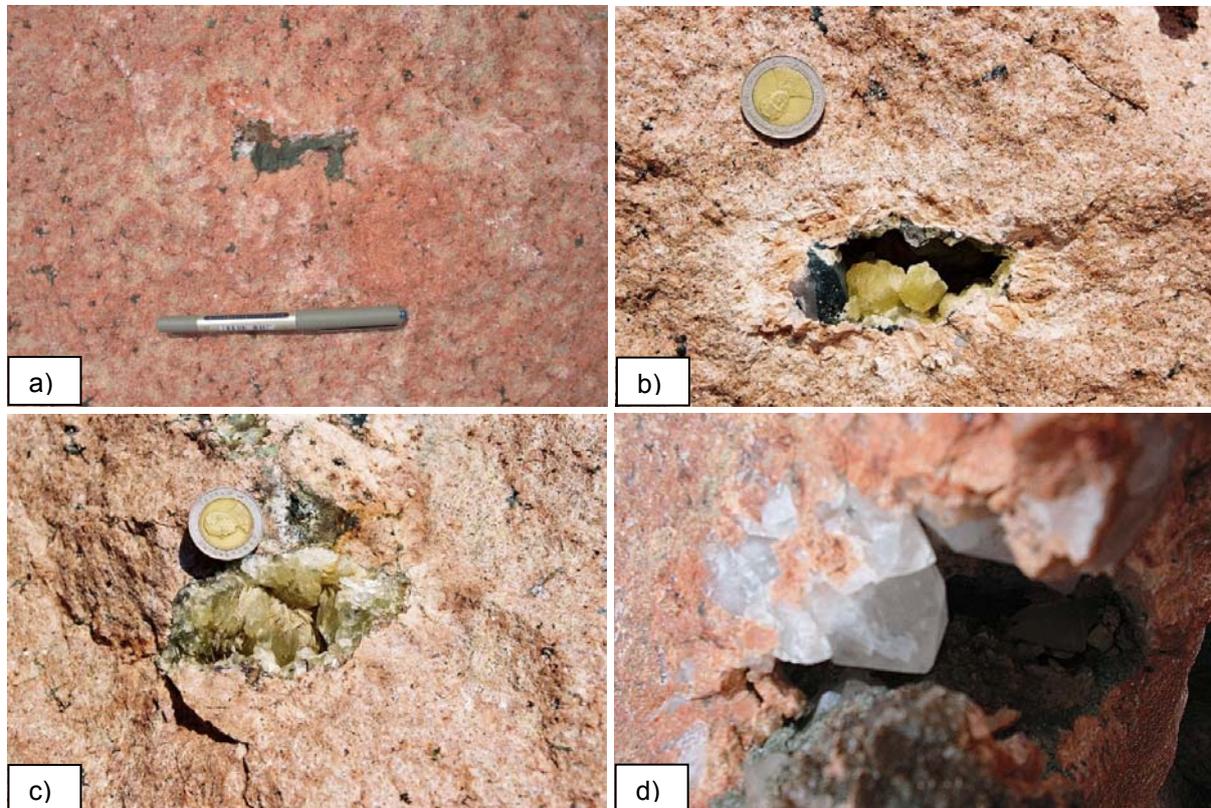


Abb. 7.33: Repräsentative Makroporen des NB-Orange. a) Vollständige Porenfüllung mit Chlorit in relativ kleinen Makroporen. Die angrenzenden Gesteinspartien sind netzartig alteriert und deutlich gebleicht. b) Chlorit, Quarz und grünlich-gelblicher, idiomorpher Calcit in offenem Hohlraum. Auffallend ist auch hier die konzentrische Bleichung des Granits entlang der Porenränder. c) Mineralparagenese mit Chlorit, Quarz und Calcit in einer relativ vollständig mineralisierten Pore. d) Idiomorpher Quarz in den Hohlräumen.

Das Auftreten von großen idiomorphen Kristallen auf den relativ dünn-schichtigen, xenomorphen Chlorit-Quarz-Lagen gibt Grund zu der Annahme, dass es sich bei den idiomorphen und xenomorphen Phasen um zwei unterschiedliche Generationen von Kristallen handelt. Die Ausbildung der idiomorphen Quarz-Calcit-Paragenese würde damit auf ein späteres hydrothermales Ereignis zurückgehen. Die teilweise sehr extensive Mineralisation von SiO_2 zeugt in diesem Zusammenhang von sehr niedrigen pH-Werten zu Beginn dieser Überprägung. Da die Löslichkeit der Primärphasen des Granits und auch die der sekundär gebildeten Chlorite mit zunehmend saurem Milieu ansteigt, war das Gestein während dieser Überprägung vermutlich noch einmal sehr massiven chemischen Angriffen ausgesetzt. Auf diese Weise konnte eine wiederholte Mobilisierung von Elementen einsetzen, die die flächenhaften Bleichungen intensiviert und zur weiteren Ausscheidung von idiomorphem Quarz an den Porenwänden führte. Die sehr späte Bildung von Calcit erfolgte eventuell während desselben Ereignisses, jedoch erst nachdem die ursprünglich sauren Lösungen durch zunehmende SiO_2 -Ausfällungen alkalischer wurden.

Die oben angeführten Ausführungen belegen, dass ein erheblicher Teil des primären Porenraumes in dem Granit NB-Orange infolge post-genetischer Ereignisse geschlossen wurde. Für die Gewinnung von Naturwerksteinen ist nun von entscheidender Bedeutung, ob nicht eventuell auch eine nahezu vollständige Schließung des Porenraumes in tieferen Sohlen zu erwarten wäre und sich mit dem Abbau solch niedrig poröser Gesteine vorteilhaftere technische Gesteinseigenschaften bzw. günstigere Bearbeitungsaspekte ergeben könnten. Die Bearbeitungsaspekte spielen gerade bei dem Gestein NB-Orange eine entscheidende Rolle, da hier die Hohlräume von Fertigprodukten in zusätzlichen Arbeitsschritten oftmals versiegelt werden müssen.

Im Falle einer sehr voluminösen Intrusion mit großer Ausdehnung zur Tiefe wäre davon auszugehen, dass sich die Porosität des Gesteins NB-Orange mit zunehmender Tiefe verringert, da hier während der Kristallisation des Magmas ein relativ höherer Druck die Bildung einer Gasphase hätte reduzieren bzw. unterbinden müssen. Der Ausstrich des NB-Orange an der Oberfläche ist jedoch relativ begrenzt. Gesetzt den Fall, dass es sich bei der Intrusion des NB-Orange um eine Schmelzansammlung mit relativ geringem Volumen handelt, sollten auch relativ geringe Druckveränderungen zur Tiefe hin auftreten, was eine einheitliche Primärporosität in dem Gestein zur Folge hätte. Eine vollständige Schließung des Porenraumes wäre dann lediglich durch intensive Mineralneubildungen möglich.

Neuhoff et al. (1999) beschreiben recht junge Vulkanite (max. 13 Ma) in E-Island, die mit Quarz und Chlorit u. a. die gleichen Mineralparagenesen im Porenraum aufweisen wie der subvulkanische NB-Orange. Das Wachstum der Minerale ist ebenfalls lagenartig und durch verschiedene hydrothermale Ereignisse bzw. eine Mobilisation von Elementen aus angrenzenden Gesteinspartien hervorgegangen. Die Mineralneubildungen von u. a. Quarz und Chlorit reduzieren dabei das Porenvolumen der Vulkanite bis zu 50 %. Neuhoff et al. (1999) leiten aus den Mineralparagenesen thermobarometrische Rahmenbedingungen ab, nach denen die Bildung von Quarz-Säumen in geringer Tiefe bei etwa 50 °C erfolgte. Die Ausscheidung von Chlorit setzte den Autoren zufolge innerhalb eines Druckbereichs von 1 bis 170 bar, maximal bei 500 bar und Temperaturen um 90 °C ein. Erst unter diesen Bedingungen beginnt in den Vulkaniten die vollständige Schließung des Porenraumes durch das Wachstum von Zeoliten (Neuhoff et al. 1999). Das Beispiel verdeutlicht, dass die Verfüllung des Porenraums durch sekundäre Mineralbildung eine komplexe Funktion der Versenkung und der Hydrologie darstellt. Für den Granit NB-Orange ließe sich aufgrund der vielfältigen Einflussgrößen (z. B. die Zusammensetzung und Temperatur der hydrothermalen Lösungen sowie die Versenkungstiefe des Gesteins) nur schwer prognostizieren, bis zu welchem Grad die Porosität in tieferen Sohlen geschlossen sein könnte. Zudem sind Minerale wie Zeolite chemisch relativ instabil, so dass im Falle des vergleichsweise alten, triassischen Gesteins NB-Orange eine rezente Porenfüllung durch Zeolite fragwürdig erscheint. Eine sichere Aussage über die Entwicklung der Porosität im Untergrund würde aus der Analyse von Bohrkernen hervorgehen. In Verbindung mit der Hohlräumenanalyse ließe sich gleichzeitig auch eine Abschätzung der optischen Gesteinseigenschaften vornehmen, da das Dekor des NB-Orange durch die Chloritbildung im Porenraum und die damit verbundenen Bleichungszonen (s. o.) entscheidend von der Porosität abhängig ist.

7.3.2.6 Diagonale Kluftsyste

Diagonal verlaufende Klüfte stellen ein weiteres lagerstätten-kontrollierendes Element dar, das vorrangig in dem Vorkommen SP-Blue der Provinz Ratchaburi entwickelt ist. Der Granit zeichnet sich durch drei dominante Kluftscharen aus, die NNE-SSW-, NW-SE- und ENE-WSW-streichende Orientierungen aufweisen. Während die NNE-SSW-verlaufenden Trennflächen sehr steil, annähernd vertikal einfallen, schneiden die NW-SE-streichenden Flächen die Lagerstätte mit vorwiegend diagonalen Einfallswinkeln. Als Konsequenz dieser systematischen strukturellen Vorzeichnungen ergeben sich zusammen mit der geomorphologischen Konfiguration der Lagerstätte im Top-Bereich eines spitz zulaufenden Berges besondere Anforderungen an die Lagerstättenplanung.

Die Beziehung zwischen beiden diagonalen Kluftscharen in der Lagerstätte SP-Blue zeigt eine gewisse Regelmäßigkeit, da nach NE einfallende Flächen stets an nach SW einfallenden Flächen enden. Durch den Verlauf und die Anordnung der Kluftflächen werden sehr regelmäßig großvolumige, quaderförmige Granitkörper aus dem Gesteinsverband herauspräpariert, die mit etwa 50° nach SW hin einfallen (Abb. 7.34a). Die spezifischen Neigungswinkel der Granitbänke können dabei lokale Instabilitäten induzieren, die während der Abbauphase sehr leicht zum Abgleiten von Granitblöcken führen. Diesem Umstand muss besonders beim Anlegen der Abbruchwände Rechnung getragen werden, die je nach Orientierung und räumlicher Position zu den Granitbänken unterschiedliche Materialbewegungen am Hang begünstigen können (Abb. 7.34b, c).

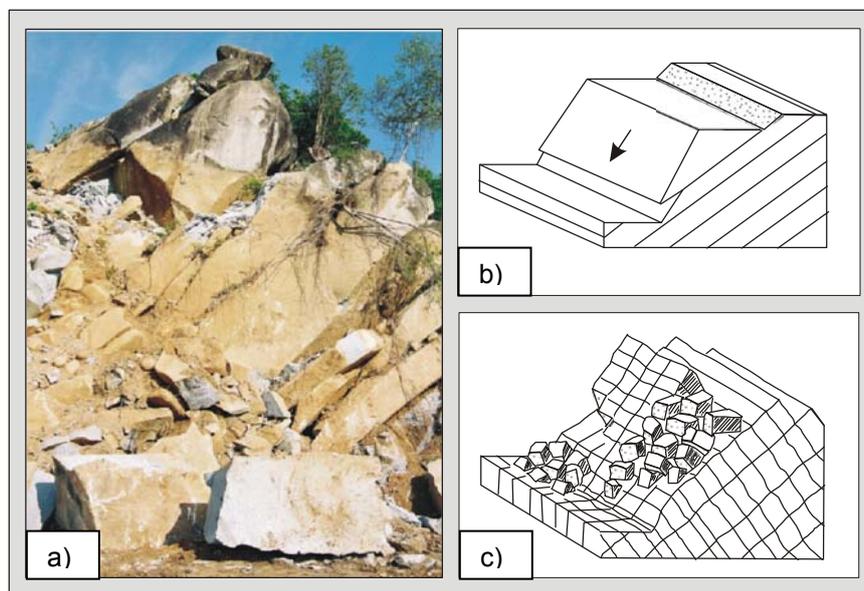


Abb. 7.34: a) Diagonales Kluftsystem in der Lagerstätte SP-Grey. Die Neigungswinkel können dabei zu erheblichen Instabilitäten der Gesteinspakete führen. b) und c) Unterschiedliche Materialbewegungen am Hang infolge diagonal einfallender Klüfte (aus Smith 1999).

Besonders unter dem Einfluss von Feuchtigkeit, im vorliegenden Fall also während der Regenzeiten, können sich je nach Verwitterungsgrad und Tonmineralgehalt auf den geneigten

Kluftflächen ganze Gesteinspakete aus dem Felsverband lösen. Da die Granitproduktion in der Lagerstätte große Sicherheitsrisiken für das Lagerstättenpersonal beinhalten kann, muss die für das Blockausbringen gewählte Strategie sehr genau auf die lithologischen, in diesem Fall also die durch das Kluftsystem vorgegebenen Trennflächenmuster, abgestimmt sein.

Bei massiven Gesteinen ohne Diskontinuitäten bzw. bei Gesteinen mit horizontalen und vertikalen Diskontinuitäten sollten steil stehende Lagerstättenwände mit Neigungswinkeln bis zu 85° stabil bleiben (Smith 1999). Für Gesteine mit diagonal einfallenden Trennflächen wie im vorliegenden Fall würde dies jedoch nur gelten, wenn die Abbaurichtung parallel zum Streichen der diagonalen Flächen ausgerichtet wäre. Eine solche Abbausituation wäre im derzeitigen Zustand der Lagerstätte SP-Grey allerdings mit erheblichen Komplikationen verbunden, da die Blöcke nur mit Großfördereinrichtungen von der Steinbruchwand entfernt werden könnten. Durch die Installation solcher Einrichtungen wären darüber hinaus aufgrund der besonderen Lagerstättenposition zusammen mit der relativ kleinen Abbaufäche große Teile der Lagerstätte blockiert. Eine Alternative hierzu wäre ein Abbau senkrecht zum Streichen der diagonalen Klüfte. Jede Wand müsste dabei unter Umständen individuell in Abhängigkeit der Hangstabilität gestaltet werden, wobei die Neigungswinkel einzelner Abbauwände unter 70° liegen sollten (Smith 1999). Eine solche Abbausituation würde sich jedoch nachteilig auf die Blockausbeute auswirken, da hochwertiges Material von den Granitquadern abgetragen werden müsste und dadurch erhebliche Abraummengen anfallen würden.

7.3.3 Lagerstättenmodelle für thailändische Carbonatgesteine

7.3.3.1 Änderungen im Dekor infolge der metamorphen und tektonischen Überprägung

Marmorlagerstätten sind aufgrund ihrer Genese grundsätzlich durch Metamorphose und gegebenenfalls durch Deformationen des Gesteins geprägt. Der Grad der Metamorphose kann dabei variieren, so dass sich in Abhängigkeit von der metamorphen Überprägung unterschiedliche strukturelle Ausbildungen des Gesteins ergeben können. Oftmals kommt es dabei zu so unterschiedlichen Dekormustern, dass eine Aushaltung mehrerer Sorten vorgenommen werden kann. Bei diesem Lagerstättenmodell ist insgesamt entscheidend, dass sich aus einer schlecht gegeneinander abgegrenzten Vielfalt an Strukturen auf relativ kleinem Raum erhebliche Probleme in Bezug auf die Verfügbarkeit einzelner Sorten ergeben können. Die Marmore der Region Nakhon Ratchasima liegen ebenfalls mit zahlreichen unterschiedlichen Dekors vor (vgl. Kap. 3), woraus sich unter Umständen sehr begrenzte Vorräte der jeweiligen Sorten ergeben, wenn sich das Dekor bei der Erweiterung der Lagerstätten ändern sollte. Die Produkte sind damit nur für einen relativ geringen Zeitraum verfügbar. Dies lässt eine kontinuierliche Bedienung des Marktes mit Marmoren nach stabiler Sortendefinition fragwürdig erscheinen. In der Lagerstätte PC-White/Red tritt zudem eine etwa 15 m breite Störungszone auf (Abb. 7.35), innerhalb der der breckziierte Marmor (PC-Red) gewonnen wird. Selbst innerhalb der Breckzienzone kann das Dekor der Varietät mit Änderungen der Matrixfarbe schwanken (Abb. 7.36).

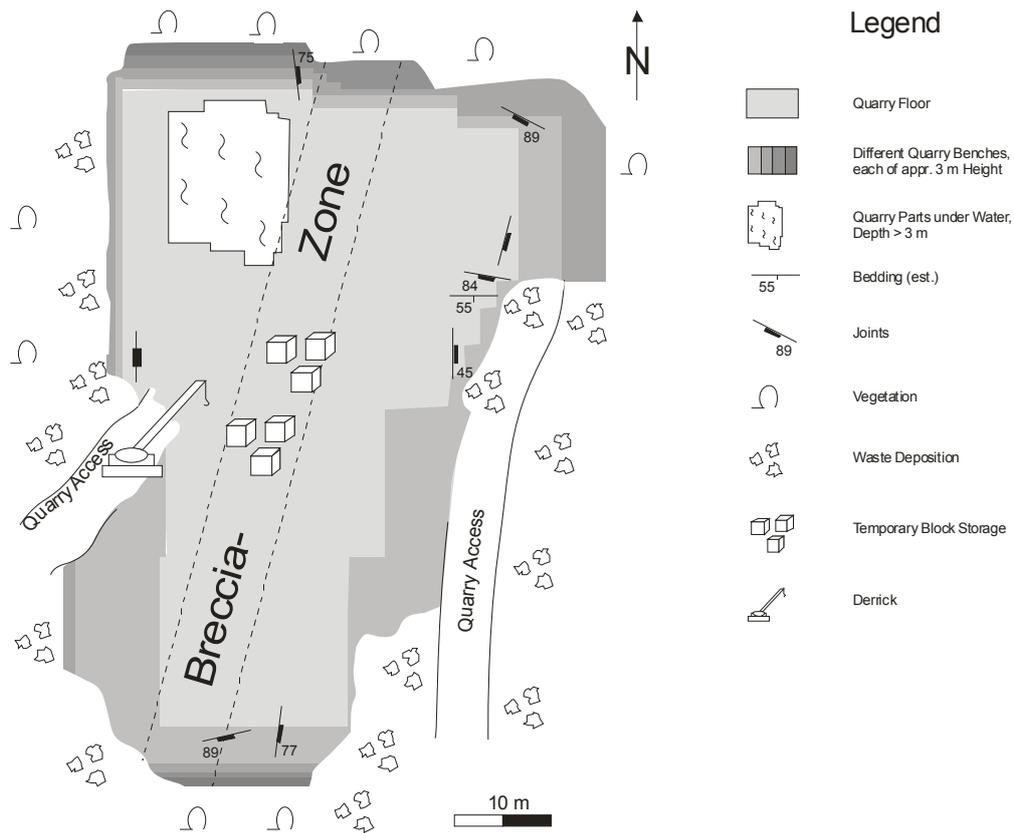


Abb. 7.35: Schematische Übersicht der Lagerstätte PC-White/Red. Erläuterungen im Text dieses Kapitels.

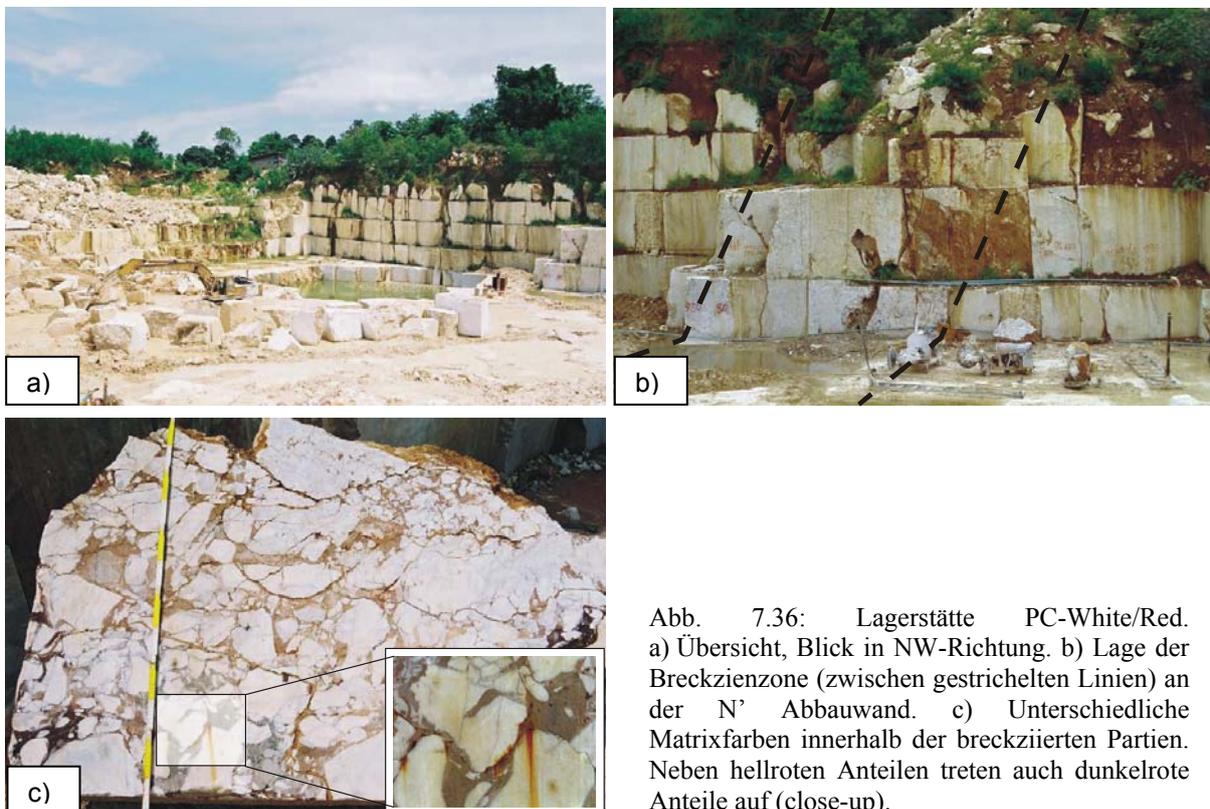


Abb. 7.36: Lagerstätte PC-White/Red. a) Übersicht, Blick in NW-Richtung. b) Lage der Breckzienzone (zwischen gestrichelten Linien) an der N' Abbauwand. c) Unterschiedliche Matrixfarben innerhalb der breckziierten Partien. Neben hellroten Anteilen treten auch dunkelrote Anteile auf (close-up).

Für den Abbau ergibt sich die grundsätzliche Frage, in welche Richtung die derzeit existierende Lagerstätte erweitert werden kann, damit ein relativ einheitliches Dekor gewährleistet wird. In diesem Zusammenhang muss die Art und die Ursache der Metamorphose berücksichtigt werden. Chaodumrong et al. (2002) machen Intrusivgesteine für die Metamorphose der ursprünglichen Kalksteine in der Region verantwortlich, woraus abzuleiten ist, dass die Marmore durch eine kontaktmetamorphe Überprägung gebildet wurden. Möglich wäre daher eine Metamorphose im Zusammenhang der Soi Woi Intrusiva, die E' bzw. N' der Lagerstätte auftreten. Grundsätzlich lässt auch das Gefüge der Marmore diese Vermutung zu, da die Gesteine in E' Richtung wesentlich grobkörniger werden und in derselben Richtung der Metamorphosegrad zuzunehmen scheint. Sollten die Soi Woi Intrusiva tatsächlich für die Metamorphose verantwortlich sein, könnten metamorphe Gesteine zumindest in E' Richtung bis an die Kontakte zu den magmatischen Einheiten vorliegen. Unter der Annahme eines mehr oder weniger steilen Kontaktbereichs zwischen den Carbonatgesteinen und den Intrusivgesteinen ließen sich metamorphe Carbonatgesteine auch noch für tiefere Bereiche der Lagerstätte ableiten (Abb. 7.37). Darüber hinaus wäre in diesen Teilen der Lagerstätte bei kontaktmetamorphen Verhältnissen von einem relativ einheitlichen Metamorphosegrad auszugehen, welcher die Kontinuität des Marmordekors gewährleisten könnte. Die Kontinuität des Dekors wäre allerdings auch von der Zusammensetzung des Ausgangsmaterials abhängig, so dass hierbei auch immer stratigraphische Aspekte berücksichtigt werden müssten.

Wäre in der Lagerstätte eine deutliche Zunahme des Metamorphosegrades mit der Tiefe erkennbar (die derzeitigen Aufschlussverhältnisse lassen keine Möglichkeit zu, dies zu überprüfen), sollten bei einer kontaktmetamorphen Genese der Marmore magmatische Lithologien in tieferen Stockwerken der Lagerstätte auftreten. Die Erweiterung der Lagerstätte in tiefere Stockwerke könnte dann jedoch erneut eine Änderung des Dekors zur Folge haben.

Das thermische Ereignis, welches zur Ausbildung der Marmore in der Lagerstätte PC-White/Red führte, muss jedoch nicht zwingend mit dem Auftreten der Soi Woi Intrusiva in Verbindung stehen. Diese Behauptung ergibt sich aus dem Vorkommen einer kleineren Magmenintrusion, die einen Teil der Phra Ngam Diorite darstellt und in wesentlich geringerer Distanz zu der Lagerstätte PC-White/Red auftritt. Kleinere Intrusionen magmatischer Gesteine, die in unmittelbarer Nähe zu den Marmoren angesiedelt sind, könnten daher ebenfalls für die Metamorphose der Kalksteine und damit für die Genese der Marmore PC-White und PC-Red verantwortlich sein. Darüber hinaus treten in sehr geringer Distanz zu den N' der Lagerstätte PC-White/Red intrudierten Soi Woi Intrusives sedimentäre Carbonatgesteine auf (schwarze Kalksteine der Provinz Nakhon Ratchasima, vgl. Kap. 4.1), die ganz offensichtlich keine metamorphe Überprägung erfahren haben.

Um ein umfassenderes Bild der Rahmenbedingungen zu erlangen, sollen in diesem Zusammenhang sowohl die geographische Lage des Abbaugbietes als auch die regionalen Störungen in der Abbauf ormation Berücksichtigung finden. Die Lagerstätte ist in direkter Nachbarschaft zu dem Fluss Khlong Lam Takhong positioniert. Dieser Fluss zeichnet vermutlich eine ENE-WSW-streichende Störung nach, was anhand einer NNW-SSE-streichenden Störung gefolgert werden kann, die an eben diesem Fluss einen deutlichen

Versatz aufweist. In diesem Rahmen wäre es daher möglich, dass die Intrusion des Magmenkörpers durch die Ausbildung der Störung begünstigt wurde. Darüber hinaus ist nicht auszuschließen, dass das Eindringen kleinerer Magmenschübe eventuell auch an anderen Stellen entlang der Störung erfolgt ist, was möglicherweise zu weiteren Metamorphosen geführt hat. Die an Störungen gebundene Intrusion der Phra Ngam Diorite lässt sich deutlich aus der gestreckten Form einer weiteren Intrusion ableiten, die ENE-WSW-streichend zwischen zwei Störungen mit gleicher Orientierung auftritt (vgl. Geological Map of Thailand ND 47-8, Geological Survey Division 1985).

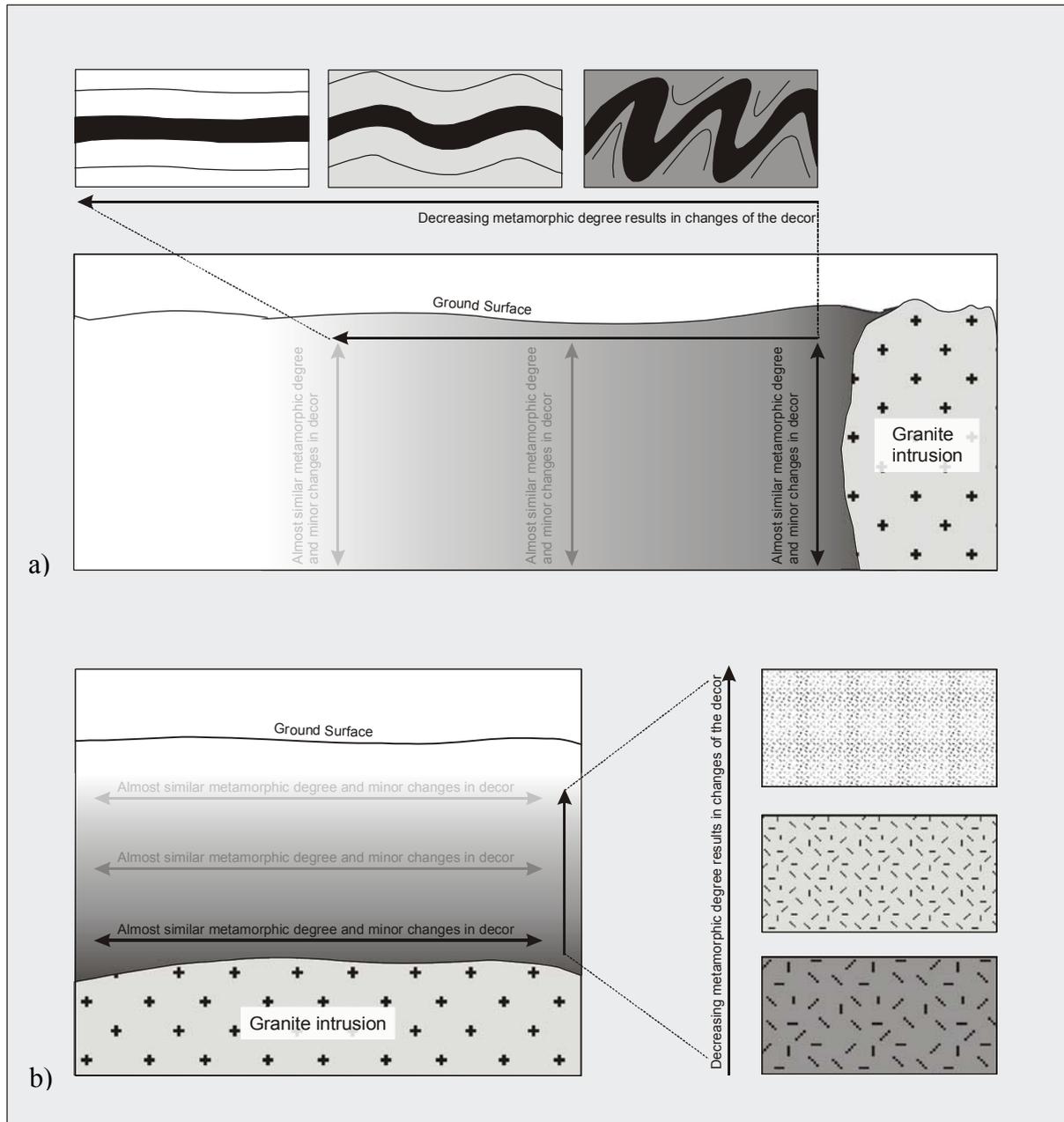


Abb. 7.37: Abnahme der metamorphen Überprägung und Änderungen des Dekors in Abhängigkeit des Kontakts. a) Kontaktmetamorphose mit steilem Kontakt zwischen Rahmengesteinen und Intrusivgesteinen. Die Intensität der metamorphen Überprägung nimmt lateral ab. Änderungen des Dekors sind beispielhaft anhand abschwächender Faltenstrukturen dargestellt. b) Kontaktmetamorphose mit (sub-)horizontalem Kontakt zwischen Rahmengesteinen und Intrusivgesteinen. Die Intensität der metamorphen Überprägung nimmt vertikal ab. Änderungen des Dekors sind beispielhaft anhand abnehmender Korngrößen dargestellt.

Die Genese der Marmore in der Region kann an dieser Stelle aufgrund zu geringer Hintergrundinformationen nicht eindeutig geklärt werden. Die Antwort wäre jedoch für eine gezielte Erkundung weiterer Vorkommen von Bedeutung. Im Fall der Kontaktmetamorphose durch die sehr voluminösen Soi Woi Intrusiva könnten Marmore an zahlreichen Stellen innerhalb der Khao Khad Formation auftreten. Im Fall der Metamorphose durch kleinere dioritische Vorkommen wären die Marmore lediglich im unmittelbaren Kontakt zu den Phra Ngam Dioriten und im Einflussbereich E-W- bzw. ENE-WSW-streichender Störungen anzutreffen.

7.3.3.2 Tektonische Überprägungen

Wie die Marmore der Lagerstätte PC-White/Red sind weitere Lagerstätten von Carbonatgesteinen durch tektonische Überprägungen gekennzeichnet.

Besonders deutlich ist der Einfluss von Tektonik in der Lagerstätte TS-Pink/Grey der Provinz Sukhothai dokumentiert. Der Einfluss wirkt sich dabei in erster Linie auf das Dekor der Gesteine aus, das an verschiedenen Stellen sogar eine zeitliche Abfolge der Deformationsereignisse erkennen lässt. Die Lithologien TS-Grey/Pink waren zuerst duktilen Verformungen ausgesetzt, die in vielen Bereichen eine engständige Isoklinalfaltung bewirkten. Während eines anschließenden Ereignisses kam es infolge von Extensionstektonik zu bruchhaften Reaktionen der Gesteine und zur Ausbildung von Grabenstrukturen, welche makroskopisch im Dekor der Gesteine zu erkennen sind (Abb. 7.38). Da die Ausbildung von Grabenstrukturen eine horizontale Lagerung der Lithologien voraussetzt, muss es im Rahmen eines weiteren tektonischen Ereignisses zur Rotation der Einheiten um horizontale Achsen gekommen sein. Dies belegt die steil stehende Ausrichtung der Grabenstrukturen (Abb. 7.38). Im Hinblick auf die makroskopische Erscheinung der Gesteine macht sich der Einfluss duktiler Verformungen intensiver bemerkbar als der Einfluss spröder Verformungen, da in der Regel Faltenstrukturen das Dekor der Varietäten aus Sukhothai dominieren.

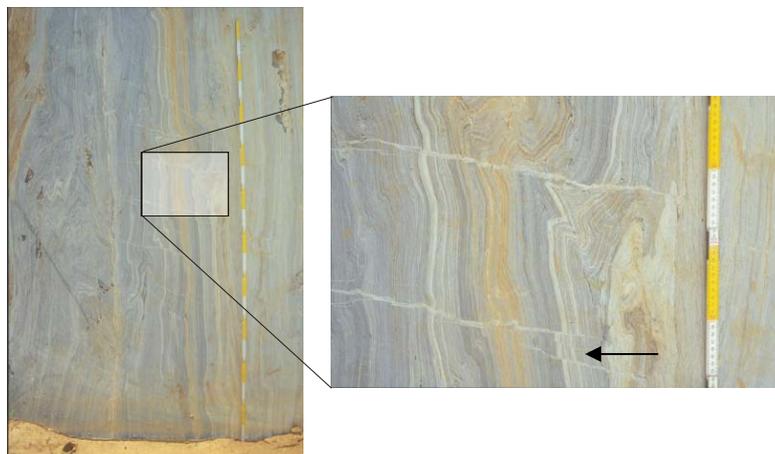


Abb. 7.38: Deformation der Marmore in der Lagerstätte TS-Grey/Pink. Es lassen sich kleinere Grabenstrukturen erkennen (Pfeil), die auf Extensionstektonik im Lagerstättengebiet hindeuten. Erläuterungen im Text dieses Kapitels.

Der tektonische Einfluss auf die Lagerstätte ist darüber hinaus in Form einer etwa 2-3 m breiten Störungszone sichtbar. Diese Störungszone besitzt die gleiche NNE-SSW-streichende Orientierung wie die bereits angesprochene Breckzienzone in der Lagerstätte PC-White/Red. Im Gegensatz zu der Breckzienzone tritt die Störung jedoch am Rand des S' Teils der Lagerstätte auf und begrenzt das Werksteinvorkommen TS-Grey/Pink durch das Auftreten von gefalteten, steil stehenden Phylliten in W' Richtungen. Die Partien innerhalb der Störung beinhalten dunkel gebänderte Marmore, die in vielen Bereichen entlang der alternierenden Lagen zerklüftet sind. Dennoch treten sowohl innerhalb, verstärkt jedoch in den Randpartien der Zone weitständigere Klüfte auf, die den Abbau von stark deformiertem und geschertem Marmor zulassen.

Die roten und grauen Kalksteine der Lagerstätte KH-Red in der Provinz Sra Kaeo sind ebenfalls durch tektonische Überprägungen gekennzeichnet, die sich vornehmlich auf das Dekor der Lithologien auswirken. Die tektonische Überprägung der Kalksteine dürfte auf regionale kinematische Ereignisse zurückgehen, da das Abbaugelände im Einflussbereich der Moei Uthai Thani Fault Zone liegt und nur wenige Kilometer W' der Lagerstätte die Terrain-Grenze der zwei Mikrokontinente Shan Thai und Indochina vermutet wird. In diesem Zusammenhang wäre es möglich, dass Störungen die Infiltration von Fe-haltigen Fluiden ermöglichten, welche die ursprünglich grauen Gesteine durch einen Überzug mit Hämatit rot anfärbten. In diesem Fall wäre die rote Farbe der Kalksteine das Produkt eines sekundären Prozesses, der Farbwechsel selbst innerhalb einer Sequenz nachschieben würde. Tatsächlich können graue und rote Gesteine in der Lagerstätte nicht eindeutig voneinander abgegrenzt werden, so dass graue Anteile willkürlich zwischen den roten Kalksteinen auftreten können. Damit ergibt sich aus der tektonischen Überprägung ein spezifisches Arrangement der Farben, welches das lagerstätten-kontrollierende Element der Varietät definiert.

Das Dekor der roten Kalksteine definiert sich darüber hinaus über eine teilweise sehr hohe Konzentration von Staffelbrüchen, die mit weißem Calcit gefüllt sind und aus dem bruchhaften Verhalten der Gesteine als Reaktion auf die tektonischen Bewegungen resultieren. Die Verteilung der Brüche ist wie die Verteilung von roten und grauen Farben heterogen ausgebildet, so dass dieses Element bei der Bewertung der Lithologie ebenfalls berücksichtigt werden muss. Die Strukturen könnten eine individuelle Sorte definieren. Dies würde jedoch eine genaue Erkundung der Bereiche voraussetzen.

7.3.4 Lagerstättenmodelle für thailändische Sandsteine

7.3.4.1 Farbänderungen

Wesentliches Merkmal der thailändischen Sandsteinvorkommen ist die ausgesprochen große Farbvielfalt. Rote Sandsteine der Khok Kruat Formation sind in verschiedenen Tönen von hell- bis dunkelrot, braun-rot und rot-violett ausgebildet. Grüne Varietäten können ebenfalls ihre Farbe ändern und dabei über kurze Distanz in grün-graue und graue Einheiten übergehen. Im Gegensatz zu den unterschiedlichen Nuancen der roten Sandsteine oder den

wechselnden grün-grau Intensitäten zeigen die im Abbau befindlichen Sandsteine der Phra Wihan Formation mit weißen und gelb-braunen Grundtönen völlig unterschiedliche Farben. Die Ausbildung der verschiedenen Farben muss als lagerstätten-kontrollierendes Element gewertet werden, da die Entwicklung eines jeweiligen Farbtons unvorhersehbar ist.

Die Farbtöne der roten Sandsteine sind wie bei vielen terrigenen klastischen Sedimenten auf den Einfluss von Hämatit zurückzuführen. Das Auftreten von Hämatit resultiert dabei aus syn- bis post-diagenetischen Prozessen, da das Mineral lediglich als dünner Überzug auf detritischen Mineralkörnern, nicht aber zwischen den Kornkontakten der einzelnen Minerale nachgewiesen werden konnte. Ein weiteres Argument für eine diagenetische Bildung ist, dass kein rezentes Flusssystem Alluvium mit der Farbintensität von Rotsedimenten transportiert (Walker 1967; Van Houten 1972, 1973). Eine prä-diagenetische Bildung, die bereits das Vorkommen von Hämatit im Liefergebiet und dessen Transport als Detritus beinhalten würde, soll damit an dieser Stelle ausgeschlossen werden. Da die Sedimente der Khok Kruat Formation als kontinentale Serien zur Ablagerung kamen (Heggemann 1994), ist vielmehr zu vermuten, dass eisenreiche Minerale wie Biotit oder Hornblende zum Zeitpunkt der Sedimentation einer Alteration unterlagen, die zur Oxidation von Fe^{2+} zu Fe^{3+} und damit zur Bildung von Hämatit im Ablagerungsgebiet führte. Ein Vergleich der FeO- mit der Fe_2O_3 -Konzentration in den roten Sandsteinen der Khok Kruat Formation zeigt, dass reduziertes Eisen nahezu vollständig in Lösung gegangen und abtransportiert sein muss, da Fe-Verbindungen fast ausschließlich in Form von rötlich färbendem Fe_2O_3 vorliegen (Tab. 7.9).

Tab. 7.9: FeO- und Fe_2O_3 -Konzentrationen der Sandsteine

Sandstone	FeO	Fe_2O_3	FeO : Fe_2O_3
White	0.23	0.01	230
Rainbow	0.01	0.58	0.01
Brown	0.10	1.59	0.06
Yellow	0.28	0.98	0.29
Green	2.35	1.15	2.05
Red	0.13	1.91	0.07

Die unterschiedlichen Nuancen an Rottönen in den Sandsteinen werden eventuell durch Schwankungen in der Korngröße hervorgerufen, da die Intensität der Farben mit abnehmender Korngröße zunimmt. Ein Zusammenhang zwischen Farbintensität und Korngröße bei klastischen Einheiten wird auch von Picard (1965) für Rotsedimente der Chugwater Formation (Wyoming, USA) favorisiert.

Auffällig bei roten Sandsteinen sind weiße, fleckenartige Bleichungszonen, die aus der Dekomposition organischer Bestandteile hervorgehen und in jeder rötlichen Varietät auftreten können. Bei der Zersetzung entstehen um die organischen Partikel herum so genannte Reduktionshöfe, in deren Einflussbereich das Gestein lokal gebleicht wird. Innerhalb dieser Reduktionshöfe geht Fe^{3+} in lösliches Fe^{2+} über und wird durch beispielsweise meteorische Wässer abgeführt, so dass punktuell keine farbgebenden Pigmente mehr in dem

Gesteinsverband vorliegen. Bleichungszonen können in roten Sandsteinen der Khok Kruat Formation einen Durchmesser von mehreren Zentimetern erreichen.

Der Farbwechsel von grün zu grau kann bei den grünen Sandsteinen der Phu Kradung Formation sowohl konkordant als auch diskordant zur sedimentären Schichtung ausgebildet sein. Obwohl kein diskordanter Kontakt zwischen beiden Farbtönen dokumentiert ist, kann aufgrund der verschiedenen Farbintensitäten von einem graduellen Übergang ausgegangen werden. In den grauen Bereichen zeigt der Sandstein abweichend von der sonst üblichen Horizontalschichtung eine Kreuzschichtung. Besonders auf diesen Schichtfolgen sind Ablagerungen organischer Substanzen zu erkennen, die entweder als sehr feiner Belag (Abb. 39a) oder als schichtparallele Linsen von einigen Zentimetern Größe auftreten. Lokal schließt der grüne Sandstein fossiles Holz, der graue Sandstein handgroße Stücke von Lignit ein (Abb. 39b, c). Die Verteilung von organischem Material im Sediment kann als ausschlaggebendes Element für die Farbänderungen des Sandsteins angenommen werden, da sich spezielle Grautöne aus einer Mischung grüner Sandsteine mit schwarzem organischen Material ergeben können (vgl. McBride 1974).

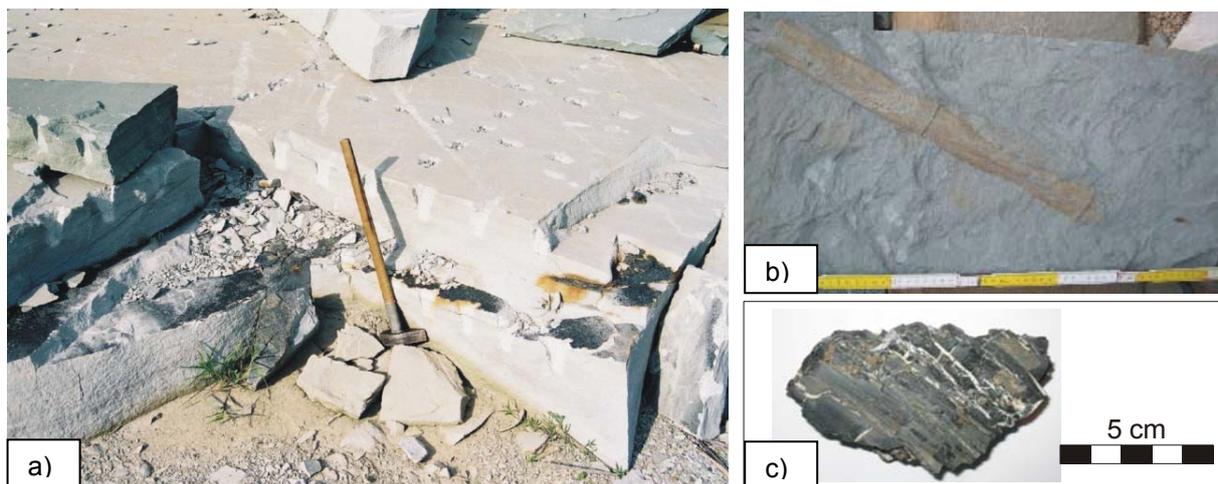


Abb. 7.39: Auftreten von organischem Material in den Abbausequenzen von Sandsteinen der Phu Kradung Formation. a) Flächendeckender Schichtbelag auf grauen Sandsteinen. b) Fossiles Holz in grünen Sandsteinen (Maßstab 50 cm). c) Handgroße Stücke von Lignit aus grauen Sandsteinen.

An vielen Stellen der Lagerstätte kann darüber hinaus ein scharfer Wechsel von grünem Sandstein zu gelblich-braunen Farbtönen beobachtet werden (Abb. 7.40). Aufgrund des gesonderten Auftretens der Verfärbungen entlang von Klüften und Schichtflächen darf angenommen werden, dass diese Änderungen in der Farbgebung auf eine oberflächennahe Alteration zurückzuführen ist, die durch zirkulierende Lösungen innerhalb des Kluftsystems hervorgerufen wurde. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass Verfärbungen bei dünnbankigen Schichten bis zu einer Entfernung von etwa 20 cm, bei dickbankigen Schichten bis zu einer Entfernung von 100 cm von einer Schicht- bzw. Kluftfläche auftreten können. Folglich sind trotz der teilweise mächtigen Schichten hohe Abbauverluste bei der Produktion handbehauener Bodenplatten oder eine Minderung der Rohblockqualität möglich, da diese Gesteinspartien nicht den dekorativen Anforderungen des Rohmaterials genügen.

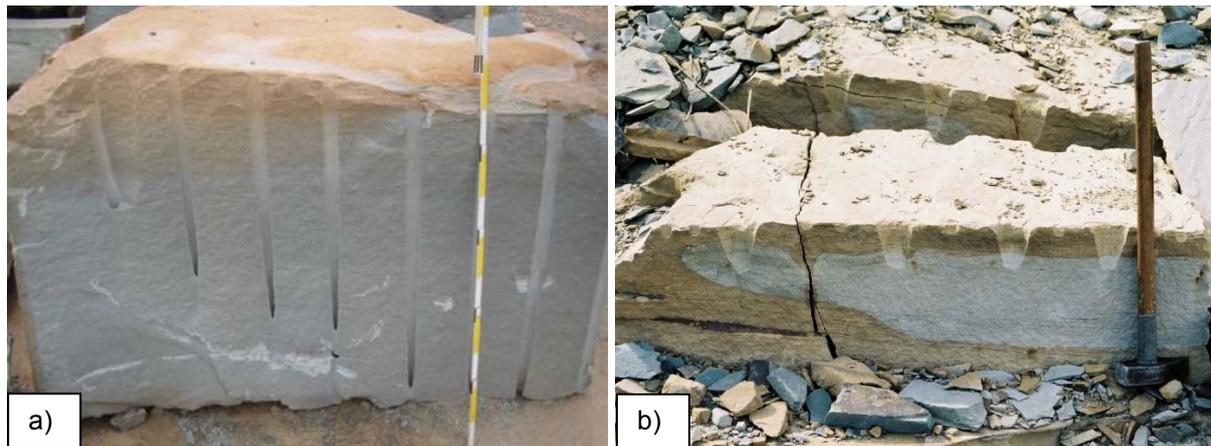


Abb. 7.40: Verfärbungen in grünen Sandsteinen durch oberflächennahe Alteration entlang der Schicht- und Kluftflächen. Die Verfärbungen bedingen dabei erhebliche Qualitäts- bzw. Materialverluste. a) Minderung der Blockqualität bzw. Blockgröße in Sandsteinen aus dickbankigen Schichten. b) Materialverluste beim Abbau von Bodenplatten in dünnbankigen Schichten.

Für das Vorkommen grüner Sandsteine in der Phu Kradung Formation scheinen ebenfalls der Eisengehalt des abgelagerten Detritus sowie die einwirkenden Umweltbedingungen verantwortlich zu sein. Die grünen Sandsteine weisen einen erheblichen Anteil an Fe-Verbindungen auf, wobei das Verhältnis $\text{FeO} : \text{Fe}_2\text{O}_3$ deutlich höher ist als beispielsweise bei den oxidierten Sandsteinen der Khok Kruat Formation. Eisen liegt damit überwiegend in reduzierter Form vor. Während also in den zuvor beschriebenen Rotsedimenten die Farbe aus der Oxidation von Eisenverbindungen resultiert, kann die Farbe der grünen Sandsteine aus reduzierenden Bedingungen zum Zeitpunkt während oder nach der Ablagerung hervorgegangen sein. Das dazu notwendige Reduktionspotential ergibt sich nach Friend (1966) aus den zahlreichen Pflanzenresten, die in das Material eingebettet sind. Der hohe Anteil FeO ist zunächst verwunderlich, da reduziertes Eisen im Allgemeinen löslich ist und schnell aus dem Gesteinsverband ausgewaschen wird. Ein Grund für die hohen Konzentrationen von FeO ergibt sich wahrscheinlich aus der geringen Löslichkeit der Verbindung bei pH-Werten >7.0 (Kolthoff et al. 1969). Dass ein solches Milieu zum Zeitpunkt der Reduktion herrschte, ist in den erhöhten Carbonatanteilen des grünen Sandsteins in der Phu Kradung Formation dokumentiert. Im Verlauf der Reduktion konnte Fe^{3+} demnach in Fe^{2+} überführt werden, das aufgrund der geringen Löslichkeit im Sediment zurückgehalten und wahrscheinlich direkt in die Tonminerale Illit und Chlorit eingebaut wurde. Ähnliche Prozesse in Sandsteinen, deren Farbe durch Reduktion hervorgeht, werden von McBride (1974) und Thompson (1970) beobachtet.

McBride (1974) erkennt in klastischen Sequenzen der Difunta Gruppe in NE Mexiko, dass sowohl rote als auch grüne Sandsteine durch eine diskordant zur sedimentären Schichtung verlaufende Farbgränze getrennt sind und folgert u. a. daraus einen diagenetischen Ursprung der Färbung. Grüne Sandsteine könnten also eventuell durch Reduktion aus ursprünglich roten Sandsteinen hervorgegangen sein. In der nahen Umgebung des grünen Sandsteinvorkommens PC-Green stehen ebenfalls rote Sandsteine an (pers. Mitteilung S. Kiangsantia), deren Kontakt zu den grünen Sandsteinen leider nicht beobachtet werden konnte. Eine Behauptung, dass grüne Sandsteine der Phu Kradung Formation in Thailand in

gleicher Weise durch Reduktion ursprünglich roter Sandsteine hervorgegangen sind, lässt sich daher nicht eindeutig belegen. Dennoch zeugen die relativ hohen Fe_2O_3 -Werte im grünen Sandstein von einer signifikanten Menge an oxidiertem Eisen im ursprünglichen Ausgangssediment vor einer Reduktion.

Die Beziehung zwischen den Farben weiß, braun und gelb scheint sehr komplex, da beispielsweise in einzelnen Lagerstätten braunes Material im Hangenden und Liegenden der weißen Sandsteine auftritt und gelbe Sandsteine lateral in weiße Sandsteine übergehen (Abb. 7.41a). Gelegentlich kann dabei auch eine Verzahnung der Farben beobachtet werden (Abb. 7.41b). Besonders die Art der horizontalen Verzahnungen lässt die Schlussfolgerung zu, dass es sich bei den Färbungen der Phra Wihan Sandsteine um sekundäre Alteration handelt, da ansonsten deutlich regelmäßigere Strukturen beobachtet werden müssten.

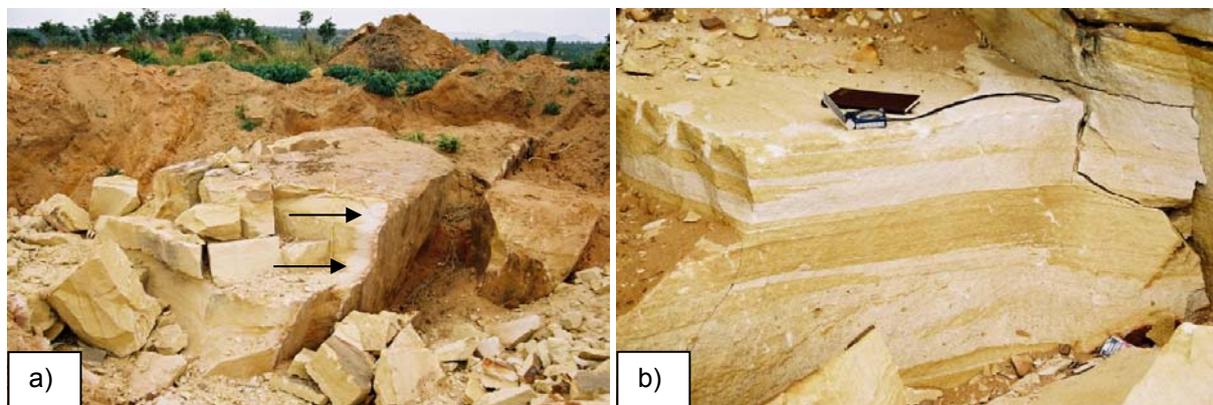


Abb. 7.41: Verteilung von gelben und weißen Farben in den Sandsteinen der Phra Wihan Formation. a) Aufschluss eines ursprünglich gelben Sandsteines mit lateralem Übergang zu weißen Sandsteinen in Richtung der Klufflächen (Pfeile). Die Höhe des Abbauproduktes im Aufschluss beträgt etwa 1.50 m. b) Alternierende weiße und gelbe Farben mit lokal verzahnten Grenzen.

Gelbe bzw. braune Sandsteine könnten die ursprüngliche Farbe der abgelagerten Mineralkörner repräsentieren. Diese hätten demnach lediglich geringe Alterationserscheinungen während des Transports erfahren, die sich durch das Auftreten von Goethit bzw. Limonit als Sekundärminerale und färbende Komponente im Kornverband ausdrücken. Bei einer post-diagenetischen Alteration des Materials unter reduzierenden Bedingungen, ähnlich wie bei Gesteinen der Phu Kradung Formation und der Khok Kruat Formation, könnte eine Bleichung der ursprünglich braunen und gelben Sandsteine eingetreten sein, die zur Ausbildung des weißen Sandsteins geführt hat.

Grundsätzlich wäre es möglich, dass die weiß-braun-gelbe Farbverteilung allein aus differenzierten Reduktions- und Oxidationspotentialen der Sequenzen während ihrer Ablagerung hervorgehen. Da jedoch mehrheitlich diskordante und verzahnte Farbwechsel dokumentiert sind, kann diese Hypothese nicht überzeugen. Die unterschiedlichen Farben gehen daher unter Umständen auf reduzierende Lösungen zurück, die im Zuge der Kompaktion aus unterlagernden Kalksteinen (siehe Heggemann 1994) oder benachbarten marinen Einheiten ausgetrieben wurden und in bereits oxidierte, auflagernde Sedimente eindringen konnten (Abb. 7.42). Die Lösungen führten anschließend zu einer Färbung (rot zu

grün) bzw. Bleichung (gelb-braun zu weiß) der Sandsteine. Möglicherweise waren die Lösungen reich an gelöstem Ca^{2+} , so dass es zu Beginn des Aufstiegs der Fluide zu Carbonatausfällungen im Porenraum grüner Sandsteine kam. Die Vorstellung würde auch die relativ einheitliche Färbung der jüngeren roten Sandsteine erklären, die entweder zum Zeitpunkt der Fluidmigration noch nicht abgelagert waren oder außerhalb des Einflussbereiches der Lösungen lagen. Die auffällige Bleichung gelber Sandsteine entlang von Klüften sowie die vollständige Ausbildung weißer Sandsteine im Einflussbereich einer großen Störung sprechen dabei für das Eindringen von Fluiden entlang von Diskontinuitäten. Das hier vorgeschlagene Modell geht im Grundansatz auf eine Theorie zur Verbreitung verschiedener Farben in der Juniata bzw. Bald Eagle Formation (Pennsylvania/USA, siehe Thompson 1970, Horowitz 1971) sowie in der Difunta Gruppe (NE Mexico, siehe McBride 1974) zurück. Letztere stellen ähnlich wie die Sandsteine der Khorat Gruppe eine etwa 4 km mächtige, klastische Sequenz einer Beckenstruktur dar. Die Gesteine der Difunta Gruppe setzten sich neben roten und grünen Silt- bzw. Tonsteinen aus purpur- und oliv-farbenen sowie aus braunen und grauen klastischen Einheiten zusammen.

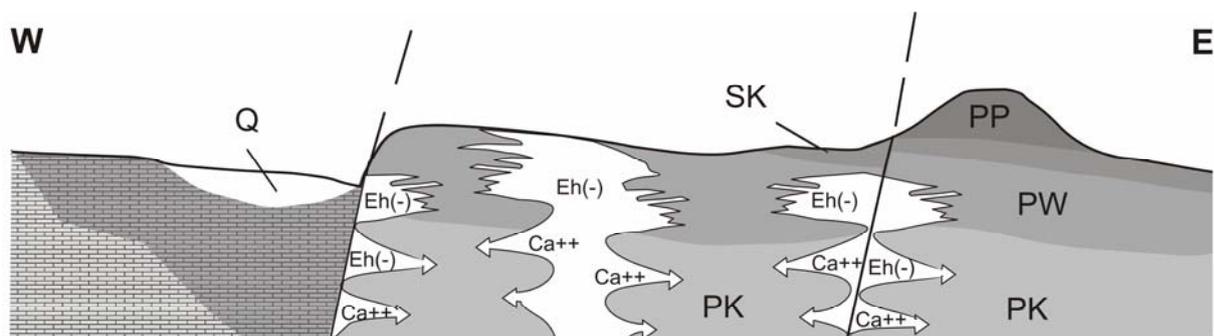


Abb. 7.42: Aufstieg reduzierender, Calcium-führender Lösungen in die Phu Kradung und Phra Wihan Formation der Khorat Gruppe. Die Vorkommen roter Sandsteine der Khok Kruat Formation befinden sich dabei weiter E' außer Reichweite der migrierenden Lösungen (vgl. Abb. 6.3). Abkürzungen: PK = Phu Kradung Formation, PW = Phra Wihan Formation, SK = Sao Khua Formation, PP = Phu Phan Formation, Q = Quartär, Eh(-) = Reduktion, Ca^{++} = Carbonatausfällungen.

Im Anschluss an die Bleichung gelber und brauner Partien zu weißen Sandsteinen muss es erneut zu einer Infiltration von Lösungen über das Kluftsystem gekommen sein, da weiße Sandsteine im Bereich von Störungen, Kluft- und Schichtflächen einen teilweise massiven Belag an Eisenoxiden aufweisen (Abb. 7.43a). In der näheren Umgebung treten Verfärbungen in Form von Liesegang'schen Fällungsringen auf, die sich periodisch von einer Trennfläche über eine Distanz von mehreren Dezimetern in das Innere des Gesteins ziehen (Abb. 7.43b). Stellenweise können innerhalb der Liesegang'schen Ringe neben rot-violetten Farben auch gelblich-braune Farbtöne auftreten. Die Farbstrukturen verändern das ursprüngliche Dekor der weißen Sandsteine derart signifikant und häufig, dass sich eine eigenständige Sortendefinition (Rainbow, Abb. 7.43b) für diese Varietät etablieren konnte. Eine mögliche Ursache für das Auftreten der Verfärbungen könnte auf den Einfluss von Tektonik zurückzugehen, die zunächst eine Zufuhr von Lösungen in das Kluftsystem und eine Imprägnierung der Kluftflächen mit Eisenverbindungen ermöglichte. Über die Zirkulation

von Lösungen im Kluftsystem hinaus erfolgte dann durch Wechselwirkungen an den Grenzflächen des Mineralinventars eine Fluid-Migration in das Rahmengestein. Je nach tektonischer Beeinflussung scheint ein Teil der Lösungen auch über Trennflächen in Bereiche fernab der Störungszonen gewandert zu sein. Dies führte zur Ausfällung von Eisenoxiden in Gesteinseinheiten ohne direkte tektonische Überprägung.

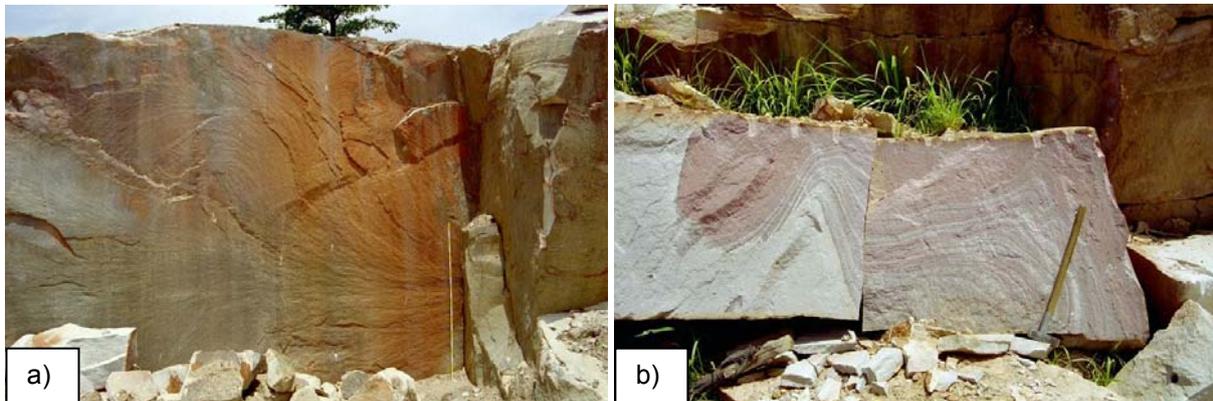


Abb. 7.43: Eisenausfällungen in der Lagerstätte der weißen Sandsteine. a) Großflächiger Eisenbelag auf Kluftflächen mit Besenstrukturen. Maßstab 2 m. b) Ausbildung Liesegangscher Ringe im weißen Sandstein durch das Eindringen eisenhaltiger Lösungen entlang von Kluftflächen. Die häufige Ausbildung dieser Farbstrukturen führte zu der individuellen Sortendefinition Rainbow.

Um die Farbausfällung der Phra Wihan Sandsteine in der Tiefe zu erkunden, müssten Bohrungen niedergebracht werden, anhand derer die Entwicklung der Gesteine im stratigraphisch Liegenden beurteilt werden könnten. Grundsätzlich sollte diese Erkundung in der näheren Umgebung vertikaler Trennflächen erfolgen, um dabei potentiell abbaubares Material nicht zu beschädigen. Im Rahmen der vorliegenden Lagerstättenspezifika ist dies jedoch nur gültig, um die Ausbildung der Variante Rainbow zu erfassen, da diese vornehmlich an Trennflächen gebunden ist (vgl. Abb. 7.43b). Zur Verifizierung weißer Sandsteine in tieferen Einheiten müssten die Bohrungen jedoch an anderer Position abgeteuft werden, was in der differenzierten Farbverteilung der Varietät begründet ist. Die weißen Sandsteine sind zwar gelegentlich entlang von Klüften ausgebildet, können dabei jedoch lateral nach wenigen Dezimetern in gelbe Varietäten übergehen (vgl. Abb. 7.41a).

Um eine möglichst sichere Prognose zur Farbentwicklung weißer Sandsteine im Untergrund zu erhalten, sollten Bohrkerne daher im Abstand von mehreren Metern zu vertikalen Trennflächen entnommen werden. Die Färbung sowie die Verbreitung einzelner Sandsteinfarben in den Abbausequenzen ist ein entscheidender Faktor für die Gewinnung sowie für die Exploration weiterer Sandstein-Lagerstätten. Falls die Färbung der Sandsteine auf reduzierende Lösungen zurückzuführen ist, wäre ein zielorientiertes Vorgehen beim Ausbau und bei der Erkundung von Sandstein-Lagerstätten in der Region NE-Thailand nicht möglich, da ein Verteilungsmuster der Farben aufgrund der wohl unkontrollierten Fluidmigration in Abhängigkeit von Permeabilität und Porosität sowie Trennflächensystemen der Abbauformationen nur schwer prognostiziert werden kann. Lediglich für weiße

Sandsteine könnte angenommen werden, dass die Vorkommen entlang der NNW-SSE-streichenden Störungszonen gebunden auftreten.

7.3.4.2 Tonakkumulationen und Mangan-Ausfällungen

Die Sandsteinvorkommen sind mehrheitlich durch das Auftreten von Tonmineralen gekennzeichnet. Ein Großteil dieser Tonminerale ist dabei auf Sedimentationsprozesse zurückzuführen, die eine Akkumulation feiner Tonlagen zwischen den gröberen Sandschichten erlauben. Im Aufschluss sowie auf bearbeiteten Fertigprodukten zeichnen sich diese Tonlagen oft als relativ dunkle Horizonte ab und tragen auf diese Weise wesentlich zum Dekor der Sandsteine bei. Besonders den braunen und gelben Sandsteinen der Phra Wihan Formation sowie den roten Sandsteinen der Khok Kruat Formation verleihen flächenhafte Einschaltungen von Tonmineralen oft eine sehr ansprechende äußere Erscheinung.

Vor dem Hintergrund technologischer Aspekte ist die Ausbildung von Tonhorizonten ambivalent zu beurteilen. Einerseits können sich durch den Materialwechsel von Ton zu Sand vorteilhafte Abbaubedingungen ergeben, da ein relativ leichtes Lösen der Gesteinspakete entlang der sedimentologischen Grenzflächen erfolgen kann. Derselbe Effekt tritt bei grünen und roten Sandsteinen auf, die durch einen hohen Anteil an Biotit auf den Schichtflächen gekennzeichnet sind. Der hohe Glimmergehalt auf den Flächen führt zu einer sehr guten Spaltbarkeit der Sandsteine und begünstigt die Produktion spaltrauher Bodenplatten mit ausgesprochen ebener Oberfläche (Abb. 7.44a). Andererseits repräsentiert der Materialwechsel zwischen den feinkörnigen zu grobkörnigen Partikeln eine latente horizontale Trennschicht, die als Schwachstelle im Gesteinsverband gewertet werden muss (Abb. 7.44b).

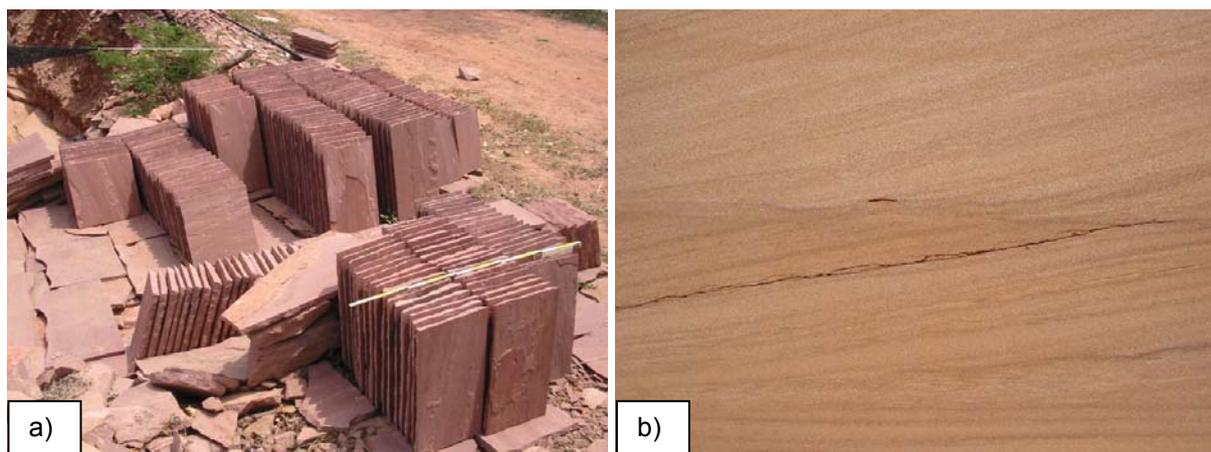


Abb. 7.44: Einfluss von Schichtsilikaten auf die Qualität der Sandsteine. a) Ein relativ hoher Anteil an Glimmern bewirkt u. a. bei roten Sandsteinen eine ausgesprochen ebene Oberfläche spaltrauher Platten. Der Einfluss der Schichtsilikate ist in diesem Fall also positiv zu bewerten. b) Tonanteile können sich dagegen nachteilig auf die Qualität auswirken, da es zu Brüchen entlang der Horizonte kommen kann.

Besonders auffällig treten Tonhorizonte in den gelben und braunen Sandsteinen der Phra Wihan Formation sowie in den roten Sandsteinen der Khok Kruat Formation in Erscheinung, wo sie als Lagerklüfte im Abstand weniger Dezimeter bis Meter den Abbau als auch die Weiterverarbeitung des Materials negativ beeinflussen. Die wohl umfangreichste Auswirkung der Tonlagen besteht wohl darin, dass die Größe qualitativ hochwertiger Rohblöcke gegen das Lager deutlich verringert wird, wenn beispielsweise Bohrungen beim Ausbringen der Rohblöcke über eine oder mehrere solcher latenten Trennflächen hinaus abgeteuft werden. Die beim Bohren bzw. Sprengen induzierten Druck- und Stoßwellen bewirken dabei häufig eine Öffnung der schwach gebundenen Tonhorizonte, so dass sich Teile des Rohblocks während der anschließenden Brechverfahren lösen können. Bleiben die Form und die Größe der Blöcke nach dem Ausbringen erhalten, ist dennoch eine Produktion großflächiger Bauteile über diese Gefügeelemente hinweg fragwürdig, da das Rohmaterial potentielle Bruchstellen aufweist, die erhebliche Probleme für die Weiterverarbeitung der Blöcke mit sich bringen. Durch die teilweise sehr starken Vibrationen während des Sägeprozesses ist bei geringmächtiger Plattenstärke ein Zerbrechen der Fertigwaren entlang von potentiellen Bruchstellen vorherzusehen. Gerade in zahlreichen Brüchen der Phra Wihan Formation kann oftmals eine Missachtung der Lagerklüfte beim Abbau beobachtet werden. Sollten die Sandsteine für Bauprojekte mit großformatigen Platten in Erwägung gezogen werden, müssten im Abbaugbiet Probebohrungen niedergebracht werden, so dass anhand des Bohrkernmaterials der Einfluss der Verwitterung auf diese Gefügeelemente erfasst und beurteilt werden kann. Der Einfluss von Tonlagen auf den Abbau und die Weiterverarbeitung wird in Abbildung 7.45 anhand von Praxisbeispielen veranschaulicht.

Die gelben, braunen und roten Varietäten sind neben Tonhorizonten durch Einschaltungen von Tonlinsen und Tongallen charakterisiert (Abb. 7.46), die darüber hinaus auch kennzeichnend für weiße Sandsteine sind. Tonlinsen entstehen durch syn-diagenetische Prozesse, wenn flächenhaft abgelagerte Tonpartikel kurzweilig noch einmal bewegt bzw. aufgearbeitet und anschließend im schwach verfestigtem Sediment wieder abgelagert werden. Die Größe der Einschaltungen, die ausschließlich schichtparallel auftreten, liegt im Zentimeterbereich. Obwohl Tonlinsen keine durchgehenden Trennflächen zwischen den Sandsteinschichten darstellen, können sich die Elemente nachteilig auf den Materialabbau auswirken. Bei einer hohen Konzentration dieser störenden Elemente in den gewonnenen Rohblöcken repräsentieren Tongallen ein wesentliches Qualitätskriterium, welches die Sandsteine in ihrer Wertigkeit entsprechend herabstuft.

Lokal erscheinen bei gelben und braunen Sandsteinen schwarze Mangan-Ausfällungen auf den Sedimentflächen, die sowohl die Partien mit starker Kreuzschichtung als auch Bereiche mit Horizontalschichtung betreffen. Partien mit schwarzen Mangan-Ausfällungen treten lokal auf und müssen daher beim Abbau individuell erkannt werden. Die Anreicherungen wirken sich dabei entscheidend auf die Weiterverarbeitung aus. Bei Platten mit einer Schnittrichtung gegen das Lager bleibt das dekorative Bild des Sandsteins oftmals erhalten. Bei der Produktion von Platten mit einer Schnittrichtung parallel zum Lager werden die dunklen Verfärbungen dagegen häufig noch erheblich betont, da in diesem Fall die gesamte Schichtfläche das Dekor bestimmt.

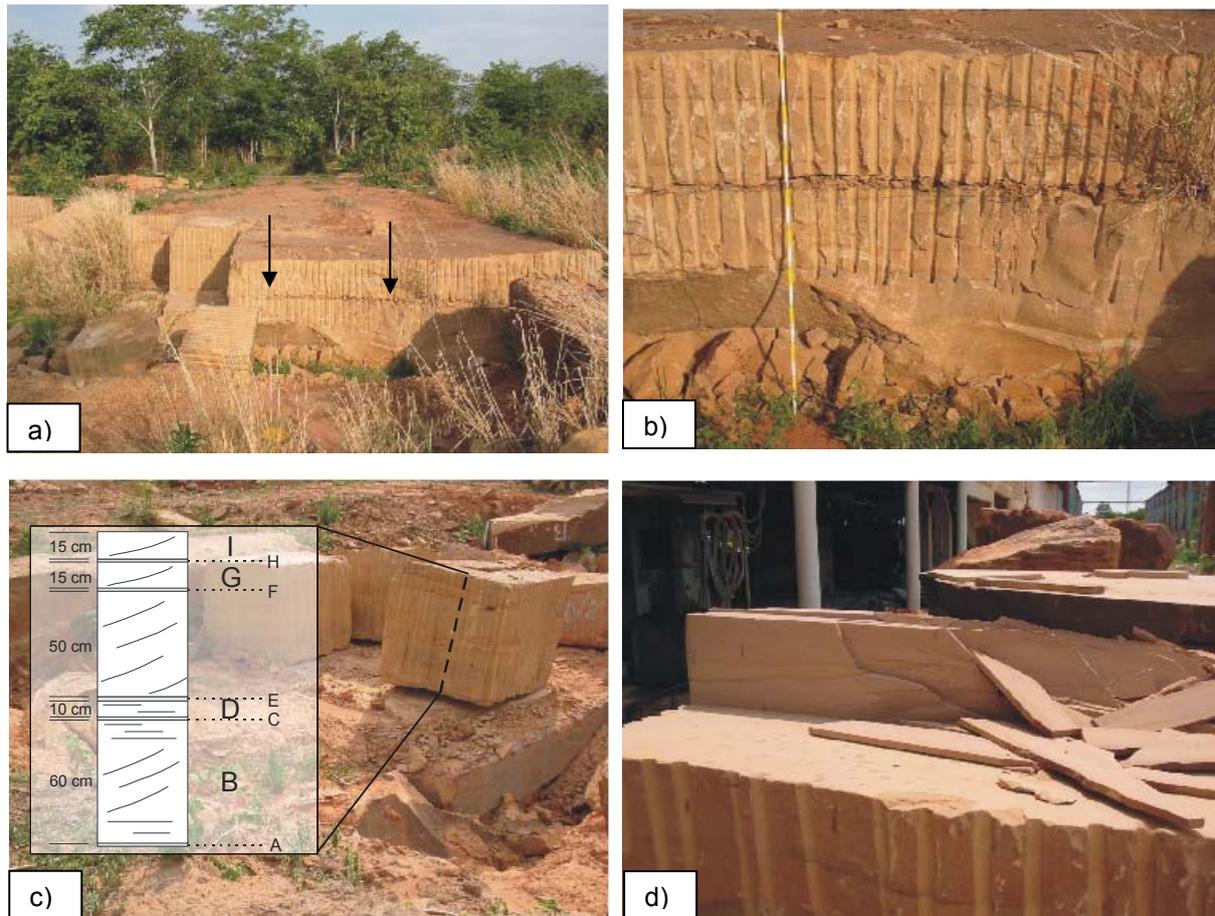


Abb. 7.45: a) Nahezu kluffreier Sandsteinkörper, den jedoch eine dichte Abfolge mehrerer Tonhorizonte kennzeichnet (Pfeile). b) Werden beim Ausbringen der Rohblöcke Bohrungen über diese Tonhorizonte hinweg abgeteuft, ist mit einer erheblichen Reduzierung der Blockgrößen zu rechnen. Bei dem hier abgebildeten Beispiel hätte zunächst ein Abbau bis auf den Tonhorizont erfolgen müssen, um anschließend günstigere Voraussetzungen für die Materialgewinnung im Liegenden der Lagerkluff zu erhalten. c) Block mit alternierenden tonigen und sandigen Schichten. Abschnitte A, C, E, F, H: Sedimentäre Lagen mit Tonmineralen, Eisenoxiden und Manganoxiden; teilweise verwittert und als Krusten ausgebildet. Abschnitte B, D, G, I: Kompakte Sandsteine mit horizontaler und intensiv ausgebildeter Kreuzschichtung; wenig Tonminerale; lokal schwarzer Belag der Flächen im Bereich der Kreuzschichtung. Die eingeschalteten Tonlagen verhindern in diesem Beispiel die Produktion großformatiger Bauteile über 60 cm gegen das Lager. d) An Tonlagen und Klüften gebrochene Sandsteinplatten während der Verarbeitung.

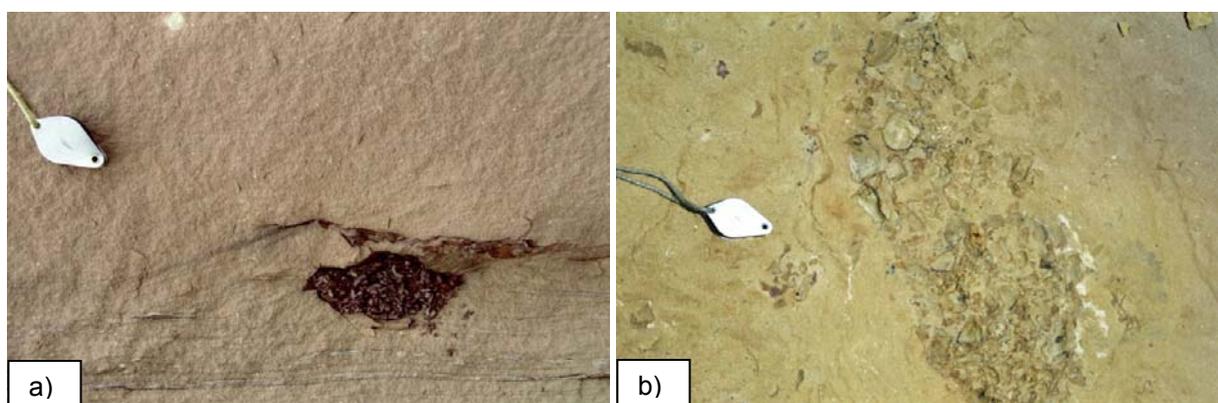


Abb. 7.46: Tonlinsen in Sandsteinen. a) Einzelne Tonlinse in rotem Sandstein. Blickrichtung parallel zur Schichtfläche. b) Ansammlung von Tonlinsen in gelbem Sandstein. Blickrichtung senkrecht zur Schichtfläche.

Als Konsequenz der derzeitigen Abbauführung, die durch massive Toneinschaltungen sowie durch signifikantes Auftreten von Mangan-Ausfällungen in den Rohblöcken diktiert wird, ergeben sich deutliche Einschränkungen für eine export-orientierte Materialgewinnung. Da diese qualitativ geringwertigen Blöcke einem potentiellen Abnehmer auf dem internationalen Markt hohe Verluste einbringen würden, sollten Blöcke mit entsprechenden Qualitätsmerkmalen nur vor Ort in Thailand verarbeitet werden.

7.3.4.3 Silifizierung der Sandsteinvorkommen

Ein wesentliches Merkmal der untersuchten Sandsteinvorkommen ist der hohe Grad der Verkieselung, die sich sowohl bei quarzreichen Sandsteinen der Phra Wihan Formation als auch bei feldspatreichen Sandsteinen der Phu Kradung und Khok Kruat Formation durch silikatische Anwachsäume auf den einzelnen Mineralkörnern bemerkbar macht. Die Anwachsäume sind in allen Varietäten für die Bindung des Materials verantwortlich (vgl. Kap. 4.3). Die Verkieselung könnte auf post-diagenetische, hydrothermale Einflüsse zurückzuführen sein, wie etwa auf die Zufuhr silikatischer Lösungen entlang tektonischer Störungsbahnen. Die Annahme geht auf die Beobachtung in der Lagerstätte S-White zurück, in der Rohblöcke u. a. aus dem Bereich einer sehr ausgeprägten Störungszone (vgl. Kap. 6.3.3) gefördert wurden. Bei einer vorläufigen Beurteilung dieser bereits gebrochenen Rohblöcke treten merkbare Qualitätsunterschiede auf, die auf einen unterschiedlichen Grad an Silifizierung hindeuten. Während einige Blöcke weißer Sandsteine scharfkantig brechen und einen hellen Klang beim Anschlagen erzeugen, zeigen andere Blöcke derselben Lithologie weniger auffällige Bruchkanten und einen dumpfen Klang beim Anschlagen. Ein solches Phänomen beschreiben v. Gehlen (1956) und Koch et al. (2003) für Sandsteine des Keupers im Raum Nürnberg (Deutschland). Die Gesteine wurden im Einflussbereich eines Störungssystems stark hydrothermal silifiziert und u. a. wegen der daraus resultierenden Verwitterungsresistenz als Naturwerkstein abgebaut (so genannter Wendelsteiner „Quarzit“).

Die tektonischen Bruchzonen und deren Beziehung zum Rahmengestein lassen jedoch vermuten, dass die Verkieselung der thailändischen Sandsteine prä-tektonisch, vermutlich syn-diagenetisch, erfolgte. Diese Hinweise ergeben sich exemplarisch aus der tektonischen Überprägung des weißen Sandsteins, die als steil einfallende Bruchzone in der Lagerstätte erkennbar ist (vgl. Kap. 6.3.4). Der weiße Sandstein ist im Einflussbereich der Störung stark kataklastisch überprägt (Abb. 7.47), wobei gerade die sehr spröde, kataklastische Reaktion mit scharfen, muscheligen Absplitterungen auf eine erhebliche prä-tektonische Verkieselung des Gesteins hindeutet. Eine prä-tektonische Verkieselung der Einheiten könnte gleichfalls für die weiten Kluftabstände (3.1 m, 4.9 m; vgl. Tab. 6.2) zu beiden Seiten der Störungszone verantwortlich sein, da eine Störungszone mit vorliegendem Ausmaß wohl zu deutlich geringeren Abstandsweiten in weniger resistantem Material geführt hätte.

Da zudem keine Anhaltspunkte für Fluidbahnen aus der petrographischen Gesteinsanalyse (Polarisations- und Kathodolumineszenzmikroskopie) hervorgehen, erscheint eine Silifizierung durch Drucklösung während der Diagenese am wahrscheinlichsten. Im Rahmen

dieser Lösungsprozesse kam es zu einer Anreicherung des Porenwassers mit SiO_2 , das bei Übersättigung der Lösung auf den Mineraloberflächen ausgeschieden wurde. Dennoch kann nicht ausgeschlossen werden, dass Teile der Lagerstätte einer syn- oder post-tektonischen Verkieselung unterlagen (siehe dazu auch Kap. 7.3.4.5).



Abb. 7.47: Scharfkantige, muschelige Absplitterungen des weißen Sandsteins (Pfeile) im Einflussbereich einer Störungszone. Erläuterungen im Text dieses Kapitels.

7.3.4.4 Generelle Prognosen zur Lagerstättenerweiterung in den Sandsteinvorkommen

Die genaue Kenntnis über die Ablagerungsbedingungen und den geologischen Aufbau der einzelnen Sandsteinsequenzen ist eine entscheidende Voraussetzung, die Abbausituation der Vorkommen und letztlich auch ihre Größe und Dimensionen zu charakterisieren. Wegen der flächenhaften Ausbreitung des klastischen Materials während der Ablagerung sind Sandstein-Lagerstätten nur in zwei Dimensionen parallel zur sedimentären Schichtung erweiterbar (vgl. Kap. 7.3.1). Sowohl im Hangenden als auch im Liegenden wird das Abbauprodukt allgemein durch benachbarte, nicht-bauwürdige Einheiten begrenzt.

Der sehr regelmäßige horizontale Aufbau grüner Sandsteine, der nur vereinzelt Anzeichen von Kreuzschichtung aufweist, deutet zusammen mit der relativ kleinen Korngröße auf ein sehr ruhiges Ablagerungsmilieu im Bereich einer ausgedehnten Schwemmebene fernab vom Liefergebiet hin (Heggemann 1994). Die Fazies ist charakteristisch für Gesteine der unteren Phu Kradung Formation, die im Hangenden mit scharfem Kontakt in die Einheiten der oberen Phu Kradung Formation übergeht, deren Material als fluviale Sandsteinabfolgen solitärer Flüsse interpretiert werden (Heggemann 1994, Mouret et al. 1993) und damit auch Kreuzschichtungen im Dekor aufweisen könnten. Grüne Sandsteine mit horizontaler Schichtung sollten daher in alle Richtungen parallel zur Schichtbasis innerhalb der unteren Phu Kradung Formation angetroffen werden. Die Lagerstätten könnten bei entsprechender Abstandsverteilung der Klüfte eventuell in Richtung des Khorat-Plateaus bis zum Beginn der oberen Phu Kradung Formation erweitert werden, ohne dass sich Veränderungen in der Struktur der Sandsteine ergeben. Limitierender Faktor dürfte allerdings die Farbe des

Materials sein, die im Abbaubereich zwischen grün und grau variieren kann sowie in Richtung des Khorat-Plateaus in Rottöne übergehen kann (vgl. Kap. 7.3.4.1).

Die Rotsedimente der Khok Kruat Formation demonstrieren ebenfalls mit ihrem fast ausschließlichen horizontalen Aufbau mächtige Ablagerungen einer weiten Schwemmebene, die das gesamte Khoratbecken erfasst hatte. In diesem ruhigen Ablagerungsmilieu kam es flächenhaft zur vertikalen Akkumulation von Ton, Silt und Feinsanden (Heggemann 1994), so dass Sandstein-Lagerstätten der Khok Kruat Formation wie die Lagerstätten der Phu Kradung Formation durch relativ homogene Ablagerungsbedingungen gekennzeichnet sind, welche die gleichen Konsequenzen hinsichtlich der Verbreitung des Lagerstättenmaterials nach sich ziehen.

Das Modell einer sedimentären Schichtlagerstätte, die innerhalb einer Abbausequenz lateral in alle Richtungen erweiterbar ist, reicht jedoch nicht aus, um die Geometrie von Lagerstätten in der Phra Wihan Formation zu erfassen. Die fluviatile Architektur der Phra Wihan Sandsteine unterscheidet sich deutlich von der der Phu Kradung und Khok Kruat Sandsteine, da die Lithologien in sehr hohem Maße auch durch Kreuzschichtung gekennzeichnet sind. Kreuzschichtung repräsentiert dabei die Ablagerung in verzweigten bis mäandrierenden Flusssystemen (Heggemann 1994). Die Ablagerungsbereiche der kreuzgeschichteten Sandsteine konzentrieren sich demnach nicht auf ruhige Schwemmebenen wie bei den grünen und roten Sandsteinen, sondern auf einzelne Strömungsrinnen, die zu beiden Seiten parallel zur Fließrichtung begrenzt sind. Eine Modellvorstellung ähnlich der grünen und roten Sandsteine würde also auf die kreuzgeschichteten weißen, gelben und braunen Sandsteine nicht mehr zutreffen, da sich diese Vorkommen lediglich auf relativ schmale Kanäle konzentrieren und die Abbaurichtung durch den Verlauf des Paläo-Flussbettes bzw. durch die Geometrie des Stromlinienkörpers vorgeschrieben wird. Sowohl in lateraler als auch in vertikaler Richtung innerhalb der Lagerstätten muss daher mit Strukturänderungen im Dekor kreuzgeschichteter Sandsteine gerechnet werden.

7.3.4.5 Lagerstättenerweiterung bei Sandsteinen in Bezug auf die Optimierung technischer Gesteinseigenschaften

Aus den gesteintechnischen Untersuchungen der Sandsteine geht hervor, dass das Verwitterungspotential der Gesteine entscheidend von deren Porosität sowie von individuellen mineralogischen Eigenschaften abhängig ist. Mineralogische Einflussfaktoren sind zum einen die silikatischen und silikatisch-carbonatischen Bindungen, die für einen stabilen Zusammenhalt der Mineralkörner und die damit verbundenen hohen Festigkeiten verantwortlich sind. Zum anderen sind dies die hohen Tonmineralgehalte, die durch die Ausbildung potentieller Bruchstellen und durch hygrische Dehnung die Festigkeiten reduzieren. Insgesamt lässt sich demnach für die thailändischen Sandsteine formulieren, dass verwitterungsresistentes Material dort gefördert werden kann, wo dichte, quarzitisches gebundene Sandsteine bei gleichzeitig niedrigem Tonmineralgehalt auftreten. Damit sind die entscheidenden Parameter definiert, die neben den Dekoreigenschaften von essentieller Bedeutung für den Abbau der Sandsteine sind.

Im Folgenden sollen nun Abbaustrategien aufgezeigt werden, anhand derer die technischen Eigenschaften der verschiedenfarbigen Sandsteinvarietäten optimiert werden könnten. Bei den mechanischen Untersuchungen der Phra Wihan Sandsteine stellte sich heraus, dass insbesondere der weiße Sandstein relativ niedrige Druckfestigkeiten im Vergleich zu stratigraphisch äquivalenten Varietäten aufweist. Sogar an geographisch identischen Positionen kann es zu deutlichen Qualitätsunterschieden kommen, was die Varietät Rainbow belegt, die zusammen mit weißen Sandsteinen in derselben Lagerstätte gewonnen wird. Die durchschnittliche Druckfestigkeit dieser Varietät liegt etwa 30 MPa über den entsprechenden Werten der weißen Sandsteine (vgl. Abb. 7.14a). An dieser Stelle drängt sich die Frage auf, ob nicht durch eine gezielte Lagerstätten erkundung in der Region auch weiße Sandsteine erfasst werden könnten, die ähnlich hohe Druckfestigkeiten wie Rainbow Sandsteine aufweisen.

Um diese Fragestellung zu klären, muss die Genese der Rainbow Sandsteine analysiert werden. Die lagerstättengeologischen Untersuchungen haben gezeigt, dass die Varietät Rainbow vorzugsweise im Bereich von Schichtflächen und vertikalen Kluft- oder Störungsflächen auftritt. Die besondere Farbausbildung erfolgte dabei unter dem Einfluss von infiltrierenden Lösungen. In diesem Zusammenhang wäre es möglich, dass die Lösungen SiO_2 führend waren und eine zusätzliche Verkieselung der bereits silifizierten weißen Sandsteine hervorgerufen haben. Die Vermutung ergibt sich aus dem höheren Quarzgehalt der Rainbow Sandsteine, der bei gleicher geologischer Vergangenheit weniger unterschiedlich ausfallen sollte. Darüber hinaus zeigen Rainbow Sandsteine eine deutlich niedrigere Porosität als die weißen Sandsteine, so dass vermutet werden kann, dass mit dem Eindringen von Lösungen und der Ausfällung pigmentierender Eisenverbindungen sowie SiO_2 ein Teil der Porosität geschlossen wurde. Unter dieser genetischen Annahme kann gefolgert werden, dass zumindest innerhalb des gleichen stratigraphischen Niveaus der Lagerstätte keine rein weißen Sandsteine mit stärkeren silikatischen Anwachs säumen und niedrigerer Porosität gewonnen werden können, da diese ansonsten hinsichtlich der Farbgebung zur Varietät Rainbow modifiziert worden wären.

Dennoch kann nicht ausgeschlossen werden, dass die weißen Sandsteine zumindest im Bereich der Störungszone sekundär silifiziert worden sind. In diesem Fall würden sich bei den weißen Sandsteinen Konsequenzen hinsichtlich der Abbauführung ergeben, da SiO_2 -reiche Lösungen entlang tektonischer Bewegungsbahnen nur lokal zu einer Verkieselung geführt hätten. Darüber hinaus könnten sich schon geringe kleinräumige Unterschiede in der faziellen Ausbildung auf gesteinsphysikalische Kennwerte und bautechnische Eigenschaften auswirken, da im Allgemeinen der Verkieselungsgrad mit zunehmender Entfernung zum Störungssystem abnimmt. Eine zuverlässige gesteintechnische Charakterisierung des Lagerstätteninventars wäre somit nur möglich, wenn unterschiedliche Bereiche des Abbaugbietes beprobt werden würden. Sinnvoll wäre in diesem Zusammenhang die selektive Beprobung entlang eines Profils senkrecht zum Streichen der Störungszone, wodurch eine eventuelle Zunahme oder Abnahme der Silifizierung im weißen Sandstein besser erfasst werden könnte. Unter der Annahme von sekundärer Verkieselung entlang von Störungszonen in der Phra Wihan Formation könnten theoretisch auch andere Farbvarietäten, wie beispielsweise die braunen und gelben Sandsteine, betroffen sein. In keiner der

Lagerstätten wurden jedoch entsprechend starke tektonische Überprägungen festgestellt, so dass der Einfluss von Störungen auf die gesteintechnischen Eigenschaften der Varietäten an dieser Stelle als weniger wahrscheinlich angesehen werden kann.

Höhere Druckfestigkeiten im weißen Sandstein ließen sich eventuell auch durch eine Porenraumreduktion infolge der Kompaktion erreichen, wobei allerdings tiefere Sohlen der Lagerstätte erschlossen werden müssten. In diesem Fall wäre jedoch nicht gewährleistet, dass die weiße Farbe der Sandsteine stabil bleibt, da bereits in anderen Lagerstätten Farbänderungen im Liegenden der weißen Sandsteine beobachtet wurden. Bei einer Erweiterung der Lagerstätte in die Tiefe wäre darüber hinaus fragwürdig, ob unter der Abnahme der Porosität auch noch die Rainbow Variante auftreten würde. Da die Ausbildung der Variante ganz offensichtlich an migrierende Lösungen gebunden ist, sollte die Migration und damit die spezifische Farbverteilung der Rainbow Sandsteine von definierten physikalischen Voraussetzungen der Gesteinseinheiten, also eventuell von einem besonderen Porenmilieu abhängig sein, das gegebenenfalls mit einer Reduktion des Porenraumes nicht mehr gegeben ist. Dass die Ausbildung der Rainbow Farben an ein bestimmtes Hohlraumvolumen gebunden ist, würde zusätzlich auch die Abwesenheit Liesegangscher Ringe in anderen Lagerstätten erklären, da hier deutlich niedrigere Porositäten kennzeichnend sind.

Grüne Sandsteine zeigen hohe Festigkeiten infolge der Carbonat-Füllungen des Hohlraums, da diese Mineralisationen die Bindung des Kornverbandes verstärken. Um eine grundsätzlich höhere Festigkeit der weißen, braunen und gelben Sandsteine zu erreichen, könnten nun Abbaugelände in der Phra Wihan Formation gezielt nach entsprechenden Voraussetzungen, also der Ausbildung von Subarkosen mit Carbonatanteilen, erkundet werden. Nach derzeitigem Erkenntnisstand liegen umfangreiche Carbonatanteile in den Sandsteinen der Phu Kradung Formation vor, die die Phra Wihan Formation unterlagert. In Verbindung mit dem oben angeführten Modell zur Farbverteilung, auf das auch die Carbonatausfällungen in den grünen Sandsteinen zurückgehen könnten, wären eventuell noch Carbonatanteile in den untersten Einheiten der Phra Wihan Formation am Kontakt zur Phu Kradung Formation möglich.

Aus den Untersuchungen von Heggemann (1994) geht hervor, dass einzelne Abschnitte der unterkretazischen Phu Phan Formation die Erkundungskriterien auf Subarkosen mit Calcitanteilen erfüllen würden. Die Phu Phan Sandsteine setzen sich aus bis zu 80 Vol.-% Quarz zusammen, der mit geringen Ton- und Feldspatgehalten durch einen signifikanten Anteil authigener, silikatischer Überwachsungen charakterisiert ist. Lokal können die Gesteine dieser Formation erhebliche Calcitanteile aufweisen (Heggemann 1994). Die ausgesprochen hohe Verwitterungsresistenz einiger Partien der Phu Phan Formation ist anhand der drei Inselberge in den Abbaugeländen dokumentiert, die von Gesteinen der Einheit aufgebaut werden (Abb. 7.48). Im Gegensatz zu der hypothetischen Annahme, in deren Rahmen die Carbonatanteile der Phu Kradung Formation auf infiltrierende Lösungen zurückgehen, gilt die Genese von Calcit in den Gesteinen der Phu Phan Formation als gesichert. Nach Heggemann (1994) erklären sich die Mineralisationen aus der Dynamik des Flussandes, der erosiv die Carbonatkrusten von Überschwemmungsebenen der liegenden Sao Khua Formation aufgearbeitet hat. Calcit wurde demnach während der Genese vom

Porenwasser aufgenommen und nach kurzem Transport in den Porenräumen als Zement ausgeschieden. Auffällig sind in diesem Zusammenhang auch Fluidbahnen, die nach Heggemann (1994) sowohl die Quarzkörner als auch die silikatischen Anwachssäume durchziehen und damit erst nach der Kompaktion und Diagenese der detritischen Komponenten entstanden sind. Die Elemente deuten damit auf post-diagenetische Ereignisse, was wiederum die Annahme sekundärer Silifizierung entlang von Störungen in der Phra Wihan Formation bekräftigen würde.



Abb. 7.48: Morphologisch hervortretende Serien der Phu Phan Formation. Die Ebene im Vordergrund wird u. a. bereits von den sehr kompakten Sandsteinen der Phra Wihan Formation gebildet, was deutlich den verwitterungsresistenten Charakter einiger Partien der Phu Phan Formation demonstriert. Die Abbildung zeigt den Berg Khao Kradon in dem Distrikt Sikhiu der Provinz Nakhon Ratchasima.

Die Qualität der Sandsteine kann ebenso verbessert werden, wenn in der Lagerstätte nachteilige Einflussgrößen wie etwa Tonlagen ausgeschlossen werden können. Hierdurch ließen sich wesentlich höhere Spalt- und Biegezugfestigkeiten sowie eine geringere hygri sche Dehnung erzielen. Um diesen Anforderungen nachzukommen, müssen bei dem Abbau und der Erkundung von Sandsteinen im Wesentlichen das Ablagerungsmilieu der Gesteine und die Herkunft des Detritus berücksichtigt werden.

Innerhalb eines mäandrierenden Flusssystemes sollten diejenigen Bereiche die höchsten Anteile an Tonmineralen aufweisen, in denen sich das Material unter dem Einfluss geringer Strömungsgeschwindigkeiten ablagern konnte. Hieraus ergibt sich, dass Sandsteine aus Bereichen der Fließrinne prinzipiell durch weniger Tonanteile charakterisiert sind als Sandsteine aus weiten, ausgedehnten Schwemmebenen. Eine relativ hohe Konzentration von Tonmineralen muss zudem in denjenigen Bereichen angenommen werden, die sich fernab vom Liefergebiet befinden. Diese Vermutung geht auf die Gesetzmäßigkeit zurück, dass feinkörniges Material in der Regel weiter transportiert wird als grobkörniges Material. Das Liefergebiet der Khorat Sandsteine wird im heutigen Laos vermutet (Heggemann 1994), so dass in den westlichen Bereichen des Khorat-Plateaus, in denen sich die derzeitigen Lagerstätten befinden, ein deutlich größeres Verhältnis von Ton zu Sand bestehen dürfte als in den östlichen Bereichen. Die Annahme eines zunehmenden Ton - Sand - Verhältnisses von E nach W wird von Heggemann (1994) für verschiedene Einheiten der Khorat Gruppe belegt. Bei der Erkundung auf Sandsteine mit höheren Zugfestigkeiten und/ oder geringerer

Feuchtesensibilität sollten demnach bevorzugt solche Gebiete Berücksichtigung finden, die sich weiter E' im Vergleich zu den bisherigen Lagerstätten befinden und die durch schnell fließende, anastomisierende Flusssysteme definiert sind.

7.4 Ansatzpunkte für die Prospektion weiterer Naturwerksteine in Thailand

Die Untersuchungen im Rahmen der vorliegenden Arbeit decken das Territorium Thailands nicht vollständig ab. Es ist jedoch zu vermuten, dass ähnliche Lagerstätten, wie hier behandelt und untersucht, auch in anderen thailändischen Regionen anzutreffen sind. An dieser Stelle sollen daher theoretische Ansatzpunkte für die Prospektion potentieller, weiterer Abbaugelände aufgezeigt werden, die gleichfalls für den Werksteinabbau von Bedeutung sein könnten. Dabei muss betont werden, dass es sich bei den „potentiellen Abbaugeländen“ lediglich um die geographischen Regionen handelt, in denen die angesprochenen Lithologien anzutreffen sein könnten. Über deren Eignung als Naturwerkstein sowie über die Qualität der Lagerstätten kann an dieser Stelle ohne weiterführende lagerstätten-geologische Untersuchungen selbstverständlich keine Aussage getroffen werden.

Die Verteilung der magmatischen Gesteine hat gezeigt, dass die granitoiden Varietäten konsequenterweise an die magmatischen Gürtel gebunden sind, die das Land N-S-streichend durchziehen. Das Auffinden potentieller Abbaugelände sollte damit ausschließlich an die Verteilung dieser Gürtel gebunden sein. Dies beinhaltet, dass die Linie Loei – Chachoengsao die E' Grenze für das Vorkommen granitoider Gesteine in Thailand demonstriert. Die Gebiete für eine regionale Prospektion auf beispielsweise Granite beschränken sich damit auf N-, W- und S-Thailand sowie auf die zentralen Bereiche des Landes. Weite Teile E-Thailands können unter diesen Voraussetzungen für die Prospektion von vornherein ausgeschlossen werden.

Aufgrund der Tatsache, dass der Eastern-, Central- oder Western Granite Belt durch ganz individuelle Merkmale gekennzeichnet ist, die das makroskopische Erscheinungsbild der Magmatite definieren, ergeben sich für die Prospektion auf Granitoide teilweise sehr gezielte Anhaltspunkte für das zu erwartende Dekor der Gesteine (Tab. 7.10).

Ein Beispiel: Die drei magmatischen Gürtel unterscheiden sich u. a. anhand der Korngröße, der Textur und der Mineralogie. Stehen bei der Erkundung etwa Lagerstätten mit porphyrischen Gesteinen im Vordergrund, die darüber hinaus Beimengungen dekorativer Granate enthalten sollen, entfallen bei der Erkundung sämtliche Vorkommen des Eastern Granite Belts, da diese Einheiten im Allgemeinen ein equigranulares Korngefüge aufweisen (Tab. 7.10). Obwohl die Lithologien des Western Granite Belts teilweise porphyrisch ausgebildet sind, weisen die Gesteine jedoch keine Granate in der mineralogischen Zusammensetzung auf (Tab. 7.10). In diesem Beispiel erfüllen also lediglich die Einheiten des Central Granite Belts die erforderlichen Erkundungskriterien, so dass diese Vorkommen damit ein vielversprechendes Ziel für detailliertere Studien liefern würden.

Tab. 7.10: Wesentliche strukturelle, mineralogische und texturale Merkmale der thailändischen Granitgürtel.

	Western Granite Belt	Central Granite Belt	Eastern Granite Belt
Häufig vorkommende Gesteinsarten	Equigranulare Hornblende-Biotit-Granite, porphyrische 2-Glimmer-Granite	Porphyritische Biotit-Muskovit-Monzogranite bis -Granite	Equigranulare Hornblende-Biotit-Granodiorite bis Granite, gewöhnlich mit kleineren Hornblende-Dioriten auftretend
Häufig vorkommende Nebengemengteile	Biotit, Ilmenit, Titanit, Allanit, Zirkon, Apatit	Biotit, Muskovit, Ilmenit, Monazit, Titanit, Allanit, Granat	In basischen Gesteinen: Hornblende, Biotit, in sauren Gesteinen: Biotit, Titanit, Allanit, Zirkon, Magnetit, Apatit
Strukturelle und texturale Besonderheiten	Megakristalle in 2-Glimmer-Graniten, xenomorphe Phenokristalle in Hornblende-Graniten	Foliation durch orientierte Ausbildung der Megakristalle, Großkristalle mit Biotit-Einschlüssen	Weniger deutliche Foliation, Ausbildung von Megakristallen

Für andere Lithologien wie beispielsweise Carbonatgesteine und Sandsteine lassen sich aufgrund von Gemeinsamkeiten, beispielsweise in der stratigraphischen Position der Einheiten, Ansätze für die Erkundung weiterer Abbaugelände ableiten. Wolfart (1987) berichtet von zahlreichen Aufschlüssen mittel- bis spät-paläozoischer „marmorisierter Kalksteine“ und massiver Marmore, die etwa 50 km S' von Lampang auftreten und dort auch als Werkstein abgebaut werden. Das Dekor der Gesteine ist nach Wolfart (1987) durch weiße bis graue Farben sowie Fossilien in den weniger rekristallisierten Partien gekennzeichnet. Da der Autor die Vorkommen der paläozoischen Donchai Gruppe zuordnet, könnte es sich bei den Gesteinen um Äquivalente der Marmore aus der Provinz Kamphaeng Phet handeln. Wäre dies der Fall, könnte die Donchai Gruppe eventuell größere Kapazitäten als bislang angenommen für den Abbau von Marmor bereithalten, da nicht auszuschließen ist, dass neben den Vorkommen in Lampang und Kamphaeng Phet noch weitere metamorphe Carbonatgesteine in den entsprechenden Sequenzen auftreten. Die Donchai Gruppe ist vorzugsweise N' der bislang bekannten Marmor-Lagerstätten vertreten und häufig an größere Batholithe wie den Fang Batholithen, den Khuntan Batholithen oder den Mae Sariang Batholithen in N- und NW-Thailand gebunden. Dennoch muss bei diesem Ansatzpunkt berücksichtigt werden, dass die Donchai Gruppe in N-Thailand auch in Form siliziklastischer Gesteine auftreten kann, womit keine Voraussetzungen mehr für das Vorkommen von Marmoren gegeben wären.

Der Abbau von Marmoren in Sukhothai belegt, dass Lagerstätten für Carbonatgesteine ebenfalls in karbonischen Serien auftreten können. Neben einer geringen Verteilung des Karbons in S-Thailand treten stratigraphisch äquivalente Gesteine großflächig in NW-Thailand entlang der Grenze zu Myanmar (Mae Hong Son Formation), im S' Sukhothai Foldbelt (Phrae Formation) und in dem N' Loei Foldbelt (Wang Sapung Formation) zutage. Darüber hinaus sind karbonische Gesteine in SE-Thailand E' von Chon Buri vertreten. Trotz der weiten Verbreitung des Karbons scheint lediglich die Phrae Gruppe im S' Sukhothai Foldbelt carbonatische Sequenzen aufzuweisen. Dheeradilok et al. (1992) berichten von Argiliten und Kalksteinen in dieser Formation, die zusammen mit Agglomeraten,

Konglomeraten und Grauwacken zur Ablagerung kamen. Die Autoren verweisen darüber hinaus auf die Tatsache, dass es keine Hinweise auf carbonatische Gesteine innerhalb des Karbons in S-Thailand gibt. Es zeichnet sich daher ab, dass ähnliche Marmore wie in Sukhothai vermutlich in keiner anderen Region mehr auftreten.

Die Vorkommen einiger permischer Marmore, wie beispielsweise BTD-White in Uttaradit, treten in nächster Nähe zu permo-triassischen Vulkaniten auf. Die Beobachtung deutet unter Umständen auf den Einfluss von Effusivgesteinen, die durch die Zufuhr hoher Temperaturen zur Genese der wirtschaftlich nutzbaren Marmore geführt haben. Permische Einheiten in Verbindung mit Vulkaniten erscheinen weiterhin im S' Sukhothai Foldbelt, innerhalb des Loei Foldbelts sowie in der Umgebung von Uthai Thani im zentralen Becken. Hinsichtlich einer genaueren Erkundung potentieller Ressourcen permischer Marmore lassen sich unter dieser Voraussetzung einige Regionen wie etwa große Teile im NW- und W-Thailands ausschließen. In diesen Gebieten treten allerdings die permischen Carbonatgesteine der Ratburi-Gruppe auf, zu der auch die grauen und roten Kalksteine in Sra Kaeo gezählt werden. Die Ratburi-Gruppe wird vielfach als dickbankig mit hellgrauen und blaugrauen Farben beschrieben (siehe z.B. Geologische Karte Thailand, Blätter NE 47-11, ND-47-4, ND 48-9), so dass sich hinsichtlich der Erkundung weiterer Kalksteinvorkommen beachtliche Möglichkeiten ergeben würden. Ob sich darunter jedoch auch rote Kalksteine wie in Sra Kaeo befinden, ist fragwürdig, da die dekorbestimmende rote Farbe der Varietät nur im Einflussbereich regionaler Störungen ausgebildet zu sein scheint (vgl. Kap. 7.3.3.2).

Aufgrund der weiten Verbreitung kontinentaler Sedimente in NE-Thailand sind die Erkundungsmöglichkeiten für weitere Sandsteinvorkommen ebenfalls vielversprechend. Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Sandstein-Lagerstätten beschränken sich auf drei Formationen der Khorat Gruppe, die wesentlich am Aufbau des Khorat-Plateaus beteiligt sind. Das Ausstreichen der Schichten lässt sich ringförmig um die Hochfläche verfolgen und bietet damit noch potentielle Abbaugelände weit im NE des Landes. Stratigraphisch äquivalente Sandsteine treten darüber hinaus auch weiter W' des Khorat-Plateaus auf, beispielsweise in der Umgebung von Lampang in N-Thailand. Aus dieser Region sind jedoch keine Lagerstätten für klastische Sedimente bekannt. Der Grund für das konzentrierte Vorkommen von Sandsteinen, die den Anforderungen eines Werksteinabbaus genügen, lässt sich wohl auf differenzierte Sedimentationsbedingungen, wahrscheinlich aber auch auf die unterschiedlichen Intensitäten der tektonischen Einflüsse zurückführen. Da sich die wesentlichen Deformationen in Thailand überwiegend im W' und N' Teil des Landes ereigneten (vgl. Kap. 3.1.3), scheint die Bildung von Sandstein-Lagerstätten lediglich in ausreichender Entfernung zur Deformationsfront möglich gewesen zu sein. In N-Thailand haben eventuell spröde Überprägungen zu einem wesentlich dichteren Kluffnetz geführt, das den Abbau der Gesteine verhindert. Gegen diese Annahme würden die Lagerstätten von Carbonatgesteinen sprechen, die ebenfalls in W-Thailand auftreten können. Der Einfluss von Deformationen auf beispielsweise Marmore ist jedoch nicht mit klastischen Sedimenten zu vergleichen, da in vielen Carbonatgesteinen Calcit die induzierten Spannungen in Form duktilen Materialverhaltens aufnehmen und kompensieren kann.

8. ZUSAMMENFASSUNG

Thailand weist für den Abbau von Naturwerksteinen ein bemerkenswertes Ressourcenpotential auf, das sich entsprechend der geologischen Entwicklung des Landes auf mehrere Lagerstättenprovinzen verteilt. Nachstehend werden die Gesteine deren Vorkommen noch einmal kurz erläutert.

Die **magmatischen Naturwerksteine** sind vornehmlich innerhalb drei N-S-streichender Granit-Gürtel positioniert (Eastern-, Central-, Western- Granite Belt), die einen Teil der SE-asiatischen Batholithintrusionen repräsentieren. An die Plutone und Batholithe sind triassische Vorkommen in N- und NW-Thailand (Provinzen: Tak, Chiang Rai) sowie verschiedene mesozoische bzw. ein präkambrisches Vorkommen (Provinzen: Ratchaburi, Chachoengsao, Prachuap Khiri Khan) in den zentraleren Regionen des Landes gebunden. Weitere magmatische Lithologien, die gegenwärtig oder in den vergangenen Jahren als Naturwerkstein abgebaut wurden, befinden sich beispielsweise am W' Rand des Khorat-Plateaus (Provinzen: Loei, Nakhon Sawan, Nakhon Ratchasima).

Der SW' Teil des Khorat-Plateaus (Provinz Nakhon Ratchasima) offeriert zudem ein bedeutendes Potential für die Gewinnung von **Sandsteinen**, da in der Region an zahlreichen geographischen Positionen mächtige Serien klastischer Sedimente ausstreichen. Die Sandsteine treten innerhalb der mesozoischen Khorat Gruppe auf, von der sich derzeit drei stratigraphische Einheiten im Abbau befinden. Im Einzelnen sind dies: (i) die Phu Kradung Formation (Mittlerer Jura), (ii) die Phra Wihan Formation (Mittlerer – Oberer Jura) und (iii) die Khok Kruat Formation (Abt – Alb).

Kalksteine und **Marmore** sind in Thailand ebenfalls vielfach genutzte Rohstoffe, die (soweit bekannt) ausschließlich aus palaeozoischen Einheiten gewonnen werden. Permische Vorkommen befinden sich in relativ naher Umgebung der Sandstein-Lagerstätten (Provinzen: Lop Buri, Sara Buri, Nakhon Ratchasima) sowie in SE-Thailand (Provinz Sra Kaeo) und N-Thailand (Provinz Uttaradit). Stratigraphisch ältere Carbonatgesteine aus dem Silur – Devon bzw. Karbon stehen in NW-Thailand an (Provinzen: Kamphaeng Phet, Sukhothai), wo sich der Abbau im Wesentlichen auf morphologisch schroff herauspräparierte Felsnadeln und Bergrücken konzentriert.

Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit bestand darin, diese lithologisch differenzierten Naturwerksteine Thailands lagerstätten-geologisch zu erkunden und hinsichtlich ihrer gesteintechnischen Eigenschaften zu bewerten. Aus den Untersuchungen sollten schließlich methodologische Aspekte abgeleitet werden, die es erlauben, Lagerstätten für Naturwerksteine fundiert zu erfassen und zu bewerten. Als wesentliche Ergebnisse der vorliegenden Arbeit sind wie folgt festzuhalten:

1. Eine bedeutende Grundlage bei der Lagerstätten erkundung stellten **lithologische Untersuchungen** dar, in deren Rahmen verschiedene petrographische, gefügekundliche und röntgenographische Verfahren zur Anwendung kamen (vgl. Abb. 8.1). Die Abbauprodukte ließen sich anhand der Untersuchungen umfangreich hinsichtlich ihrer

entscheidenden mineralogischen und textuellen Merkmale charakterisieren. Die Mineralogie und das Gefüge eines Werksteins müssen insofern als Grundvoraussetzung für eine fundierte Lagerstätten erkundung gewertet werden, als dass beide Einflussfaktoren die bautechnischen Eigenschaften eines Gesteins bzw. das Materialverhalten unter dem Einfluss der Verwitterung maßgeblich kontrollieren. Die Ergebnisse der lithologischen Untersuchungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Die beprobten magmatischen Werksteinvorkommen beinhalten elf Granite, zwei Quarz-Monzonite sowie jeweils einen Quarz-Monzodiorit und Hornblendit. Neben dem äußerst breiten Farbspektrum (u. a. ist vertreten: orange, schwarz, grau-blau, gelb) zeigen die magmatischen Gesteine differenzierte Gefüge, die isotrope bis anisotrope Texturen als auch fein- bis riesenkörnige, equi- bis inequigranulare oder porphyrische Strukturen umfassen.

Die Sandsteinvorkommen weisen ebenfalls unterschiedliche Farben auf (als Grundtöne sind ausgebildet: weiß, braun, gelb, grün, rot), liegen dabei jedoch mit einem vergleichsweise einheitlichen, sehr feinkörnigen bis feinkörnigen Korngrößenspektrum vor. Rote Sandsteine, die als Werkstein ausschließlich in der Khok Kruat Formation abgebaut werden, zeigen variierende Farbnuancen in den Bereichen hell- bis dunkelrot, braun-rot oder rot-violett. Grüne Sandsteine, als Werkstein innerhalb der Phu Kradung Formation gefördert, müssen ebenfalls farblich differenziert werden, da die grüne Farbgebung über relativ kurze Distanzen in Grautöne übergehen kann. Im Gegensatz zu den meist verschwommenen Farbgrenzen in der Phu Kradung und Khok Kruat Formation sind die weißen und braun-gelben Sandsteinvarietäten der Phra Wihan Formation durch scharfe Farbwechsel gegeneinander abgegrenzt. Mineralogisch lassen sich grüne und rote Varietäten als Arkosen klassifizieren, während braune, gelbe und weiße Varietäten als Subarkosen ausgebildet sind. Der Kornverband ist in allen Varietäten über quarzitisches Anwachs säume gefestigt, wobei in den grünen Sandsteinen zusätzlich carbonatische Porenfüllungen zur Stabilität des Detritus beitragen. Die Subarkosen zeigen häufig Schrägschichtungen, die den Varietäten ein sehr ansprechendes Dekor verleihen.

Die thailändischen Marmor- und Kalksteinvorkommen zeichnen sich in erster Linie durch verschiedene Farben (u. a. weiß, schwarz, grau, pink, gelb, rot), ein breites Korngrößenspektrum (mikritisch, fein- bis riesenkörnig) und durch unterschiedliche Deformationsstrukturen (kataklastisch, duktil) aus, so dass sich für die Gruppe der Carbonatgesteine eine Vielzahl an Handelssorten ergibt. Die beprobten Marmore sind als reine bis höchst reine Calcitmarmore anzusprechen, wobei vereinzelt geringe Mengen an Dolomit, Quarz oder Tonmineralen den Mineralbestand ergänzen. Im mikroskopischen Skalenbereich zeigen die Marmore polygonale bis interlobate Korngrenzen sowie eine equigranulare, inequigranulare oder seriate Korngrößenverteilung.

2. Neben den lithologischen Untersuchungen wurden **strukturelle Analysen** vorgenommen, die das Trennflächengefüge, die Tektonik und die Lagerungsverhältnisse in den Abbaubereichen quantifizieren sollten (vgl. Abb. 8.1). Die Ergebnisse der strukturellen Lagerstättenuntersuchungen gaben Aufschluss darüber, auf welche Art und in welchem

Ausmaß die Gewinnung der Naturwerksteine durch die Vorgaben aus der geologischen Entwicklungsgeschichte des Abbaubereiches diktiert wird. Zusammen mit einer Dokumentation von Blockgrößen und Abbaumengen konnte aus diesen Untersuchungen eine Abschätzung der Rohblockhöflichkeit vorgenommen werden (vgl. Abb. 8.1), die denjenigen Anteil an Rohblöcken beschreibt, der in verarbeitungsgerechten Dimensionen dem Gesteinsverband entnommen werden kann.

Exemplarisch wurde anhand ausgewählter Lagerstätten demonstriert, dass insbesondere die Abstandsverteilung und die Orientierung der Trennflächen den Abbau großformatiger Rohblöcke bestimmen. Während beispielsweise in der Lagerstätte BT-Violet (Granit) eine sehr weitständige Klüftung für äußerst vorteilhafte Abbaukonditionen und vergleichsweise hohe Fördermengen und Rohblockhöflichkeiten verantwortlich ist, wird die Werksteingewinnung in der Lagerstätte SN-Blue (Granit) trotz relativ weitständiger Diskontinuitäten durch zwei sich spitzwinklig schneidende Hauptklüftrichtungen beeinträchtigt. Als Konsequenz ergeben sich in der Lagerstätte SN-Blue spießige Rohblöcke, die unter hohem Materialverlust formatiert werden müssen. In der Lagerstätte PK-Grey/Pink (Marmor) ist sowohl eine hohe Abstandsweite als auch eine vergleichsweise orthogonale Raumstellung der Klüfte ausgebildet, so dass sich das Abbaubereich durch beide Grundvoraussetzungen hinsichtlich einer optimalen Werksteingewinnung auszeichnet. In sedimentären Lagerstätten wird die Rohblockhöflichkeit neben dem Abstand und der Orientierung von Klüften weiterhin maßgeblich durch die Schichtmächtigkeiten kontrolliert. Dies gilt insbesondere für die Lagerstätten der Khok Kruat Formation, die neben einem relativ dichten, sehr unterschiedlich orientierten Klüfnetz einen recht hohen Anteil dünnbankiger Schichten aufweisen. Für rote Sandsteine ergibt sich u. a. aus der geringen Schichtmächtigkeit eine niedrige Höflichkeit für großvolumige Rohblöcke, die mehrheitlich durch den Abbau spaltrauer Bodenplatten kompensiert wird. Im Gegensatz dazu sind die untersuchten Vorkommen grüner und weißer Sandsteine in der Phu Kradung- bzw. Phra Wihan Formation durch wesentlich mächtigere Sedimentabfolgen gekennzeichnet. Dies ermöglicht konsequenterweise einen umfangreicheren Abbau großformatiger Blockware. Das bedeutet, dass der Einfluss der Schichtmächtigkeit in vielen thailändischen Sandsteinvorkommen einen Abbau bedingt, der sich durch eine differenzierte Produktgewinnung (Rohblöcke, Mauersteine, Belagsplatten, etc.) den litho-stratigraphischen Vorgaben der Lagerstätte in hohem Maße anpassen muss.

3. Aus den lithologischen und strukturgeologischen Untersuchungen sowie aus Informationen zur regionalen Geologie konnten schließlich **Lagerstättenmodelle** abgeleitet werden (vgl. Abb. 8.1), welche die systematische Charakterisierung eines Abbaubereiches hinsichtlich der Genese und der post-genetischen Evolution erlauben. In den Lagerstättenmodellen sind darüber hinaus die wesentlichen Faktoren vereint, die den Abbau der Lithologien als Werksteine bestimmen. Diese so genannten lagerstätten-kontrollierenden Elemente können neben der Trennflächenanalyse dazu herangezogen werden, die Rohblockhöflichkeit eines Abbaubereiches zu quantifizieren (vgl. Abb. 8.1).

Für die magmatischen Naturwerksteine Thailands wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit sechs Lagerstättenmodelle präsentiert. In Bezug auf die Granite MT-Orange1 und MT-Orange2 im S' Teil des Tak Batholithen wurde dabei deutlich, dass die dekorbestimmende, orange Farbe der Varietäten durch eine Alteration der Feldspäte kontrolliert wird, die aus einer tektonisch-hydrothermalen Überprägung in Verbindung mit Epidot-, Chlorit- und Hämatit-Ausscheidungen resultiert. Die Dekoreigenschaften der Gesteine binden die Lagerstätten damit an Störungszonen, die wiederum eine hohe Kluftdichte, hohe Abraummengen und niedrige Rohblockhöffigkeiten zur Folge haben können. Weitere hier vorgestellte Lagerstättenmodelle für magmatische Gesteine konnten aufzeigen, inwiefern sich beispielsweise Kontaktbeziehungen zu benachbarten Lithologien (BT-Black), Änderungen im Gefüge (BT-White) oder gangförmige Intrusionen (BT-Violet) auf den Abbau eines Naturwerksteins auswirken. In Bezug auf das magmatische Gestein NB-Orange (Provinz Nakhon Sawan) ließ eine Indizienkette basierend auf u. a. gefügekundlichen und mineralogischen Merkmalen die Argumentation zu, dass es sich bei der bislang als Vulkanit ausgewiesenen Lithologie um ein Tiefengestein mit subvulkanischer Genese handelt. Das Gestein wurde im Laufe seiner geologischen Vergangenheit durch hydrothermale Prozesse durchgreifend modifiziert.

Für die thailändischen Sandsteine wurden drei Modelle konzipiert, die sich aufgrund der regional-geologischen Zusammenhänge im Ablagerungsgebiet nicht auf individuelle Lagerstätten konzentrieren, sondern vielmehr die Gesamtheit der Abbaugebiete berücksichtigen. Von elementarer Bedeutung für das erste Modell ist die Farbverteilung in den drei Abbaubildungen. Die Untersuchungen der vorliegenden Arbeit lassen die Vermutung zu, dass die Farbe der roten Sandsteine auf syn- bis post-diagenetische Prozesse zurückgeht, in deren Rahmen die Oxidation mafischer Minerale zu einem rotfärbenden Hämatitüberzug auf den detritischen Körnern führte. Weiterhin verweist das Modell auf die Möglichkeit, dass grüne und weiße Sandsteine eine durch Reduktionsprozesse modifizierte Varietät von ursprünglich roten bzw. braun-gelben Sandsteinen darstellen könnten. Anhaltspunkte dafür geben FeO : Fe₂O₃ – Verhältnisse der Lithologien, organische und carbonatische Bestandteile in der Phu Kradung Formation sowie laterale Farbverzahnungen in der Phra Wihan Formation. Die Reduktion wurde dabei mit aufsteigenden Lösungen aus unterlagernden oder benachbarten marinen Einheiten in Verbindung gebracht, die gleichzeitig die Poren des grünen Sandsteins mit Calcit ausfüllen konnten. Das Modell erklärt auch die relativ einheitliche Färbung der jüngeren roten Sandsteine, die entweder zum Zeitpunkt der Fluidmigration noch nicht abgelagert waren oder außerhalb des Einflussbereiches der Lösungen lagen. In einem weiteren Lagerstättenmodell wurden Toneinlagerungen erfasst, die insbesondere den Abbau der gelben, braunen und roten Sandsteinvarietäten beeinträchtigen. Das dritte Lagerstättenmodell der Sandsteine richtet den Fokus auf die silikatischen Anwachssäume der Minerale und stellt zunächst zwei grundsätzliche Möglichkeiten für die Verkieselung der weißen Sandsteinvorkommen zur Diskussion: (i) eine Verkieselung in Verbindung mit Drucklösungen während der Diagenese sowie (ii) eine Verkieselung in Verbindung mit dem Eindringen hydrothermalen Lösungen entlang von Störungen. Beide Mechanismen scheinen möglich zu sein, wobei wegen der spezifischen Bruchmuster in den tektonisch überprägten Bereichen sowie aufgrund der Abstinenz von Fluidbahnen im

mikroskopischen Erscheinungsbild des untersuchten Probenmaterials ein diagenetischer Ursprung der Silifizierung favorisiert wird.

Für die thailändischen Carbonatgesteine konnte im Wesentlichen die Abhängigkeit des Dekors von der Intensität metamorpher und/ oder tektonischer Überprägungen dargelegt werden. Anhand der Lagerstätte PC-White/Red wurde exemplarisch darauf verwiesen, mit welchem vielfältigem Dekor ein kontaktmetamorphes Abbauprodukt vorliegen kann und inwiefern sich der Kontaktverlauf zu einer Metamorphosequelle auf die Verbreitung unterschiedlicher Handelssorten auswirken kann.

4. Die Ergebnisse der lithologischen und strukturellen Untersuchungen ließen sich schließlich in einen geologisch-wirtschaftlichen Kontext integrieren, der die **Entwicklung von Abbau- und Erkundungsstrategien** basierend auf den konzipierten Lagerstättenmodellen erlaubt (vgl. Abb. 8.1).

Für magmatische Gesteine wurden im Rahmen der Erkundungsstrategien u. a. geophysikalische Möglichkeiten thematisiert, die Aufschluss über die Ausbreitung von Festgesteinen und verwitterten Gesteinen im Untergrund der Lagerstätte BT-Violet gaben. Auf der Grundlage dieser Informationen konnte u. a. die Mächtigkeit des Abraums über potentiellen, nicht aufgeschlossenen Abbaupartien realistischer eingeschätzt werden, so dass sich der Zugang zu bauwürdigem Material wesentlich direkter planen ließe. Als weitere Erkundungsstrategie in magmatischen Abbaugebieten wurden im Wesentlichen Bohrungen angesprochen, die beispielsweise die Entwicklung der Porositäten (NB-Orange) oder die Stabilität des Dekors (BT-Black) in tieferen Sohlen der Lagerstätten erfassen sollten.

Im Rahmen der Erkundungsmethoden für Carbonatgesteine wurden insbesondere die Marmore der Lagerstätte PC-White/Red behandelt. Da die Gesteine in der Lagerstätte sehr unterschiedliche Dekors aufweisen, stand auch bei dieser Erkundungsstrategie die Kontinuität der optischen Gesteinseigenschaften im Vordergrund. In diesem Zusammenhang wurde die Ursache der Kontaktmetamorphose diskutiert, die entweder durch die weit entfernten, voluminösen Soi Woi Intrusiva oder durch einzelne relativ kleine Intrusionen der Phra Ngam Diorite bedingt sein kann.

Für die Sandsteinvorkommen stellte sich heraus, dass insbesondere die Verteilung der Farben ein entscheidendes Kriterium bei der Erkundung weiterer Abbaugebiete darstellt. Es zeigte sich, dass die lokal aus Reduktionsprozessen hervorgegangene Sandsteinfärbung keinen zielorientierten Ausbau der Lagerstätten zulässt, da das Verteilungsmuster einzelner Farben aufgrund von Fluidmigrationen entlang der Trennflächensysteme nur schwer prognostiziert werden kann. Lediglich für weiße Sandsteine ließ sich ableiten, dass die Vorkommen möglicherweise entlang von NNW-SSE-streichenden Störungszonen auftreten. Weiterhin zeigte sich im Rahmen der Erkundungs- und Abbaustrategien für Sandsteine, dass der vielfach beobachtete Negativeinfluss von leicht spaltbaren Tonhorizonten für tiefere Lagerstättenbereiche etwa anhand von Bohrkernmaterial abgeschätzt werden könnte. Zeichnen sich in den Bohrkernen bereits Tonlagen im Gesteinsverband ab, kann der Einfluss dieser lithologischen Schwachstellen lediglich

durch ein optimal angepasstes Abbauverfahren relativiert werden, bei dem die Bohrungen zum Ausbringen der Rohblöcke exakt an den jeweiligen Trennflächen enden. Vielfach ließen sich somit Rohblöcke gewinnen, die günstige Arbeitshöhen gegen das Lager aufweisen und keine potentiellen Bruchstellen besitzen.

5. Ergänzend zu den Studien lithologischer und struktureller Parameter erfolgte eine Bestimmung **gesteintechnischer Kennwerte** und eine qualitative Bewertung der Abbauprodukte hinsichtlich ihrer bautechnischen Eignung als Naturwerkstein (vgl. Abb. 8.1). Weiterhin ergänzend dazu erfolgte eine „Qualitätskontrolle“ bereits veredelter oder auch verbauter Fertigwaren (vgl. Abb. 8.1). Den gesteintechnischen Eigenschaften kommt bei der Bewertung eines Naturwerksteinvorkommens eine wesentliche Bedeutung zu, da diese Eigenschaften zusammen mit der optischen Erscheinung die Marktfähigkeit des Materials bestimmen. Die Marktfähigkeit lässt wiederum Aussagen zum ökonomischen Potential der Lagerstätten zu (vgl. Abb. 8.1). Aus den Porenraumeigenschaften sowie aus den mechanisch, thermisch und hygrisch relevanten Kennwerten, die in drei orthogonalen Raumrichtungen bezogen auf das jeweilige Gefügeinventar ermittelt wurden, lassen sich für die untersuchten thailändischen Naturwerksteine die folgenden Charakteristika zusammenfassen:

Die magmatischen Gesteine decken infolge ihrer variablen mineralogischen Zusammensetzungen ein breites Spektrum der Matrixdichten ab und sind mehrheitlich durch eine relativ geringe Porosität gekennzeichnet. Eine Ausnahme hinsichtlich der niedrigen Porositäten bildet der Granit NB-Orange, da das Gestein im Rahmen seiner subvulkanischen Genese bei relativ geringen Druckverhältnissen und somit unter Bildung einer Gasphase auskristallisierte. Die hier untersuchten Sandsteine und Carbonatgesteine zeigen ebenfalls ein unterschiedliches Porenvolumen. Besonders hervorzuheben ist der grüne Sandstein, der infolge sekundärer Calcitfüllungen in den Poren ein wesentlich geringeres Hohlraumvolumen im Vergleich zu den übrigen Sandsteinen zeigt.

In Bezug auf das mechanische Verhalten wurde deutlich, dass sich die Festigkeiten der Gesteine überwiegend in den für die Lithologien charakteristischen Bereichen befinden. Während bei den Magmatiten häufig der Monzodiorit BT-Black maximale Werte aufwies, zeigte der Hornblendit PTC-Black mit Ausnahme der Abriebfestigkeiten stets deutlich niedrigere Ergebnisse im Vergleich zu den übrigen magmatischen Vertretern. Ähnlich signifikante Abweichungen einzelner Proben ließen sich in der Gruppe der Carbonatgesteine feststellen. Hier zeigte der Marmor PC-White, bedingt auch der Marmor PC-Red, der sich lediglich anhand des Breckziengefüges von dem Gestein PC-White unterscheidet, die jeweils niedrigsten Festigkeiten. Aus einem Vergleich der Gefügemerkmale und den Festigkeitsverteilungen konnte insgesamt abgeleitet werden, dass relativ hohe Werte bei feinkörnigen Gesteinen und relativ niedrige Werte bei grobkörnigen Gesteinen vorliegen. Zudem konnte insbesondere bei den Marmoren eine Abhängigkeit der Festigkeiten von der jeweiligen Korngrenzengeometrie erkannt werden. So zeigten Varietäten mit polygonalen Korngrenzen auffallend niedrige, und Varietäten mit interlobaten Korngrenzen auffallend hohe Festigkeiten. Als weiterer Faktor für die Festigkeiten einer Probe stellte sich zudem die tektonische Überprägung eines

Abbaugebietes heraus. Sandsteine zeichneten sich durch recht hohe Festigkeiten aus, wobei die Maximalwerte für die quarzreichen Varietäten, also für Subarkosen wie etwa S-Brown, aufgenommen wurden. Als wesentliche Voraussetzung für die Festigkeit der Gesteine kann insbesondere die quarzitische Mineralbindung gewertet werden, wobei sich auch hier manifestierte, dass das Gestein mit der kleinsten Korngröße die höchsten Druck- und Zugfestigkeiten aufweist.

In Bezug auf das thermische Dehnungspotential der Lithologien konnte festgehalten werden, dass alle beprobten Varietäten unter Zunahme der Temperatur mit einer Volumenvergrößerung reagieren. Insgesamt befanden sich die Ausdehnungskoeffizienten der untersuchten Varietäten in der Größenordnung von Referenzdaten für Gesteine mit jeweils ähnlicher Zusammensetzung. Das Dehnungsverhalten der Lithologien konnte in fast allen Fällen als isotrop betrachtet werden. Allerdings zeigten einige Marmore (PK-Pink, PK-Grey, BTD-White) mit Anisotropien von mehr als 100 % eine erhebliche Richtungsabhängigkeit, bei der es u. a. sogar zu einer Materialkontraktion in einer der drei Raumrichtungen kam. Maximale Dehnungen wurden dabei in Richtung senkrecht zur Foliation erreicht. Ein Vergleich mit Texturuntersuchungen belegte in diesem Zusammenhang, dass das spezifische Dehnungsverhalten auf die textuellen Vorzeichnungen der Marmore zurückzuführen ist, da die drei stark anisotropen Varietäten eine deutliche Vorzugsorientierung der kristallo-graphischen c-Achsen parallel zur z-Richtung zeigten. Alle magmatischen Gesteine, alle Sandsteine sowie die Mehrheit der Carbonatgesteine kehrten nach Abkühlung wieder zu ihrer Ausgangslänge zurück. Lediglich für die beiden Marmore PC-White und PC-Red wurde eine Restdehnung dokumentiert, die als permanente Gesteinsschädigung infolge thermischer Beanspruchung gewertet werden muss. Bei Sandsteinen wurden die Dehnungseigenschaften neben den Quarzanteilen von dem jeweiligen Gehalt an Tonmineralen bestimmt, die bei einer Aufheizung plastisch reagieren und damit zu einer Abminderung des Ausdehnungskoeffizienten führen. Zusammenfassend zeigte sich bei den Sandsteinen daher, dass Varietäten mit relativ niedrigem Gehalt an Tonmineralen, hier also die vier Subarkosen, durch vergleichsweise hohe Ausdehnungskoeffizienten gekennzeichnet sind. Unter dem Einfluss von Feuchtigkeit zeigten die Sandsteine ein streng reziprokes Dehnungsverhalten, da in diesem Fall durch die Einlagerung von Wasser in quellfähigen Tonmineralen höhere Ausdehnungskoeffizienten bei den vergleichsweise tonmineralreichen Arkosen erreicht wurden.

Weitere grundlegende Aussagen zu den lithologischen, strukturellen und gesteintechnischen Untersuchungen sind den jeweiligen Kapiteln zu entnehmen. Die in den einzelnen Kapiteln der vorliegenden Arbeit behandelten Themen stellen eine Bestandsaufnahme für die Erkundung und Bewertung von Naturwerksteinen dar und sind damit ein Beitrag sowohl für die Grundlagenforschung in der Lagerstättenlehre als auch für die praktische Anwendung.

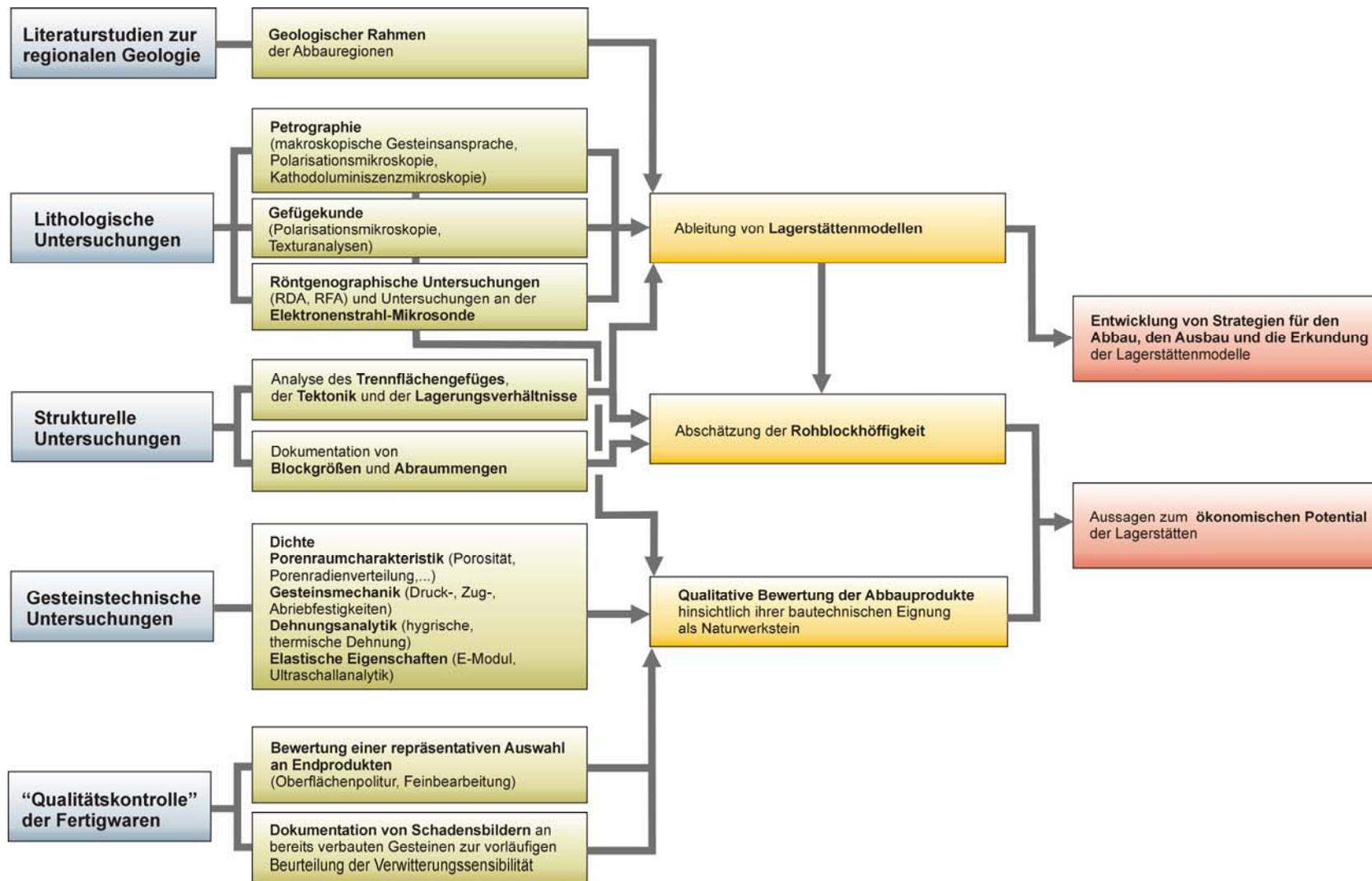


Abb. 8.1: Zusammenfassung methodologischer Aspekte zur Erfassung und Bewertung thailändischer Vorkommen von Naturwerksteinen. Erläuterungen im Text dieses Kapitels.

9. LITERATURVERZEICHNIS

- Ahrendt, H., Chonglakmani, C., Hansen, B. T. & Helmcke, D. (1993): Geochronological cross section through Northern Thailand. - *Journal of Southeast Asian Earth Science*, Vol. 8, S. 1-4 und 207-217.
- Ahrendt, H., Hansen, B. T., Lumjuan, A., Mickein, A. & Wemmer, K. (1994): Tertiary decollement tectonics in western Thailand and its implications on stratigraphy and palaeogeographic reconstructions. - In: IGCP 306 Proceedings of the International Symposium on Stratigraphic Correlation of Southeast Asia, 15.-20. Nov. 1994, Bangkok, 55 S.
- Aler, J., Du Mouza, J. & Arnould, M. (1996): Measurement of the fragmentation efficiency of rock mass blasting and its mining applications. - *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanical Abstracts*, Vol. 33 (2), S. 125-140.
- Allen, J. R. L. (1983): Studies in fluvial sedimentation: bars, bar-complexes and sandstone sheets (low-sinuosity braided streams) in the Brownstones (Lower Devonian), Welsh borders. - *Sedimentary Geology*, Vol. 33, S. 237-293.
- Altermann, W. (1989): Facies development in the Permian Petchabun Basin, Central Thailand. - Verlag für Wissenschaft und Bildung, Berlin.
- Annels, A. E. (1991): Mineral deposit evaluation. - Chapman & Hall, London.
- Annels, A. E. (1992): Case histories and methods in mineral resource evaluation. - Geological Society, London, Special Publications, 63.
- Anstey, R. L. & Chase, T. L. (1974): Environments through time. - Burgess Publishing Company.
- Atherton, M., Brotherton, M. & Mahawat, C. (1992): Integrated chemistry, textures, phase relations and modelling of a composite granodioritic-monzonitic batholith, Tak, Thailand. - *Journal of Southeast Asian Earth Science*, Vol. 7 (2/3), S. 89-112.
- Auldley-Charles, M. G. (1983): Reconstruction of eastern Gondwanaland. - *Nature*, Vol. 306, S. 48-50.
- Auldley-Charles, M. G. (1984): Cold Gondwana, warm Tethys and the Tibetan Lhasa Block. - *Nature*, Vol. 310, S. 165.
- Barns, V. E., Dawson, R. F. & Pardinson, G. A. (1942): Building stones of Central Texas. - The University of Texas Publication No. 4246, USA.
- Barr, S. M. & MacDonald, A. S. (1987): Nan River suture zone, Northern Thailand. - *Geology*, Vol. 15, S. 907-910.
- Barr, S. M. & MacDonald, A. S. (1991): Toward a Late Palaeozoic-Early Mesozoic tectonic model for Thailand. - *Journal of Thai Geoscience*, Vol. 1, S. 11-22.

- Battaglia, S., Franzini, M. & Mango, F. (1993): High sensitivity apparatus for measuring linear thermal expansion: preliminary results on the response of marbles. - *Il Nuovo Cimento*, Vol. 16, S. 453-461.
- Bauer, S. J. & Johnson, B. (1979): Effects of slow uniform heating on the physical properties of Westerly and Charoal granites. - *Proceedings of the 20th Symposium for Rock Mechanics*, S. 7-18.
- Baum, F., Braun, V. v., Hahn, L., Hess, A., Koch, K. E., Kruse, G., Quarch, H. & Siebenhüner, M. (1970): On the geology of Northern Thailand. - *Beiheft Geologisches Jahrbuch*, Vol. 102, S. 1-23.
- Beblo, M. (Ed.) (1997): *Umweltgeophysik*. - Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 465 S.
- Beckinsale, R. D. (1979): Granite magmatism in the tin belt of Southeast Asia. In: Atherton, M. P. & Tarney, J. (Eds.): *Origin of granite batholiths*. - Shiva Publishing, Orpington, Kent, S. 34-44.
- Bell, F. G. (2000): *Engineering properties of soils and rocks*. - Blackwell Science Publishing, Oxford, 482 S.
- Bentz, A. & Martini, H. J. (1968): *Lehrbuch der angewandten Geologie*. Bd. 2: Geowissenschaftliche Methoden. Teil 1: Methoden zur Erforschung der Lagerstätten von Erzen, Kohle, Erdöl, Salzen, Industriemineralen und Steinen und Erden. - Ferdinand Enke Verlage Stuttgart, 1355 S.
- Blair, T. C. & McPherson, J. G. (1999): Grain-size and textural classification of coarse sedimentary particles. - *Journal of Sedimentary Research*, Vol. 69 (1), S. 6-19.
- Bock, H. (1980): Das fundamentale Kluftsystem. - *Zeitschrift der deutschen geologischen Gesellschaft*, Vol. 131, S. 627-650.
- Borradaile, G. J., Bayly, M. B. & Powell, C. M. A. (1982): *Atlas of deformational and metamorphic rock fabrics*. - Springer Verlag, New York.
- Bradley, F. (1989): *Cenni sull'analisi geologica delle rocce ornamentali*. - Technostone S. p. A.
- Brakel, J., Modry, S. & Svata, M. (1981): Mercury porosimetry: State of the art. - *Powder Technology*, Vol., 29, S. 1-12.
- Bruno, R. & Paspaliaris, I. (Ed.) (2004): *Ornamental and dimensional stone market analysis*. - Osnet editions, Vol. 13, Athen.
- Bunopas, S. (1974): *Geological Map of Thailand 1:250.000 (Phitsanouluk)*, Report in Thai. - Geological Survey Division, DMR, Bangkok, Thailand.
- Bunopas, S. (1976): *Geology of Amphoe Bo Phloi, North Kanchanaburi with special note on the "Kanchanaburi series"*. - *Journal of the Geological Society of Thailand*, Vol. 11 (1-2), S. 51-67.
- Bunopas, S. (1981): *Palaeogeographic history of western Thailand and adjacent parts of Southeast Asia - A plate tectonics interpretation*. - Unpublished Ph.D. thesis, Victoria University of Wellington, New Zealand, 810 S.

- Bunopas, S. (1992): Regional stratigraphic correlation in Thailand. - In: Pianchaoren, C. (Ed.): Proceedings of the National Conference "Geologic resources of Thailand: Potential for future development", Bangkok, S. 189-208.
- Bunopas, S., Fontaine, H., Salyapongse, S. & Vachard, D. (1983): Permian palaeogeography in Southeast Thailand evidenced by new discoveries. - Journal of the Geological Society of Thailand, Vol. 6 (1), S. 17-21.
- Bunopas, S. & Vella, P. (1978): Palaeozoic and Mesozoic structural evolution of Northern Thailand - A plate tectonic model. - In Nutalaya, P. (Ed.): Proceedings of the 3rd Regional Conference on Geology and Mineral Resources of Southeast Asia. Bangkok und Pattaya, S. 113-140.
- Bunopas, S. & Vella, P. (1983): Tectonic and geologic evolution of Thailand. - Workshop on stratigraphic correlation of Thailand and Malaysia, Hat Yai, S. 307-322.
- Bunopas, S. & Vella, P. (1992): Geotectonics and geologic evolution of Thailand. - In: Pianchaoren, C. (Ed.): Geologic resources of Thailand: Potential for future development. Proceedings of the national conference, Bangkok, S. 209-228.
- Cardu, M. & Lovera, E. (2004): Quarrying methods and cutting techniques. In: Terezopoulos & Paspaliaris (Eds): Optimising quarrying techniques and practises. - Osnet Editions, Vol. 7, S. 1-28.
- Chairangsee, C., Hinze, C., Macharoensap, S., Nakornsri, N., Silpalit, M. & Sinpool-Anunt, A. (1990): Geological Map of Thailand, scale 1:50.000, Explanation for the sheets 5345 II (Amphoe Pak Chom), 5344 I (Ban Na Khao), 5445 II (Ban Huai Khop) and 5444 IV (King Amphoe Nam Som). - Geologisches Jahrbuch, Reihe B, Vol. 73, 109 S.
- Chaodumrong, P., Salyapongse, S. Sarapirome, S. & Palang, P. (2002): Geology of the SW Khorat-Plateau and eastern Thailand. - Post-symposium Geological Excursion Guidebook, 29.-31. August 2002, Department of Mineral Resources, Bangkok, Thailand.
- Chappel, B. W. & White, A. J. R. (1974): Two contrasting granite types. - Pacific Geology, Vol. 8, S. 173-174.
- Chonglakmani, C. & Fontaine, H. (1992): The Lam Narai-Phetchabun region: a platform for Early Carboniferous to Late Permian age. - In: Proceedings of the Technical Conference on Development Geology for Thailand into the year 2000, Bangkok, S. 39-98.
- Chonglakmani, C., Gabel, J., Helmcke, D., Lamchuan, A. & Meischner, D. (1991): Geodynamic interpretation of marine Triassic basins of Northern Thailand. - Abstract: 7th Regional Conference on Geology, Mineral and Energy Resources of SE-Asia, Bangkok, S. 13.
- Chonglakmani, C. & Helmcke, D. (1989): The Triassic Lampang Group of Northern Thailand - Fore-arc basin deposits or sediments of intramontane basins. - In: Thanasuthipitak, T. & Ounchanum, P. (Ed.): Intermontane Basins: Geology and Resources. - Proceedings of an International Symposium, Chiang Mai, S. 265-275.

- Chonglakmani, C. & Sattayarak, N. (1981): Stratigraphy of the Huai Hin Lat Formation (Upper Triassic) in NE-Thailand. - In: Nutalaya, P. (Ed.): Proceedings of the 3rd Regional Conference on Geology and Mineral Resources in SE-Asia, S. 739-762.
- Cobbing, E. J., Mallick, D. I. J., Pitfield, P. E. J. & Tech, L. H. (1986): The granites of the Southeast Asian tin belt. - Journal of the Geological Society of London, Vol. 143, S. 537-550.
- Cobbing, E. J. & Pitfield, P. E. J. (1986): South-East Asia granite project: Field report for Thailand 1985. - British Geological Survey, Overseas Directorate, 86/16/R, Keyworth.
- Conti, Mannoni, Montani, Pinzari, Pucci & Ricci (1990): Marble in the world. - S. E. A., 2nd Edition.
- Cooper, M. A., Herbert, R. & Hill, G. S. (1989). The structural evolution of Triassic Intermontane Basins in NE Thailand. - In: Thanasuthipitak, T. & Ounchanum, P. (Ed.): Intermontane Basins: Geology and Resources. - Proceedings of an International Symposium, Chiang Mai, S. 231-242.
- Coward, M. P., Windley, B. F., Broughton, R. D., Luff, I. W., Petterson, M. G., Pudsey, C. J., Rex, D. C. & Asif Khan, M. (1986): Collision tectonics in NW Himalayas. - In: Coward, M. P. & Ries, A. C. (Ed.): Collision tectonics. Geological Society Special Publications, Vol. 19, S. 203-219.
- 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, 559 S.
- Cunningham, C. (1983): The Kuz-Ram model for prediction of fragmentation from blasting. - In: 1st International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, Lulea, Schweden, S. 439-453.
- Da Gama, C. D. (1983): Use of comminution theory to predict fragmentation of jointed rock mass subjected to blasting. - In: 1st International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, Lulea, Schweden, S. 563-579.
- Darbyshire, D. P. F. (1988): Geochronology of Thai granites. NERC Isotope Geology Centre Rep. No. 88/5.
- Deere, D. U. (1964): Technical description of rock cores for engineering purposes. - Rock Mech. Eng. Geol., Vol. 1, S. 16-22.
- Deppisch, J. & Krug, R. (2005): Neue Normen für Produkte aus Naturwerkstein. - Fachartikel der LGA Bautechnik GmbH, 15 S.
- Dhakal, G. P. (1996): The potential of Granite and Diorite as Construction Aggregates. - Unpublished M. Eng. thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand, 107 S.
- Dheeradilok, P. (1973): The inferred Precambrian rocks and tectonic features of Thailand. - Mineral Resources Gazette, Vol. 8, S. 1-18 (in Thai).

- Dheeradilok, P. (1993): Mineral resources and landuse planning for industrial development in Nakhon Ratchasima, Northeastern Thailand. - *Journal of Southeast Asian Earth Science*, Vol. 8 (1-4), S. 567-571.
- Dheeradilok, P., Wongwanich, T., Tansathien, W. & Chaodumrong, P. (1992): An introduction to geology of Thailand. - *Proceedings of the National Conference on "Geologic resources of Thailand: Potential for future development"*, 17-24 November 1992, Department of Mineral Resources, Bangkok, Thailand, S. 737-749.
- Doveton, J. H. (1987): Log analysis of petrofacies and lithofacies. - *GFZ Logging course*, Geoforschungszentrum Potsdam.
- Dreyer, W. (1974): *Materialverhalten anisotroper Festkörper: Thermische und elektrische Eigenschaften*. - Springer Verlag, Wien, 295 S.
- Drumm, A., Heggemann, H. & Helmcke, D. (1993): Contribution to the sedimentology and sedimentary petrology of the non-marine Mesozoic sediments in Northern Thailand (Phrae and Nan Provinces). - In: Thanasuthipitak, T. (Ed.): *Biostratigraphy of Mainland SE-Asia: Facies and Palaeontology*. *Proceedings of the International Symposium*, Chiang Mai, Vol. 2, S. 299-318.
- Duerrast, H., Siegesmund, S. & Prasad, M. (1999): Die Schadensanalyse von Naturwerksteinen mittels Ultraschall Diagnostik: Möglichkeiten und Grenzen. - *Zeitschrift der deutschen Geologischen Gesellschaft*, Vol. 150 (2), S. 359-374.
- Duerrast, H., Siegesmund, S. & Stein, K.-J. (2003): Naturstein in Thailand. - *Naturstein*, Ulm, 9, S. 68-74.
- Dunham, R. J. (1962): Classification of carbonate rocks according to depositional texture. In: Ham, W. E. (Ed.): *Classification of carbonate rocks*. *American Association of Petroleum Geologists Memoir*, Vol. 1, S. 108-121.
- Dunsworth, S. Meyer, J., Harben, P. W. & Robertson, W. W. (2003): Feasibility study and market assessment for armour stone in Newfoundland and Labrador. - Department of Industry, Trade and Rural Development, and Department of Mines and Energy, Government of Newfoundland and Labrador, Canada.
- Europäische Kommission (1998): *European Minerals Yearbook 1996-7*. - 2nd Edition, Luxemburg 1998.
- Ewan, V. J., West, G. & Temporal, J. (1983): Variation in measuring rock joints in tunnelling. - *Tunnels and Tunnelling*, Vol. 3, S. 15-18.
- Felix, C. (1983): Sandstone linear swelling due to isothermal water absorption. - *Proceedings of the international Conference "Material Science and Restoration"*, S. 305-310.
- 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*, Vol. 59, S. 133-146.
- Fenn, P. M. (1986): On the origin of graphic granite. - *American Mineralogist*, Vol. 71, S. 325-330.

- Fitzner, B. (1969): Die Prüfung der Frostbeständigkeit von Naturbausteinen. - Geologische Mitteilungen, Vol. 10, S. 205-296.
- Fitzner, B. & Heinrichs, K. (2004): Photo atlas of weathering forms on stone monuments. - <http://www.stone.rwth-aachen.de>
- Fitzner, B. & Snethlage, R. (1982): Einfluss der Porenradienverteilung auf das Verwitterungsverhalten ausgewählter Sandsteine. - Bautenschutz und Bausanierung, Nr. 3-1982, S. 97-103.
- Folk, R. L. (1959): Practical geographic classification of limestones. - American Association of Petroleum Geologists Bulletin, Vol. 43, S. 1-38.
- Folk, R. L. (1962): Spectral subdivision of limestone types. - In: Ham. W. E. (Ed.): Classification of carbonate rocks. American Association of Petroleum Geologists Memoir, Vol. 1, S. 62-84.
- Fontaine, H. (1990): Carboniferous corals from Northeast Thailand (northeast of Loei). - Geologisches Jahrbuch, Reihe B, Vol. 73, S. 81-89.
- Fontaine, H. & Saliapongse, S. (1997): Biostratigraphy of East Thailand. - In: Proceedings of the International Conference on Stratigraphy and Tectonic Evolution of Southeast Asia and the South Pacific, DMR, Bangkok, S. 73-82.
- Founti, M. (Ed.) (2004): Stone for construction and architecture - from extraction to the final product. - Osnet editions, Vol. 14, Athen.
- Franklin, J. A. (1974): Rock quality in relation to the quarrying and performance of rock construction materials. - In: 2nd International Congress IAEG, V1, IV-PC-2.1-2.12.
- Friend, P. F. (1966): Clay fractions and colours in some Devonian redbeds in the Catskill Mountains, USA. - Geological Society of London Quarterly Journal, Vol. 122, S. 273-292.
- Füchtbauer, H. (Ed.) (1988): Sediment-Petrologie, Teil II: Sedimente und Sedimentgesteine. - Schweizerbartsche Verlagsbuchhandlung, 1141 S.
- Gabel, J., Trzebski, R., Zwingmann, H., Chonglakmani, C., Helmcke, D. & Meischner, D. (1993): Triassic extension basins in northern Thailand. - Abstract: Late orogenic extension in mountain belts, Intern. Sym., Montpellier.
- Garrels, R. M. & Christ, C. L. (1990): Solutions, Minerals and Equilibria. - Jones and Barlet Publishers, Boston, 450 S.
- Gartung, E. (1985): Empfehlung Nr. 10 des Arbeitskreises 19 „Versuchstechnik Fels“ der deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e. V. - Indirekter Zugversuch an Gesteinsproben - Spaltzugversuch. - Bautechnik, Vol. 6, S. 197-199.
- Gatinsky, Y. G., Hutchison, C. S., Minh, N. N. & Tri, T. V. (1984): Tectonic evolution of Southeast Asia. - In: Tectonics of Southeast Asia, 27th International Congress Report 5, Colloquium 5, S. 225-240.

- Gatinsky, Y. G., Mishina, A. V., Vinogradov, I. V. & Kovalev, A. A. (1978): The main metallogenetic belts of Southeast Asia as a result of different geodynamic conditions interference. - In: Nutalaya, P. (Ed.): Proceedings of the 3rd Regional Conference on Geology and Mineral Resources of Southeast Asia. AIT, Bangkok, S. 313-318.
- Gehlen, K. v. (1956): Sekundär-hydrothermale Mineralisation im Burgsandstein des Wendelsteiner Höhenzuges bei Nürnberg. Geol. Bl. NO-Bayern 6, S. 12-21.
- Geological Society (1995): The description and classification of weathered rock for engineering purposes. Geological Society Engineering Group Working Party Report. - Quarterly Journal of Engineering Geology, Vol. 28, S. 207-242.
- 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: Paspaliaris, I.; Taxiarchou, M.; Adjemian, A. & Katalagarianakis (Eds.): Proceedings of the fourth annual workshop (EUROTHEN 2001), Athen, NTUA, S. 207-236.
- Glover, P. W., Baud, P., Darot, M., Meredith, P. G., Boon, S. A., LeRavalac, M., Zoussi, S. & Reuschle (1995): Alpha/beta phase transition in quartz monitored using acoustic emissions. - Geophysical Journal International, Vol. 120, S. 775-782.
- Goodman, R. E. (1993): Engineering geology - Rock in engineering construction. - John Wiley & Sons, 412. S.
- Goodman, R. E. & Shi, G. (1986): Block theory and its application to rock engineering. - Prentice-Hall, New Jersey.
- Grasegger, G. (1997): Die Verwitterung von Natursteinen an Bauten und Baudenkmälern. - In: Berufsbildungswerk des Steinmetz- und Bildhauerhandwerks e. V. (Ed.): Naturwerkstein und Umweltschutz in der Denkmalpflege. Ebner Verlag, Ulm.
- Grimm, W. D. (1990): Bildatlas wichtiger Denkmalgesteine der Bundesrepublik Deutschland. - Bayrisches Landesamt für Denkmalpflege, Arbeitsheft Nr. 50, 255 S.
- Hahn, L., Koch, K. E. & Wittekind, H. (1986): Outline of the geology and mineral potential of Thailand. - Geologisches Jahrbuch, Reihe B, Vol. 59, S. 1-149.
- Hänninen, P., Pääkönen, K. & Tervo, T. (1991): Geo-radar in dimension stone explorations. - In: Autio, S. (Ed.): Geological Survey of Finland, Current research 1989-1990. Geological Survey of Finland. Special Paper, Vol. 12, S. 117-118.
- Hansen, B. T., Ahrendt, H., Lumjuan, A., Mickein, A. & Wemmer, K. (1994): Do the high grade metamorphic rocks represent the basement for the palaeozoic strata? - In: Angsuwathana, P., Wongwanich, T., Tansathien, W. Wongsomsak, S. & Tulyatid, J. (Ed.): IGCP 306 Proceedings of the International Symposium on Stratigraphic Correlation of Southeast Asia, 15.-20. Nov. 1994, Bangkok, 55 S.
- Harben, P. & Purdy, J. (1991): Dimension stone evaluation: from cradle to gravestone. - Industrial minerals, Vol. 281, S. 47-61.

- Härmä, P., Selonen, O. & Luodes, H. (2001): Prospecting of bedrock resources - dimension stones in a rapakivi granite area, a case history. - In: Kuula-Väisänen, P. & Uusinoka, R. (Ed.): Proceedings of aggregate 2001 - environment and economy, 6.-10. Aug. 2001, Helsinki, Finland, Vol. 1. Tampere University of Technology, Laboratory of Engineering Geology, Publikation 50, S. 175-179.
- Harms, J. C. & Fahnestock, R. K. (1965): Stratification, bedforms and flow: with example from the Rio Grande. - In: Middleton, G. V. (Ed.): Primary sedimentary structures and their hydrodynamic interpretation. SEPM Special Publication, Vol. 12, S. 84-115.
- Heggemann, H. (1994): Sedimentäre Entwicklung der Khorat-Gruppe (Ober-Trias bis Palaeogen) in NE- und N-Thailand. - Göttinger Arbeiten zur Geologie und Palaeontologie, Vol. 63, 146 S.
- Heggemann, H., Helmcke, D. & Tietze, K.-W. (1994): Sedimentary evolution of the Mesozoic Khorat Basin in Thailand. - Zentralblatt für Geologie und Paläontologie, Teil 1 (11/12), S. 1267-1285.
- Helmcke, D. (1983): On the Variscian evolution of central mainland Southeast Asia. - Earth and Evolutionary Science, Vol. 4, S. 309-319.
- Helmcke, D. (1984): The orogenic evolution (Permian - Triassic) of central Thailand. Implications on palaeogeographic models for mainland SE-Asia. - Mem. Soc. Geol. France, N. S., Vol. 147, S. 83-91.
- Helmcke, D. (1985): The Permo-Triassic "Palaeotethys" in mainland Southeast Asia and adjacent parts of China. - Geologische Rundschau, Vol. 74, S. 215-228.
- Helmcke, D. (1986): Die Alpen und die Kimmeriden: Die verdoppelte Geschichte der Tethys - Diskussion. - Geologische Rundschau, Vol. 75 (2), S. 495-499.
- Helmcke, D., Ingavat-Helmcke, R. & Meischner, D. (1993): Spät-variszische Orogenese und Terranes in Südost-Asien. - Göttinger Arbeiten zur Geologie und Palaeontologie, Vol. 58, S. 29-38.
- Helmcke, D. & Kraikhong, G. (1982): On the geosynclinal and orogenic evolution of the Central and the NE Thailand. - Journal of the geological Society of Thailand, Vol. 5, S. 52-74.
- Helmcke, D. & Lindenberg, H. G. (1983): New data on the „Indosinian“ Orogeny from central Thailand. - Geologische Rundschau, Vol. 72, S. 317-328.
- Hirschwald, J. (1908): Die Prüfung der natürlichen Bausteine auf ihre Verwitterungsbeständigkeit. - Berlin (Ernst & Sohn).
- Hjulström, F. (1939): Transportation of detritus by moving water. In: Trask, P. D. (Ed.): Recent marine sediments. - American Association of Petroleum Geologists, S. 5-31.
- Hoek, E. & Bray, J. W. (1981): Rock slope engineering. - 3rd Edition, IMM, London.
- Hoek, E., Wood, D. & Shah, S. (1992): A modified Hoek-Brown failure criterion for jointed rock masses. - In: Hudson, J. A. (Ed.): Rock Characterisation. Thomas Telford, London, S. 209-214.

- Hoerenbaum, W. (2005): Verwitterungsmechanismen und Dauerhaftigkeit von Sandsteinsichtmauerwerk. - Dissertation, Universität Karlsruhe, 295 S.
- Holl, U. (1998): Auf dem Boden der Tatsachen. - Blickpunkt Asia Pacific, Deutsche Asia Pacific Gesellschaft e. V., Köln.
- Horowitz, D. H. (1971): Diagenetic significance of color boundary between Juniata and Bald Eagle Formations, Pennsylvania. - *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol. 41 (4), S. 1134-1144.
- Hurlbut, C. S. & Klein, C. (1977): *Manual of mineralogy*. - John Wiley & Sons, New York, 681 S.
- Hutchison, C. S. (1989): *Geological evolution of Southeast Asia*. - Oxford Monographs on Geology and Geophysics, Nr. 13, Oxford University press, 368 S.
- Iliev, I. G. (1967): An attempt to estimate the degree of weathering of intrusive rocks from their physico-mechanical properties. - In: *Proceedings of the 1st International Congress of the International Society of Rock Mechanics*, Lisbon, Vol. 1, S. 109-114.
- Ingavat, R. (1984): On the correlation of the Permian foraminiferal faunas of the western central and eastern provinces of Thailand. - *Geological Society of France Memoir*, N. S. 147, S. 93-100.
- Intasopa, S. B. (1993): *Petrology and geochronology of the volcanic rocks of the Central Thailand Volcanic Belt*. - Unpublished Ph.D. thesis, University of New Brunswick, Canada, 242 S.
- Intasopa, S. B. & Dunn, T. (1994): Petrology and Sr-Nd isotopic systems of the basalts and rhyolites, Loei, Thailand. - *Journal of Southeast Asian Earth Science*, Vol. 9 (1/2), S. 167-180.
- Ishihara, S., Sawata, H. Shibata, K. Terashima, S. Arrykul, S. & Sato, K. (1980): Granites and Sn-W deposits of peninsular Thailand. - *Mining Geology Special Issue*, 8, S. 223-241.
- ISRM (1978): Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. International Society for Rock Mechanics Commission on Standardisation of Laboratory and Field Tests. - *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geodynamics Abstracts*, Vol. 15 (6), S. 319-368.
- Jacobsen, H. S., Pierson, C. T., Danusawad, T., Inthuputi, B., Siriratanamongkol, C., Prapassornkul, S. & Pholphan, N. (1969): *Mineral investigation in Northeastern Thailand*. - USGS Professional Paper 618, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 96 S.
- Jungyusuk, N. & Khositantont, S. (1992): Volcanic rocks and associated mineralization in Thailand. - *Proceedings of the National Conference on "Geologic resources of Thailand: Potential for future development"*, 17-24 November 1992, Department of Mineral Resources, Bangkok, Thailand.
- Kazi, A. & Sen, Z. (1985): Volumetric RQD: an index of rock quality. - In: Stephanson, O. (Ed.): *Fundamentals of rock joints*, Centek Publication, Sweden, S. 95-101.

- Keary, P. & Brooks, M. (1991): An introduction to geophysical exploration. - Blackwell Scientific Publications, London, 262 S.
- Kelsall, P. C., Watters, R. J. & Franzone, J. G. (1986): Engineering characterisation of fissured, weathered dolerite and vesicular basalt. - In: Proceedings of the 27th Symposium on Rock Mechanics - Rock mechanics: a key to energy production, Tuscaloosa, USA, S. 77-84.
- Kießl, K. (1989): Bauphysikalische Einflüsse bei der Krustenbildung am Gestein alter Bauwerke. - Bauphysik, Vol. 11 (1989), H. 1, S. 44-49.
- Kleber, W. (1990): Einführung in die Kristallographie. VEB Verlag Technik, Berlin, 416 S.
- Kleine, T. H. & Villaescusa, E. (1990): A rock joint model to estimate the in-situ block size distribution in natural joint rock. - In: XXIII APCOM, Berlin, S. 693-704.
- Klopfer, H. (1985): Lehrbuch der Bauphysik. - Teubner Verlag, Stuttgart.
- Koch, A. (2005): Deformation von Fassadenplatten aus Marmor: Schadenskartierungen und gesteintechnische Untersuchungen zur Verwitterungsdynamik von Marmorfassaden. - Dissertation, Universität Göttingen, 174 S.
- Koch, A. & Siegesmund (2001): Gesteintechnische Eigenschaften ausgewählter Bausandsteine. - Zeitschrift der deutschen geologischen Gesellschaft, Vol. 152 (2-4), S. 681-700.
- Koch, R., Baier, A., Lorenz, H. & Fritsch, A. (2003): Sandsteine des Keupers als Naturwerksteine im und um Nürnberg. - Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver., N. F. 85, S. 45-64.
- Koch-Moeck, M. (2005): Computergestützte geowissenschaftliche Entscheidungshilfen bei Planung und Optimierung der untertägigen Gewinnung von Marmor. - Dissertation, Technische Universität Berlin, 134 S.
- Koehler, W. (1991): Untersuchungen zu Verwitterungsvorgängen an Carrara-Marmor in Potsdam-Sansouci. - Berichte zu Forschung und Praxis der Denkmalpflege in Deutschland. Steinschäden - Steinkonservierung, Vol. 2, S. 50-55.
- Koehler, W. (1992): Ultrasonic measurements on three sculpture groups of Sterzing marble, castle Schönbrunn, Vienna. - In: Proceedings of the 2nd workshop "Eurocare-Euromarble", Messina, 1991. Bayrisches Landesamt für Denkmalpflege, Zentrallabor, Forschungsbericht 6/1992, S. 133-140.
- Kolthoff, I. M., Sandell, E. B., Meeker, E. J. & Bruckenstein, S. (1969): Quantitative chemical analysis. - 4th Edition, McMillan, London, 320 S.
- Kozar, M. G., Crandall, G. F. & Hall, S. E. (1992): Integrated and stratigraphic study of the Khorat Basin, Ratburi Limestone (Permian), Thailand. - In: Pianchaoroen, C. (Ed.): Geologic resources of Thailand: Potential for future development. Proceedings of a National Conference, S. 692-736.
- Kyi, A. (1991): Engineering properties of the Tak Granite, Northern Thailand. - Unpublished M. Sc. thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand, 118 S.

- Laux, H. (1992): Untersuchungen zum Naturwerksteinbestand und zur Verwitterung auf Dresdner Friedhöfen. - Unveröffentlichte Diplomarbeit, LMU München, 143 S.
- Lefevre, R. A., Derbez, M., Gregoire, M. & Ausset, P. (1997) : La Sulfation de la Pierre et du Verre dans L'Environnement urbain : La Cathedrale de Tours. - In : «Gemeinsames Erbe, gemeinsam erhalten ». 2. Statuskolloquium des dt.-franz. Forschungsprogramms für die Erhaltung von Baudenkmälern, Bonn, 12.-13.12.1996, S. 345-356.
- Leiss, B. & Ullemeyer, K. (1999): Texture characterisation of carbonate rocks and some implications for the modelling of physical anisotropies, derived from idealized texture types. - Zeitschrift der deutschen geologischen Gesellschaft, Vol. 150, S. 259-274.
- Lentz, D. R. & Fowler, A. D. (1992): A dynamic model for graphic quartz-feldspar intergrowth in granitic pegmatites in the southwestern Grenville Province. - In: Martin, R. F. & Cerny, P. (Eds.): Granitic pegmatites. Canadian Mineralogist, Vol. 30, S. 571-585.
- Logan, J. M., Hadedt, M., Lehnert, D. & Denton, M. (1993): A case study of the properties of marble as building veneer. - International Journal of Rock Mechanics, Mining Science and Geomechanics, Vol. 30, S. 1531-1537.
- Lu, P. & Latham, J. P. (1999): Developments in the assessment of in-situ block size distributions of rock masses. - Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 32 (1), S. 29-49.
- Luodes, H. (1999): Prospecting for dimension stone in Finland. - Roc Maquina, Vol. 32, S. 131-132.
- Luodes, H. & Selonen, O. (2001): Dimension stone evaluation with special reference to georadar investigations. - In: Sandrone, R. (Ed.): International workshop "Dimension stones of the European mountains". Luserna San Giovanni - Torre Pellice (TO), 10-12 giugno 2001: proceedings. Torino: Associazione Georisore e Ambiente, S. 287-291.
- Luodes, H., Selonen, O. & Pääkönen, K. (2000): Evaluation of dimension stone in gneissic rocks - a case history from Southern Finland. - Engineering Geology, Vol. 52, S. 209-223.
- Lwin, A. (1991): Engineering properties of the Tak Diorite. - Unpublished M. Sc. thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand, 122 S.
- MacDonald, A. S., Barr, S. M., Dunning, G. R. & Yaowanoyothin, W. (1991): The Doi Inthanon metamorphic core complex: age significance. - Proceeding of the 7th Regional Conference on Geology, Mineral and Energy Resources of Southeast Asia, Bangkok.
- MacDonald, A. S., Barr, S. M., Dunning, G. R. & Yaowanoyothin, W. (1993): The Doi Inthanon metamorphic core complex in NW Thailand: age and tectonic significance. - Journal of Southeast Asian Earth Science, Vol. 8, S. 117-125.
- Mahawat, C. (1982): The petrology and geochemistry of the granitic rocks of the Tak Batholith, Thailand. - Unpublished Ph.D. thesis of the University of Liverpool, England.
- Mahawat, C., Atherton, M. P. & Brotherton, M. S. (1990): The Tak Batholith, Thailand: the evolution of contrasting granite types and implications for tectonic setting. - Journal of Southeast Asian Earth Science, Vol. 4 (1), S. 11-27.

- Majoribanks, R. J. (1997): Geological methods in mineral exploration and mining. - Chapman & Hall, London, 115 S.
- Marrante, S. & Vella, P. (1986): Palaeomagnetism of the Khorat Group, Mesozoic, NE Thailand. - Journal of SE-Asian Earth Sciences, Vol. 1 (1), S. 23-31.
- Marschall, D. J. (1988): Cathodoluminescence of geological materials. - Unwin Hyman, London-Sydney-Wellington, 156 S.
- McBride, E. F. (1963): A classification of common sandstones. - Journal of Sedimentary Petrology, Vol. 33 (3), S. 664-669.
- McBride, E. F. (1974): Significance of color in red, green, purple, olive, brown and gray beds of Difunta Group, Northeastern Mexico. - Journal of Sedimentary Petrology, Vol. 44 (3), S. 760-773.
- McCabe, R., Celeya, M., Cole, J., Han, H. C., Ohnstad, T., Paijitprapapon, V. & Thitipawan, W. (1988): Extension tectonics; The Neogene opening of the N-S-trending basins of central Thailand. - Journal of Geophysical Research, Vol. 93, S. 11899-11910.
- Meier, D. & Kronberg, P. (1989): Klüftung in Sedimentgesteinen: Erscheinungsformen, Datenaufnahme, Datenbearbeitung, Interpretation. - Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 116 S.
- Metcalf, I. (1990): Allochthonous terrane processes in Southeast Asia. - Phil. Trans. R. Soc. London, A 331, S. 625-640.
- Metcalf, I. (1991): Late Palaeozoic and Mesozoic palaeogeography of Southeast Asia. - Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, Vol. 87, S. 211-221.
- Miall, A. D. (1978): Fluvial sedimentology. - Canadian Society of Petrology and Geology Memoir, Vol. 5.
- Miall, A. D. (1985): Architectural element analysis: a new method of facies analysis applied to fluvial deposits. - Earth Science Reviews, Vol. 22, S. 261-308.
- Miall, A. D. (1996): The geology of fluvial deposits: Sedimentary facies, basin analysis and petroleum geology. - Springer Verlag, 582 S.
- Mickein, A. (1997): U/Pb-, Rb/Sr- und K/Ar-Untersuchungen zur metamorphen Entwicklung und Altersstellung des „Präkambriums“ in NW-Thailand. - Göttinger Arbeiten zur Geologie und Palaeontologie, Vol. 73, 77 S.
- Mickein, A., Ahrendt, H., Hansen, B. T., Lumjuan, A., & Wemmer, K. (1995): New age information of the history of the basement rocks of Thailand. - In: Wannakao, L., Youngme, W., Buaphan, C., Srisuk, K. & Lertsirivorakul (Ed.): Proceedings of the International Conference on Geology, Geotechnology and Mineral Resources of Indochina, 22.-25. Nov. 1995, Khon Khaen, 55 S.
- Mitchell, A. H. G. (1977): Tectonic settings for emplacement of Southeast Asian tin granites. - Bulletin of the Geological Society of Malaysia, Vol. 9, S. 123-140.

- Mitchell, A. H. G. (1981): Phanerozoic plate boundaries in mainland Southeast Asia, the Himalayas and Tibet. - *Journal of the Geological Society of London*, Vol. 138, S. 109-122.
- Mitchell, A. H. G. (1992): Late Permian Mesozoic events and the Mergui Group Nappe in Myanmar and Thailand. - *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, Vol. 7 (2-3), S. 165-178.
- Mitchell, A. H. G. (1993): Cretaceous-Cenozoic tectonic event in the western Myanmar (Burma)-Assam. - *Journal of the geological society of London*, Vol. 150, S. 1089-1102.
- Monicard, R. P. (1980): Properties of reservoir rocks: Core analysis. - Edition Technip.
- Montani, C. (2003): Stone 2002 - World marketing handbook. - Faenza, Gruppo Editoriale Faenza Editrice.
- Montani, C. (2005): Stone 2004 - World marketing handbook. - Faenza, Gruppo Editoriale Faenza Editrice.
- Moshammer, B. & Lobitzer, H. (1998): Weißmetrik und Geochemie ausgewählter österreichischer Kalkstein- und Marmor-Vorkommen. - *Mitteilungen der österreichischen geologischen Gesellschaft*, Vol. 91, S. 63-77.
- Motoyuki, S. & Moriyasu, T. (2000): Classification of subsurface fracture roughness by polarimetric borehole radar. - *IEEE*, S. 996-999.
- Mouret, C., Heggemann, H., Goudain, J. & Krisadasima, S. (1993): Geological history of the siliciclastic Mesozoic strata of the Khorat Group in the Phu Phan Range area, northeastern Thailand. - In: Thanasuthipitak, T. (Ed.): *Biostratigraphy of Mainland Southeast Asia: Facies and Palaeontology*. Proceedings of the International Symposium, Chiang Mai, Vol. 1, S. 23-50.
- Mueller, F. (2001): *Gesteinskunde*. - Ebner Verlag, Ulm.
- Nakapadungrat, S. & Putthapiban, P. (1992): Granites and associated mineralization in Thailand. - Proceedings of the National Conference on "Geologic Resources of Thailand: Potential for Future Development", 17.-24. Nov. 1992, Dept. of Mineral Resources, Bangkok, S. 153-171.
- Napoli, S. (2003): Stone sector 2003, Italian industry and international trends. - *Internazionale Marmi e Macchine*, Carrara S. p. A.
- Nelles, P. L. (1996): Die Granit-Natursteingewinnung weltweit. - *Erzmetall*, Vol. 49 (5), S. 286-299.
- Neuhoff, P. S., Fridriksson, T., Arnorsson, S. & Bird, D. K. (1999): Porosity evolution and mineral paragenesis during low-grade metamorphism of basaltic lavas at Teigarhorn, Eastern Iceland. - *American Journal of Science*, Vol. 299, S. 467-503.
- Neumann, H. H. (1994): Aufbau, Ausbildung und Verbreitung schwarzer Gipskrusten, dünner Schichten und Schalen sowie damit zusammenhängender Gefügeschäden an Bauwerken aus Naturstein. - *Schriftenreihe Angewandte Analytik*; Dannecker, W. (Ed.), Hamburg.

- Nickel, E. (1978): The present status of cathode luminescence as a tool in sedimentology. - Minerals Science Engineering, Vol. 10 (2), S. 73-100.
- Ondrasina, J., Kirchner, D. & Siegesmund, S. (2002): Freeze-thaw cycles and their influence on marble deterioration: a long term experiment. - In: Siegesmund, S., Weiss, T. & Vollbrecht, A. (Eds.): Natural stone, Weathering phenomena, Conservation strategies and Case studies. Geological Society of London, Special Publications, Vol. 205, S. 9-18.
- Ord, A. & Cheung, C. C. (1991): Image analysis techniques for determining the fractal dimensions of rock joints and fragment size distribution. - In: Proceedings of the 7th Conference of IACMAG, Balkema, Rotterdam, S. 87-91.
- Palmström, A. (1985): Application of the volumetric joint count as a measure of rock mass jointing. - In: Stephanson, O. (Ed.): Fundamental of rock joints, Centek Publications, Sweden, S. 103-109.
- Palmström, A. (1995): RMI - a rock mass characterisation system for rock engineering purposes. - Unpublished Ph.D. thesis of the University of Oslo, Norway.
- Passchier, C. W. & Trouw, R. A. J. (1996): Microtectonics. - Springer Verlag, Berlin, 289 S.
- Peltzer, G. & Tapponier, P. (1988): Formation and evolution of strike slip-faults, rifts and basins during the India-Asia collision: An experimental approach. - Journal of Geophysical Research, Vol. 93 (B 12), S. 15085-15117.
- Pereira, H. G., Brito, M. G., Albuquerque, T. & Ribeiro, J. (1992): Geostatistical estimation of a summary recovery index for marble quarries. - In: Soares, A. (Ed.): Geostatistics Tróia '92, Vol. 2. International Geostatistics congress, Tróia, Portugal 1992.
- Permpoon, G., Pootongchairit, S., Apaitan, V., Tabtieng, W. (1992): Overview and future trend of mining technology in Thailand. - Proceedings of the National Conference on "Geologic resources of Thailand: Potential for future development", 17-24 November 1992, Department of Mineral Resources, Bangkok, Thailand.
- Peschel, A. (1983): Natursteine. - VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig.
- Pettijohn, F. J., Potter, P. E. & Siever, R. (1987): Sand and Sandstone. - Springer Verlag, New York, 553 S.
- Picard, M. D. (1965): Iron oxides and fine-grained rocks of Red Peak and Crow Mountain sandstone members, Chugwater (Triassic) Formation, Wyoming. - Journal of Sedimentary Petrology, Vol. 35, S. 464-479.
- Piyasin, S. (1974): Geological Map of Thailand 1:250.000 (Changwat Uttaradit), DMR, Bangkok, Thailand.
- Polachan, S. & Sattayarak, N. (1989): Strike-slip tectonics and the development of the Tertiary basins in Thailand. - In: Thanasuthipitak, T. & Ounchanaum, P. (Ed.): Intermontane basins: Geology and resources. Proceedings of the International Symposium, Chiang Mai, S. 43-58.
- Pongsapich, W. & Mahawat, C. (1977): Some aspects of Tak granites, Northern Thailand. - Geological Society of Malaysia, Bulletin 9, S. 175-186.

- Pongsapich, W. Vedchkanchana, S. & Pongprayoon, P. (1980): Petrology of the Pranburi - Hua Hin Metamorphic Complex and Geochemistry of Gneisses in it. - Geological Society of Malaysia Bulletin, Vol. 12, S. 55-74.
- Poschlod, K. (1990): Das Wasser im Porenraum kristalliner Naturwerksteine und sein Einfluss auf die Verwitterung. - Münchner Geowissenschaftliche Abhandlungen, Vol. 7, 62. S.
- Powell, C. M. A. (1979): A morphological classification of rock cleavage. - Tectonophysics, Vol. 58, S. 21-34.
- Priest, S. D. (1993): Discontinuity analysis for rock engineering. - Chapman and Hall, London, 473 S.
- Prikryl, R. (2001): Some microstructural aspects of strength variations in rocks. - International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 38 (5), S. 671-682.
- Primavori, P. (1999): Planet stone. - Giorgio Zusi Editore S. A. S., Verona, 326 S.
- Prinz, H. (1997): Abriss der Ingenieurgeologie. - Ferdinand Enke Verlag Stuttgart, 546 S.
- Punyaprasiddhi, P. (1980): Investigation of the geology and mineralisation of tin and tungsten at Samoeng Mine area, North Thailand. - Unpublished Ph.D. thesis, University of Sheffield, England, 236 S.
- Purtak, F. (2001): Tragfähigkeit von schlankem Quadermauerwerk aus Naturstein. - Dissertation, Technischen Universität Dresden, 106 S.
- Putthapiban, P. & Suensilpong, S. (1978): The igneous geology of the granitic rocks from the Hup Kapong - Hua Hin area. - Journal of the Geological Society of Thailand, Vol. 3 (1), S. M1/1- M1/22.
- Ramdohr, P. & Strunz, H. (1978): Klockmanns Lehrbuch der Mineralogie. - 16. Auflage, Ferdinand Enke Verlag, 876 S.
- Ramsay, J. G. & Huber, M. I. (1987): The techniques of modern structural geology. - In: Folds and fractures 2, Academic Press London.
- Reineck, H. E. & Singh, I. B. (1980): Depositional sedimentary environments. - Springer Verlag, 551 S.
- Reinsch, D. (1991): Natursteinkunde: Eine Einführung für Bauingenieure, Architekten, Denkmalpfleger und Steinmetze. - Ferdinand Enke Verlag Stuttgart, 315 S.
- Richter, D. & Simmons, G. (1974): Thermal expansion behaviour of igneous rocks. - International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanical Abstracts, Vol. 11, S. 403-411.
- Ridd, M. F. (1980): Possible Palaeozoic drift of Southeast Asia and Triassic collision with China. - Journal of the Geological Society of London, Vol. 137, S. 635-660.
- Ritter, H. (1992): Die Marmorplatten sind falsch dimensioniert. - Stein H.1/1992, S. 18-19.
- Ruedrich, J. M. (2003): Gefügekontrollierte Verwitterung natürlicher und konservierter Marmore. - Dissertation, Universität Göttingen, 158 S.

- Ruedrich, J. M., Kirchner, D., Seidel, M. & Siegesmund, S. (2005): Beanspruchungen von Naturwerksteinen durch Salz- und Eiskristallisation im Porenraum sowie hygrische Dehnungsvorgänge. - Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Vol. 156 (1), S. 59-73.
- Ruetk, P. (1997): Der richtige Stein am richtigen Ort. - NaturBauStein, Mai '97, S. 3-6.
- Sage, J. D. (1988): Thermal microfracturing of marble. - In: Marinos, P. & Koukis, G. (Eds): Engineering Geology of Ancient Works, Balkema, Rotterdam, S. 1013-1018.
- Sampattavanija, S, Sukserm, W., Utha-aroon, C. & Jaitabutra, A. (1992): Review on some important industrial minerals and rocks in Thailand. - Proceedings of the National Conference on "Geologic resources of Thailand: Potential for future development", 17-24 November 1992, Department of Mineral Resources, Bangkok, Thailand.
- Sashida, K. I., Igo, O. H., Adachi, S., Ueno, K., Nakornsri, N. & Ampornmaha, A. (1994): The Permian/ Triassic boundary in the bedded chert sequence in Northern Thailand. - In: Proceedings of the International Symposium on Stratigraphic Correlation of Southeast Asia, DMR, Bangkok, S. 130 (Abstract).
- Sattayarak, N. (1983): Review of the continental Mesozoic stratigraphy of Thailand. - Workshop on stratigraphic correlation of Thailand and Malaysia, Hat Yai, S. 127-148.
- Sattayarak, N., Srigulwong, S. & Pum-Im, S. (1989): Petroleum potential of the Triassic pre Khorat intermontane basin in Northwestern Thailand. - In: Thanasuthipitak, T. & Ounchanum, P. (Ed.): Intermontane Basins: Geology and Resources. - Proceedings of an International Symposium, Chiang Mai, S. 43-58.
- Schild, M., Siegesmund, S. Vollbrecht, A. & Mazurek, M. (2001): Characterisation of granite matrix porosity and pore-space geometry by in-situ and laboratory methods. - Geophysical Journal International, Vol. 146, S. 111-125.
- Schmidt, S. T. & Robinson, D. (1997): Metamorphic grade and porosity and permeability controls on mafic phyllosilicates distributions in a regional zeolite- to greenschist-facies transition of the North Shore Volcanic Group, Minnesota. - Geological Society of America Bulletin, Vol. 109, S. 683-697.
- Schön, J. (1983): Petrophysik: physikalische Eigenschaften von Gesteinen und Mineralen. - Akademie-Verlag, Berlin, 405 S.
- Schuh, H. (1987): Physikalische Eigenschaften von Sandsteinen und ihren verwitterten Oberflächen. - Münchner Geowissenschaftliche Abhandlungen 6, Reihe B: Allgemeine und angewandte Geologie, 66 S.
- Selonen, O. (1998): Exploration for dimension stones - geological aspects. - Ph.D. thesis of the Abo Akademi University of Turku, 64 S.
- Selonen, O., Luodes, H. & Ehlers, C. (2000): Exploration for dimensional stone - implications and examples from the Precambrian of Southern Finland. - Engineering Geology, Vol. 56, S. 275-291.

- Selonen, O., Luodes, H. & Ehlers, C. (2003): Natural stone in Finland - production and development. - *Vuoriteollisuus*, Vol. 61 (3), S. 39-43.
- Selonen, O. & Ramsay, A. (2002): Development of products from Finnish granite quarries. - *Roc Maquina*, Vol. 47, S. 38-40.
- Selonen, O., Ramsay, A. & Tolvanen, P. (2001): Use of the by-product of dimension stone quarries. - In: Kuula-Väisänen, P. & Uusinoka, R. (Ed.): *Proceedings of aggregate 2001 - environment and economy*, 6.-10. Aug. 2001, Helsinki, Finland, Vol. 1. Tampere University of Technology, Laboratory of Engineering Geology, Publikation 50, S. 231-235.
- Selonen, O. & Suominen, V. (Ed.) (2003): *Nordic stone*. - Paris: UNESCO: IAEG. 64 S.
- Sengör, A. M. C. (1984): The Cimmerides of Eastern Asia: History of the eastern end of Palaeo-Tethys. - *Mem. Soc. Geol. France*, Vol. 147, S. 139-167.
- Sengör, A. M. C. (1985): Die Alpen und die Kimmeriden: Die verdoppelte Geschichte der Tethys. - *Geologische Rundschau*, Vol. 74 (1), S. 181-213.
- Shau, Y. H. & Peacor, D. R. (1992): Phyllosilicates in hydrothermally altered basalts from DSDP Hole 504 B, leg 83_A TEM and AEM study. - *Contributions to mineralogy and petrology*, Vol. 112, S. 110-133.
- Siegesmund, S. (1996): The significance of rock fabrics for the geological interpretation of geophysical anisotropies. - *Geotektonische Forschungen*, Vol. 85, 123 S.
- Siegesmund, S., Ullemeyer, K., Weiss, T. & Tschegg, E. K. (2000): Physical weathering of marbles caused by anisotropic thermal expansion. - *International Journal of Earth Sciences*, Vol. 89, S. 170-182.
- Siegesmund, S., Vollbrecht, A., Chlupac, T., Nover, G., Duerrast, H., Mueller, J. & Weber, K. (1993): Fabric controlled anisotropy of petrophysical properties observed in KTB-core samples. - *Sci. Drilling*, Vol. 4, S. 31-54.
- Siegesmund, S., Vollbrecht, A., Ullemeyer, K., Weiss, T. & Sobott, R. (1997): Application of geological fabric analyses for the characterisation of natural building stones - cases study Kaufung marble (in german). - *International Journal for Restoration of Buildings and Monuments*, Vol. 3, 269-292.
- Siegesmund, S., Weiss, T., Vollbrecht, A. & Ullemeyer, K. (1999): Marble as a natural building stone: rock fabrics, physical and mechanical properties. - *Zeitschrift der deutschen geologischen Gesellschaft*, Vol. 150 (2), S. 237-257.
- Simons, D. B., Richardson, E. V. & Nordin, C. F. (1965): Sedimentary structures generated by flow in alluvial channels. - In: Middleton, G. V. (Ed.): *Primary sedimentary structures and their hydrodynamic interpretation*. SEPM Special Publication, Vol. 12, S. 34-52.
- Singewald, C. (1992): *Naturstein - Exploration und Gewinnung*. - Rudolf Mueller, Bad Bentheim, 260 S.
- Sitthitaworn, E. & Wasuwanich, P. (1992): Metallogenic map of Thailand. - In: Pianchaoren, E. (Ed.): *Proceedings of the National Conference on "Geologic resources of*

- Thailand: Potential for future development”, 17-24 November 1992, Department of Mineral Resources, Bangkok, Thailand.
- Smith, M. R. (Ed) (1999): Stone: Building stone, rock fill and armour stone in construction. - Geological Society of London, Engineering Geology Special Publications, Vol. 16.
- Smorodinov, M. I., Motovilov, E. A. & Volkov, V. A. (1970): Determinations of correlation relationships between strength and some characteristics of rocks. - In: Proceedings of the 2nd Congress for the International Society of Rock Mechanics 2, Beograd, Yugoslavia, 3.
- Snethlage, R. (1984): Steinkonservierung: Forschungsprogramm des Zentrallabors für Denkmalpflege, 1979-1983, Arbeitsheft. - Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege 22, 203 S.
- Snethlage, R., Wendler, E. (1997): Moisture cycles and sandstone degradation. - In: Baer, N. S. & Snethlage, R. (Eds.): Saving our Architectural Heritage: The Conservation of Historic Stone Structures. S. 7-24.
- Sousa, L. M. O., Suarez del Rio, L. M., Calleja, L., Ruiz de Argandona, V. G. & Rey, A. R. (2005): Influence of microfractures and porosity on the physico-mechanical properties and weathering behaviour of ornamental granites. - Engineering geology, Vol. 77, S. 153-168.
- Stauffer, P. H. (1973): Malaya and Southeast Asia in the pattern of continental drift. - Geological Society of Malaysia Bulletin, Vol. 7, 89-138.
- Stephenson, D. E. & Traindafilidis, G. E. (1974): Influence of specimen size and geometry of uniaxial compressive strength of rocks. - Bulletin of the Association of Engineering Geologists, Vol. 11 (1), S. 29-47.
- Stewart, D. R. (1986): A review of techniques for predicting the natural fragmentation characteristics of block caving orebodies. - In: Karmis, M. (Ed.): Application of rock characterisation techniques in mine design, SME, USA, S. 181-189.
- Streckeisen, A. (1976): To each plutonic rock its proper name. - Earth Science Rev., Vol. 12, S. 1-34.
- Strohmeier, D. (2003): Gefügeabhängigkeit technischer Gesteinseigenschaften. - Dissertation, Universität Göttingen, 254 S.
- Strohmeier, D. & Siegesmund, S. (2002): Anisotropic technical properties of building stones and their development due to fabric changes. - In: Siegesmund, S., Weiss, T. & Vollbrecht, A. (Eds.): Natural stone, Weathering phenomena, Conservation strategies and Case studies. Geological Society of London, Special Publications, Vol. 205, S. 107-127.
- Taboada, J., Vaamonde, A. & Saavedra, A. (1999): Evaluation of the quality of a granite quarry. - Engineering Geology, Vol. 53, S. 1-11.
- Taboada, J., Vaamonde, A., Saavedra, A. & Alejano, L. (1997): Applications of geostatistical techniques to exploration planning in slate quarries. Engineering Geology, Vol. 47, S. 269-277.
- Taboada, J., Vaamonde, A., Saavedra, A. & Arguelles, A. (1998): Quality index for ornamental slate deposits. - Engineering Geology, Vol. 50, S. 203-210.

- Tapponier, P., Peltzer, G. & Amijo, R. (1986): On the mechanism of the collision between India and Asia. - Geological Society of London, Special Publications, Vol. 19, S. 115-157.
- Teggin, D. E. (1975): The granites of Northern Thailand. - Unpublished Ph.D. thesis, University of Manchester, England.
- Tercan, A. E. & Özcelik, Y. (2000): Geostatistical evaluation of dimension stone quarries. - Engineering Geology, Vol. 58, S. 25-33.
- Terezopoulos, N. (2004): The challenge for European ornamental stones.
- Thompson, A. M. (1970): Geochemistry of color genesis in red-bed sequence, Juniata and Bald Eagle Formations, Pennsylvania. - Journal of Sedimentary Petrology, Vol. 40, S. 599-615.
- Tschegg, E. K., Widhalm, C. & Eppensteiner, W. (1999): Ursachen mangelnder Formbeständigkeit von Marmorplatten. - Zeitschrift der deutschen geologischen Gesellschaft, Vol. 150 (2), S. 283-297.
- Tucker, M. (2001): Sedimentary petrology: an introduction to the origin of sedimentary rocks. - Blackwell Science, Oxford, 262 S.
- Tulyatid, J. (1991): A $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronological study of deformed meta-granitoid rocks adjacent to the Hua Hin - Pranburi fault system, peninsular Thailand. - Unpublished M.Sc. thesis, Queen's University of Kingston, Ontario, Canada.
- Tulyatid, J. (1992): Airborne radiometric data interpretation as an aid to granitic terrain mapping: a case study for the Hua Hin - Pran Buri area, South Central Thailand. - Proceedings of the National Conference on "Geologic resources of Thailand: Potential for future development", 17-24 November 1992, Department of Mineral Resources, Bangkok, Thailand.
- Ullemeyer, K., Spalthoff, P., Heinitz, J., Isakov, N. N., Nikitin, A. N. & Weber, K. (1988): The SKAT texture diffractometer at the pulsed reactor IBR-2 at Dubna: experimental layout and first measurements. - Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, A 412/1, S. 80-88.
- Van Houten, F. B. (1972): Iron and clay in tropical savanna alluvium, northern Columbia: a contribution to the origin of red beds. - Geological Society of America Bulletin, Vol. 83, S. 2761-2772.
- Van Houten, F. B. (1973): Origin of red beds - a review: 1961-72. - Annual Review of Earth and Planetary Sciences, Vol. 1; S. 39-61.
- Vereinte Nationen (1976): The development potential of dimension stone. - Department of Economic and Social Affairs, ST/ESA/34, New York, 95 S.
- Vereinte Nationen (2001): Atlas of mineral resources of the ESCAP region. Vol. 16: Mineral resources of Thailand. - Economic and Social Commission for Asia and the Pacific & Department of Mineral Resources of Thailand. New York, 239 S.
- Vernon, R. H. (2004): A practical guide to rock microstructure. - Cambridge University Press, 594 S.

- Vollbrecht, A., Rust, S. & Weber, K. (1991): Development of micro cracks in granite during cooling and uplift: examples from the Variscan in NE-Bavaria, Germany. - *Journal of Structural Geology*, Vol. 13, S. 787-799.
- Walker, T. F. (1967): Color of recent sediments in tropical Mexico: a contribution to the origin of red beds. - *Geological Society of America Bulletin*, Vol. 78, S. 917-920.
- Wang, H., Latham, J. P. & Matheson, G. D. (1992): Design of fragmentation blasting in surface rock excavation. - In: Hudson, J. A. (Ed.): *Proceedings of the ISRM Symposium EUROCK '92*, Thomas Telford, London, S. 233-238.
- Wang, H., Latham, J. P. & Poole, A. B. (1990): In-situ block size assessment from discontinuity spacing data. - In: Price D. G. (Ed): *Proceedings of the 6th International IAGE Congress*, Balkema, Rotterdam, S. 117-127.
- Wang, H., Latham, J. P. & Poole, A. B. (1991): Prediction of block size for quarrying. - *Quarterly Journal of Engineering Geology*, Vol. 24, S. 91-99.
- Ward, D. E. & Bunnag, D. (1964): Stratigraphy of the Mesozoic Khorat-Group in northeastern Thailand. - Department of Mineral Resources, Rep. of Investigation 6, Bangkok.
- Weber, J. (2000): Kieselsäurediagenese und gekoppelte Sedimentarchitektur: eine Beckenanalyse des Rheinhardswald-Troges (Norddeutsches Becken, Solling-Folge, Mittlerer Buntsandstein). - *Kölner Forum für Geologie und Paläontologie*, Vol. 7, 165 S.
- Weber, J., Dehnhart, J. & Lepper, J. (2001): Trennflächenanalyse zur Vorratsermittlung von Naturwerkstein-Lagerstätten. - *Zeitschrift für angewandte Geologie*, Vol. 47 (2), S. 74-78.
- Weiss, G. (1992): Die Eis- und Salzkristallisation im Porenraum von Sandsteinen und ihre Auswirkung auf das Gefüge unter besonderer Berücksichtigung gesteinspezifischer Parameter. - Technische Universität München, München.
- Weiss, T. Rasolofosaon, P. N. J. & Siegesmund, S. (2001): Thermal microcracking in Carrara marble. - *Zeitschrift der deutschen geologischen Gesellschaft*, Vol. 152 (2-4), S. 621-636.
- Weiss, T., Siegesmund, S. & Fuller, E. R. (2003): Thermal degradation of marble: indications from finite-element modelling. - *Building and Environment*, Vol. 38, S. 1251-1260.
- Wellman, H. W. & Wilson, A. T. (1965): Salt weathering, neglected geological erosive agent in coastal and arid environments. - *Nature*, Vol. 205, S. 1097-1098.
- Wellmer, F.-W. (1981): Geological interpretation of geophysical data of a volcanic terrain in the Canadian shield: an example from basement exploration activities in the Savant Lake-Sturgeon Lake area, Province of Ontario, Canada. - *Zeitschrift der deutschen geologischen Gesellschaft*, Vol. 132, S. 215-239.
- Wellmer, F.-W. & Greinwald, S. (1982): Optimale Methodenkombination in der Exploration. - *Zeitschrift der deutschen geologischen Gesellschaft*, Vol. 133, S. 509-533.
- Wenk, H. R., Takeshita, T., Bechler, E., Erksine, B. G. & Matthies, S. (1987): Pure shear and simple shear on calcite textures. Comparison of experimental, theoretical and natural data. - *Journal of Structural Geology*, Vol. 9, S. 731-745.

- Whateley, M. K. G. & Harvey, P. K. (1994): Mineral resource evaluation. Part 2: Methods and case histories. - Geological Society, London, Special Publications, Vol. 79.
- Wimmenauer, W. (1985): Petrographie der magmatischen und metamorphen Gesteine. - Ferdinand Enke Verlag Stuttgart, 382 S.
- Winkler, E. M. (1994): Stone in architecture. - Springer, New York, 303 S.
- Winkler, E. M. & Singer, P. C. (1972): Crystallisation pressure of salts in stone and concrete. - Geological Society of America Bulletin, Vol. 83, S. 3509-3514.
- Wolfart, R. (1987): Geology of Amphoe Sop Prap (Sheet 1:50.000 No. 4844-1) and Amphoe Wang Chin (Sheet 1:50.000 No. 4944-4). - Geologisches Jahrbuch, Reihe B: Regionale Geologie Ausland, Vol. 65, 52 S.
- Wu, J. C. (2002): The mineral industry of Thailand. - U. S. Geological Survey Minerals Yearbook.
- Xu, J. & Cofean, R. (1990): Three-dimensional simulation of natural rock granulometry (in French). - In: Price, D. G. (Ed.): Proceedings of the 6th International Congress IAGE, Balkema, Rotterdam, S. 797-802.
- Zeza, U., Mssara, E. P., Massa, V. & Venchiarutti, D. (1985): Effect of temperature on iontergranular decohesion of the marbles. - Proceedings 5th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Lausanne, Vol. 1, S. 131-140.
- Zinkernagel, U. (1978): Cathodoluminescence of quartz and its application to sandstone petrology. - Schweizerbartsche Verlagsbuchhandlung, 69 S.

Geologische Karten:

- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (1976): Geological Map of Thailand, 1:250.000, Sheet (Chiang Rai) 2
- Geological Survey Division (1974): Geological Map of Thailand 1:250.000, NE 47-11, Changwat Uttaradit.
- Geological Survey Division (1976): Geological Map of Thailand, 1:250.000, NE 47-15, Changwat Phitsanoulak
- Geological Survey Division (1977): Geological Map of Thailand, 1:250.000, ND 47-4, Amphoe Ban Mi
- Geological Survey Division (1984): Geological Map of Thailand, 1:250.000, ND 47-12, Bangkok Metropolis
- Geological Survey Division (1985): Geological Map of Thailand, 1:250.000, ND 47-15, Amphoe Hua Hin
- Geological Survey Division (1985): Geological Map of Thailand, 1:250.000, ND 48-9, Batdambang
- Geological Survey Division (1985): Geological Map of Thailand, 1:250.000, ND 47-11, Changwat Nakhorn Pathom
- Geological Survey Division (1985): Geological Map of Thailand, 1:250.000, ND 47-8, Changwat Phranakhon Si Ayutthaya

Anhang

Anhang I: Auflistung der untersuchten Lagerstätten und Proben

Anhang II: Datenblätter der untersuchten Naturwerksteine

1. BT-Black
2. BT-Blue
3. BT-White
4. MT-Orange1
5. MT-Orange2
6. BT-Violet
7. SN-Blue
8. BN-Pink
9. PTC-Black
10. HH-Grey
11. NB-Orange
12. PS-Grey
13. SP-Grey
14. MC-Yellow

15. PC-Red
16. PC-White
17. PC-Grey
18. TS-Grey
19. TS-Pink
20. PK-Grey
21. PK-Pink
22. BTD-White
23. MP-Yellow
24. KH-Red

25. S-Brown
26. S-Yellow
27. S-White
28. S-Rainbow
29. PC-Green
30. S-Red

Anhang III: Lagerstättenenerträge, Blockgrößen und durchschnittliche Blockabmessungen

Anhang IV: Maximale Abstandsverteilung der Trennflächen in den Lagerstätten

Anhang I: Auflistung der untersuchten Lagerstätten und Proben

Tab. 1: Übersicht der untersuchten Lagerstätten und Proben magmatischer Gesteine.

	Lokation (Distrikt, Provinz)	Koordinaten	Firma	Gesteinsart	Probe
01	Ban Namdip, Tak	N 17° 02.627 ' E 099° 10.124 '	Union Alloy	Granit	BN-Pink
02	Ban Tak, Tak	N 17° 11.740 ' E 099° 11.780 '	Granito Granite	Granit	BT-Violet
03	Ban Tak, Tak	N 17° 07.247 ' E 099° 08.877 '	Granito Granite	Quarz-Monzonit	BT-Blue1
04	Ban Tak, Tak	N 17° 07.105 ' E 099° 08.761 '	Granito Granite	Quarz-Monzodiorit	BT-Black
05	Ban Tak, Tak	N 17° 07.053 ' E 099° 08.963 '	Silamane	Quarz-Monzodiorit	-
06	Ban Tak, Tak	N 17° 16.102 ' E 099° 16.375 '	Tak Granite Mining	Granit	SN-Blue
07	Ban Tak, Tak	N 17° 14.149 ' E 099° 16.684 '	Tak Granite Mining	Granit	-
08	Muang, Tak	N 16° 57.032 ' E 099° 09.658 '	Saha-Heng	Granit	MT-Orange1
09	Muang, Tak	N 16° 54.436 ' E 099° 10.720 '	Silamane	Granit	MT-Orange2
10	Ban Tak, Tak	N 17° 07.860 ' E 099° 08.688 '	Silamane	Granit	BT-White
11	Ban Tak, Tak	N 17° 05.470 ' E 099° 07.808 '	Silamane	Quarz-Monzodiorit	BT-Blue2
12	Ban Tak, Tak	N 17° 12.047 ' E 099° 11.673 '	Granito Granite	Granit	-
13	Ban Tak, Tak	N 17° 07.594 ' E 099° 07.764 '	Granito Granite	Granit	-
14	Ban Tak, Tak	N 17° 08.049 ' E 099° 07.857 '	Asia Marble	Granit	-
15	Mae Chan Chiang Rai	N 20° 07.169 ' E 099° 46.109 '	privat	Granit	MC-Yellow
16	Nong Bua, Nakhon Sawan	N 15° 53.929 ' E 100° 37.344 '	Oriental Granite	Granit	NB-Orange
17	Nong Bua, Nakhon Sawan	N 15° 54.018 ' E 100° 37.421 '	Oriental Granite	Granit	-
18	Nong Bua, Nakhon Sawan	N 15° 53.851 ' E 100° 37.066 '	New York Orange	Granit	-
19	Phanom Salakam, Chachoengsao	N 13° 46.631 ' E 101° 31.567 '	P. V. Marble & Granite	Gneisischer Granit	PS-Grey
20	Suan Phung, Ratchaburi	N 13° 31.984 ' E 099° 25.614 '	Union Alloy	Granit	SP-Grey
21	Hua Hin, Prajub Khiri Khan	N 12° 28.535 ' E 099° 56.592 '	Saha-Heng	Gneis	HH-Grey
22	Hua Hin, Prajub Khiri Khan	N 12° 27.951 ' E 099° 55.969 '	Saha-Heng	Gneis	-
23	Wang Nam Kiew, Nakhon Ratchasima	N 14° 28.100 ' E 101° 44.357 '	Victory Granite	Hornblendit	PTC-Black

Tab. 2: Übersicht der untersuchten Lagerstätten und Proben der Marmore und Kalksteine. Anmerkung: Das Probenmaterial der Kalksteine beinhaltet eine weitere Probe (MP-Yellow, Provinz Tak), deren Lagerstätten jedoch nicht erfasst wurde.

	Lokation (Distrikt, Provinz)	Koordinaten	Firma	Gesteinsart	Probe
01	Phran Kratai, Kampheng Phet	N 16° 41.258 ' E 099° 32.224 '	Sawang Marble	Marmor	PK-Grey, PK-Pink
02	Ban Tamdin, Uttaradit	N 17° 29.328 ' E 100° 20.463 '	Sila UD Marble	Marmor	BTD-White
03	Thung Saliam, Sukhothai	N 17° 20.413 ' E 099° 30.779 '	Sukhothai Marble	Marmor	TS-Grey, TS-Pink
04	Pakchong, Nakhon Ratchasima	N 14° 32.519 ' E 101° 26.350 '	Petchpattara Sila Siam	Marmor	PC-White, PC-Red
05	Pakchong, Nakhon Ratchasima	N 14° 32.568 ' E 101° 26.435 '	Chiang Heng	Marmor	-
06	Pakchong, Nakhon Ratchasima	N 14° 31.546 ' E 101° 25.297 '	Khao Yai Tachang Marble	Marmor	PC-Grey
07	Pakchong, Nakhon Ratchasima	N 14° 33.220 ' E 101° 31.737 '	Khao Yai Tachang Marble	Kalkstein	-
08	Khlong Hat, Sakaeo	N 13° 28.228 ' E 102° 17.496 '	Prachin Marble	Kalkstein	KH-Red

Tab. 3: Übersicht der untersuchten Lagerstätten und Proben der Sandsteine.

	Lokation (Distrikt, Provinz)	Koordinaten	Firma	Gesteinsart	Probe
01	Pakchong, Nakhon Ratchasima	N 14° 39.095 ' E 101° 41.026 '	privat	grüner Sandstein	PC-Green
02	Pakchong, Nakhon Ratchasima	N 14° 38.287 ' E 101° 41.425 '	privat	grüner Sandstein	-
03	Sikhiu, Nakhon Ratchasima	N 14° 58.609 ' E 101° 44.737 '	privat	roter Sandstein	S-Red
04	Sikhiu, Nakhon Ratchasima	N 14° 59.201 ' E 101° 44.843 '	privat	roter Sandstein	-
05	Sikhiu, Nakhon Ratchasima	N 14° 58.528 ' E 101° 44.862 '	privat	roter Sandstein	-
06	Sikhiu, Nakhon Ratchasima	N 15° 03.335 ' E 101° 45.541 '	privat	roter Sandstein	-
07	Sikhiu, Nakhon Ratchasima	N 14° 57.461 ' E 101° 46.151 '	privat	roter Sandstein	-
08	Sikhiu, Nakhon Ratchasima	N 14° 54.404 ' E 101° 28.928 '	privat	gelber Sandstein	S-Yellow
09	Sikhiu, Nakhon Ratchasima	N 14° 54.418 ' E 101° 28.848 '	privat	gelber Sandstein	-
10	Sikhiu, Nakhon Ratchasima	N 14° 53.242 ' E 101° 29.912 '	privat	gelber Sandstein	-
11	Sikhiu, Nakhon Ratchasima	N 14° 54.185 ' E 101° 30.164 '	privat	gelber Sandstein	-
12	Sikhiu, Nakhon Ratchasima	N 14° 52.598 ' E 101° 32.407 '	privat	gelb-brauner Sandstein	-
13	Sikhiu, Nakhon Ratchasima	N 14° 54.670 ' E 101° 30.040 '	privat	brauner Sandstein	S-Brown
14	Sikhiu, Nakhon Ratchasima	N 14° 53.068 ' E 101° 30.343 '	privat	weißer Sandstein	S-White, S-Rainbow

Petrographische Bezeichnung: **Quarz-Monzodiorit**

Handelsname: **Dam Thai**

Probenname: **BT-Black**

Stratigraphisches Alter: **Trias**

Makroskopische Merkmale:

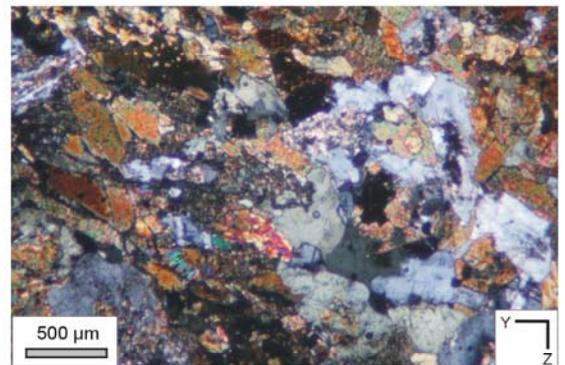
Feinkörniges Gestein mit dunkler Farbgebung, die sich aus dem hohen Anteil von Amphibol und Biotit ergibt. Der Anteil heller Feldspäte tritt optisch nur wenig hervor. In einigen Fällen kommt es bei den Hornblenden zu einer Chloritisierung, so dass die Minerale einen leichten Grünton annehmen können.

K-Feldspat : 2-10 mm; hypidiom.-xenom.; grau, weiß
 Plagioklas : 2-10 mm; hypidiom.; weiß, grau, creme-farbend
 Quarz: 1-5 mm; hypidiom.; grau
 Biotit: 1-3 mm; xenom.; schwarz, grünlich
 Hornblende: 1-3 mm; hypidiom.-xenom.; Schwarz, grünlich; kurzprismatisch



Mikroskopische Merkmale:

Korngefüge: equigranular mit richtungslos-körniger Anordnung der Minerale
 Deformationsstrukturen: undulöse Auslöschung in Quarz



Richtungslose gesteintechnische Eigenschaften:

Matrixdichte [g/cm³]: 2.88
 Rohdichte [g/cm³]: 2.87
 Porosität [Vol.-%]: 0.39 (Auftrieb)/ 0.05 (Hg)
 Mittl. Porenradienklasse [µm]: 0.469
 Sättigungsbeiwert: 0.93

Mineralogische Zusammensetzung (Vol.-%) nach röntgenographischer Analyse (RDA):

Quarz: 6.6
 K-Feldspat: 6.6
 Plagioklas: 40.5
 Biotit: 8.8
 Amphibol: 24.0
 Serizit: 8.2
 Chlorit: 5.9
 Akzessorisch: Rutile, F-Apatit

Durch Polarisationsmikroskopie nachgewiesen: Titanit, Pyrit

Richtungsabhängige gesteintechnische Eigenschaften:

	<i>X-Richtung</i>	<i>Y-Richtung</i>	<i>Z-Richtung</i>
Wasserdampfdiffusion (µ):	4016.61	3225.03	2847.93
Druckfestigkeit [MPa]:	173.83 +/- 21.22	178.43 +/- 42.96	171.21 +/- 30.98
Spaltzugfestigkeit [MPa]:	14.38 +/- 1.43	14.66 +/- 2.89	12.48 +/- 1.80
Biegezugfestigkeit [MPa]:	30.32 +/- 2.26	28.86 +/- 1.13	25.77 +/- 1.83
Abriebfestigkeit [cm³/50cm²]:	9.00	7.90	8.20
Ausdehnungskoeffizient [*10 ⁻⁶ K ⁻¹]:	7.73	7.64	8.55
Restdehnung [mm/m]:	0.00	0.00	0.00
Statischer E-Modul [GPa]:	24.33	28.08	25.46
Vp, trocken [km/s]:	5.628	5.567	5.528
Vp, nass [km/s]:	5.890	5.762	5.718

Petrographische Bezeichnung: **Quarz-Monzonit**

Probenname: **BT-Blue**

Handelsname: **Famaneer (G 200)**

Stratigraphisches Alter: **Trias**

Makroskopische Merkmale:

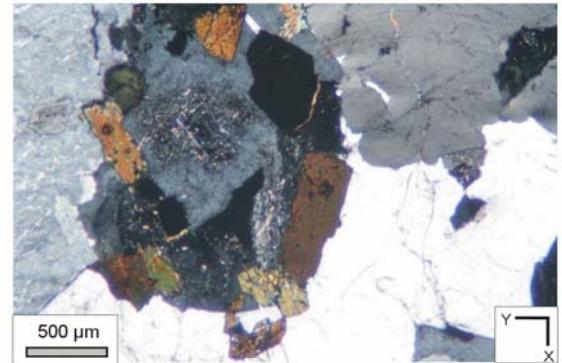
Mittel- bis grobkörniger Granit mit grau-bläulicher Farbe. Obwohl das Gestein mehrheitlich richtungslos-körnig ausgebildet ist, können mafische Minerale und Feldspäte lokal eine bevorzugte Orientierung aufweisen. Zudem sind Schwankungen in der Korngröße möglich. Eine feinkörnigere Ausbildung ist dabei stets mit einem höheren Anteil mafischer Minerale verbunden.

K-Feldspat : 10-30 mm; hypidiom.; grau, leicht bläulich, violett
 Plagioklas : 2-5 mm; hypidiom. bis idiom.; weiß, grau; Zonierung
 Quarz: bis 2 mm; xenom.; farblos, grau; mehrheitlich als Zwickelfüllung
 Biotit: bis 5 mm; hypidiom.; schwarz
 Hornblende: bis 10 mm; idiom.; schwarz; prismatisch; kleine Minerale als Einschluss in K-Fspt und Plag



Mikroskopische Merkmale:

Korngefüge: inequigranular mit richtungslos-körniger Anordnung der Minerale
 Deformationsstrukturen: undulöse Auslöschung in Quarz; intergranulare Risse entlang polygonaler Korngrenzen; intragranulare Risse vorzugsweise in Quarz; Rissysteme sind mit unterschiedlicher Intensität verheilt; Knickfalten, Myrmekite



Richtungslose gesteintechnische Eigenschaften:

Matrixdichte [g/cm³]: 2.66
 Rohdichte [g/cm³]: 2.64
 Porosität [Vol.-%]: 0.91 (Auftrieb)/ 0.37 (Hg)
 Mittl. Porenradienklasse [µm]: 0.065
 Sättigungsbeiwert: 0.60

Mineralogische Zusammensetzung (Vol.-%) nach röntgenographischer Analyse (RDA):

Quarz: 16.6
 K-Feldspat: 38.3 (Mikroklin)
 Plagioklas: 32.6 (Oligoklas)
 Biotit: 3.0
 Amphibol: 1.8
 Serizit: 6.7
 Chlorit: 1.6

Durch Polarisationsmikroskopie nachgewiesen: Epidot, Zirkon, opake Minerale

Richtungsabhängige gesteintechnische Eigenschaften:

	X-Richtung	Y-Richtung	Z-Richtung
Wasserdampfdiffusion (µ):	2872.87	4439.84	3326.80
Druckfestigkeit [MPa]:	179.3 +/- 36.3	188.8 +/- 30.7	184.0 +/- 27.4
Spaltzugfestigkeit [MPa]:	9.41 +/- 1.06	9.05 +/- 1.22	7.02 +/- 1.51
Biegezugfestigkeit [MPa]:	16.11 +/- 1.04	15.52 +/- 1.22	12.66 +/- 0.81
Abriebfestigkeit [cm³/50cm²]:	4.63	4.88	4.92
Ausdehnungskoeffizient [*10 ⁻⁶ K ⁻¹]:	7.97	7.58	7.24
Restdehnung [mm/m]:	0.00	0.00	0.00
Statischer E-Modul [GPa]:	28.77	29.52	27.39
Vp, trocken [km/s]:	5.010	5.125	4.957
Vp, nass [km/s]:	5.759	5.788	5.762

Petrographische Bezeichnung: **Granit**

Probenname: **BT-White**

Handelsname: **Phuey Fay**

Stratigraphisches Alter: **Trias**

Makroskopische Merkmale:

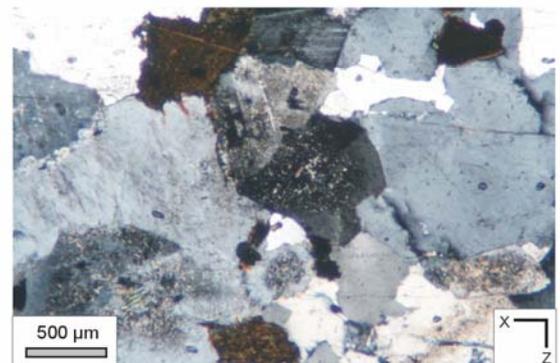
Fein- bis mittelkörniger Granit mit überwiegend gleichbleibender Struktur. Auffallend sind die makroskopisch deutlich hervortretenden dunklen Gemengteile, die einen intensiven Farbkontrast zu den sonst sehr weißen Feldspäten bilden.

- K-Feldspat: 5 mm, als Einsprenglinge 10 mm; hypidiom., idiom.; hellgrau, weiß; teilweise zoniert und mit Einschlüssen mafischer Minerale
- Plagioklas: 3 mm; hypidiom.; weiß; feinstkörnige Aggregate als Saum entlang von K-Feldspat
- Quarz: 2.3 mm; farblos; als Zwickelfüllung oder als verbundene Aggregate; selten einzelne Körner
- Biotit: 1-3 mm; hypidiom., idiom.; schwarz



Mikroskopische Merkmale:

- Korngefüge: equigranular mit richtungslos-körniger Anordnung der Minerale
- Deformationsstrukturen: Schachbrettmuster in Quarz; verheilte intragranulare Mikrorisse in Quarz; Myrmekite innerhalb feinstkörniger Plagioklase; Bulging



Richtungslose gesteintechnische Eigenschaften:

- Matrixdichte [g/cm³]: 2.66
- Rohdichte [g/cm³]: 2.64
- Porosität [Vol.-%]: 0.59 (Auftrieb)/ 0.49 (Hg)
- Mittl. Porenradienklasse [µm]: 0.046
- Sättigungsbeiwert: 0.83

Mineralogische Zusammensetzung (Vol.-%) nach röntgenographischer Analyse (RDA) :

- Quarz: 24.9
- K-Feldspat: 26.2 (Mikroklin)
- Plagioklas: 36.5 (Oligoklas)
- Biotit: 5.8
- Amphibol: -
- Serizit: 4.6
- Chlorit: 1.3
- Aktinolith: accessorisch

Durch Polarisationsmikroskopie nachgewiesen: Hornblende, Titanit

Richtungsabhängige gesteintechnische Eigenschaften:

	<i>X-Richtung</i>	<i>Y-Richtung</i>	<i>Z-Richtung</i>
Wasserdampfdiffusion (µ):	2905.25	2753.52	2788.66
Druckfestigkeit [MPa]:	194.1 +/- 70.6	166.8 +/- 37.6	190.1 +/- 44.7
Spaltzugfestigkeit [MPa]:	11.70 +/- 1.51	10.04 +/- 1.32	10.01 +/- 1.62
Biegezugfestigkeit [MPa]:	21.84 +/- 1.15	17.54 +/- 0.36	19.78 +/- 1.06
Abriebfestigkeit [cm ³ /50cm ²]:	4.58	4.91	4.59
Ausdehnungskoeffizient [*10 ⁻⁶ K ⁻¹]:	7.20	7.99	7.51
Restdehnung [mm/m]:	0.00	0.00	0.00
Statischer E-Modul [GPa]:	31.17	25.58	27.54
Vp trocken [km/s]:	5.192	5.120	5.131
Vp, nass [km/s]:	5.468	5.461	5.292

Petrographische Bezeichnung: **Granit**

Probenname: **MT-Orangel**

Handelsname: **Khao Tone**

Stratigraphisches Alter: **Trias**

Makroskopische Merkmale:

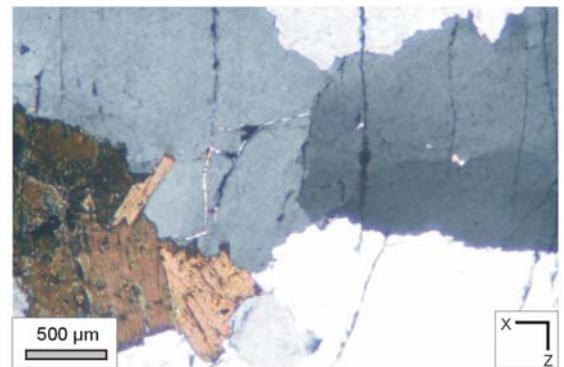
Mittelkörniger Granit mit schwach oranger Farbe der K-Feldspäte. Lokal treten orange Feldspäte nur untergeordnet in Erscheinung, so dass an diesen Stellen ein gräulicher Farbton dominiert. Mafische Minerale sind selten und treten vereinzelt als Nester bis zu einer Größe von 30 mm auf. Das Gestein zeigt keine Texturierung.

- K-Feldspat: 5 mm; orange, pink, selten grau; hypidiom.; xenom.; ungleichmäßig in Bändern oder Nestern verteilt
- Plagioklas: 5 mm; weiß, gräulich, grünlich; hypidiom., xenom.
- Quarz: 5 mm lokal bis 10 mm; grau, hypidiom., xenom., teilweise mit rötlichen Fe-Einlagerungen
- Biotit: 2-3 mm; idiom., hypidiom., schwarz



Mikroskopische Merkmale:

- Korngefüge: equigranular mit richtungslos-körniger Anordnung der Minerale
- Deformationsstrukturen: inter- und intragranulare Risse in K-Feldspat und Quarz, Schachbrettmuster in Quarz, Bulging, Knickfalten im Feldspat



Richtungslose gesteintechnische Eigenschaften:

- Matrixdichte [g/cm³]: 2.62
- Rohdichte [g/cm³]: 2.60
- Porosität [Vol.-%]: 0.76 (Auftrieb)/ 0.35 (Hg)
- Mittl. Porenradienklasse [µm]: 0.054
- Sättigungsbeiwert: 0.73

Mineralogische Zusammensetzung (Vol.-%) nach röntgenographischer Analyse (RDA):

- Quarz: 30.5
- K-Feldspat: 34.2 (Mikroclin, Orthoklas)
- Plagioklas: 26.7 (Albit)
- Biotit: -
- Amphibol: -
- Serizit: 6.4
- Chlorit: 2.2
- Rutil: accessorisch

Durch Polarisationsmikroskopie und Mikrosonde nachgewiesen: Biotit, Epidot, Chlorit, Calcit

Richtungsabhängige gesteintechnische Eigenschaften:

	X-Richtung	Y-Richtung	Z-Richtung
Wasserdampfdiffusion (µ):	4086.43	3878.48	3644.04
Druckfestigkeit [MPa]:	221.4 +/- 0.2	168.8 +/- 9.8	164.4 +/- 9.1
Spaltzugfestigkeit [MPa]:	10.77 +/- 2.04	8.31 +/- 1.70	7.62 +/- 0.77
Biegezugfestigkeit [MPa]:	21.60 +/- 1.07	16.28 +/- 0.78	12.85 +/- 0.72
Abriebfestigkeit [cm ³ /50cm ²]:	4.2	4.0	3.9
Ausdehnungskoeffizient [*10 ⁻⁶ K ⁻¹]:	9.07	8.14	8.60
Restdehnung [mm/m]:	0.00	0.00	0.00
Statischer E-Modul [GPa]:	27.21	26.29	30.87
Vp, trocken [km/s]:	5.112	5.070	5.092
Vp, nass [km/s]:	5.759	5.761	5.701

Petrographische Bezeichnung: **Granit**

Probenname: **MT-Orange2**

Handelsname: **Khao Tone**

Stratigraphisches Alter: **Trias**

Makroskopische Merkmale:

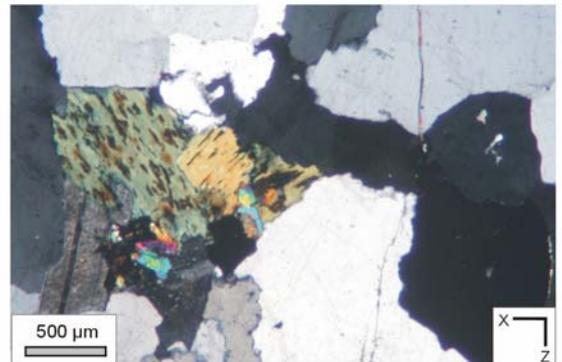
Mittelkörniger Granit mit kräftig oranger Färbung der K-Feldspäte und grauer Färbung der Quarze. Das Feldspat-Quarz-Verhältnis ist sehr differenziert, so dass bei hohem Feldspatanteil der Orangeton stärker hervortritt. Die Minerale sind richtungslos arrangiert. Mafische Xenolithe können bis zu einer Größe von 5 cm erscheinen.

- K-Feldspat: 5 mm; hypidiom., idiom.; orange; teilweise in vernetzten Aggregaten
- Plagioklas: 5 mm; hypidiom.; unregelmäßige, teilweise verwaschene Kontakte zu K-Feldspat; grau, weiß; Farbintensität zum Kristallrand abnehmend
- Quarz: 3-5 mm; idiom.; farblos, rauchig; scharfe mono- und polyphase Korngrenzen; in Aggregaten bis 20 mm
- Biotit: 1-5 mm; hypidiom., idiom.; schwarz



Mikroskopische Merkmale:

- Korngefüge: equigranular mit richtungslos-körniger Anordnung der Minerale
- Deformationsstrukturen: inter- und intragranulare Risse in K-Feldspat und Quarz, Schachbrettmuster in Quarz, Bulging, Knickfalten in Feldspat



Richtungslose gesteintechnische Eigenschaften:

- Matrixdichte [g/cm³]: 2.61
- Rohdichte [g/cm³]: 2.58
- Porosität [Vol.-%]: 0.91 (Auftrieb)/ 0.35 (Hg)
- Mittl. Porenradienklasse [µm]: 0.062
- Sättigungsbeiwert: 0.68

Mineralogische Zusammensetzung (Vol.-%) nach röntgenographischer Analyse (RDA):

- Quarz: 29.9
- K-Feldspat: 31.7 (Mikroklin)
- Plagioklas: 32.7 (Albit)
- Biotit: -
- Amphibol: -
- Serizit: 4.5
- Chlorit: 0.6
- Rutil: accessorisch

Durch Polarisationsmikroskopie und Mikrosonde nachgewiesen: Biotit, Epidot, Chlorit, Calcit

Richtungsabhängige gesteintechnische Eigenschaften:

	<i>X-Richtung</i>	<i>Y-Richtung</i>	<i>Z-Richtung</i>
Wasserdampfdiffusion (µ):	4483.43	4374.87	4080.68
Druckfestigkeit [MPa]:	151.8 +/- 46.9	160.4 +/- 27.7	167.5 +/- 5.7
Spaltzugfestigkeit [MPa]:	9.53 +/- 1.53	8.78 +/- 1.36	7.42 +/- 1.11
Biegezugfestigkeit [MPa]:	16.60 +/- 1.35	16.52 +/- 0.58	12.92 +/- 1.01
Abriebfestigkeit [cm³/50cm²]:	n/a	n/a	n/a
Ausdehnungskoeffizient [$\cdot 10^{-6} K^{-1}$]:	8.51	8.72	9.32
Restdehnung [mm/m]:	0.00	0.00	0.00
Statischer E-Modul [GPa]:	21.43	30.72	22.22
Vp, trocken [km/s]:	5.041	5.000	4.947
Vp, nass [km/s]:	5.744	5.730	5.599

Petrographische Bezeichnung: **Granit**

Probenname: **BT-Violet**

Handelsname: **Sakhura**

Stratigraphisches Alter: **Trias**

Makroskopische Merkmale:

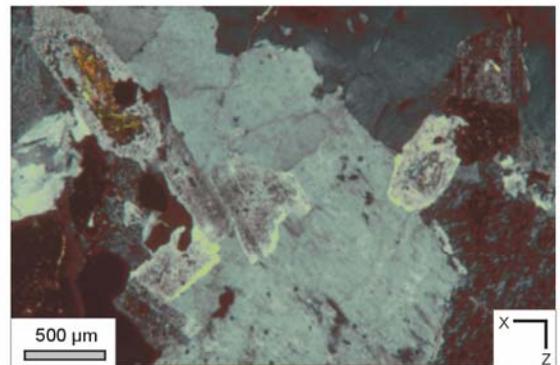
Mittel- bis grobkörniger Granit mit dicht arrangierten, fleischfarbenen K-Feldspäten. Die K-Feldspat-Kristalle sind oval ausgebildet und lokal mit zahlreichen Einschlüssen kleinerer weißer Plagioklase dekoriert. Die Minerale sind richtungslos angeordnet.

K-Feldspat: 10-30 mm; hypidiom., xenom.; kugelig, oval; fleischfarben
 Plagioklas: 5 mm in der Matrix, bis 1 mm als Einschluss in K-Feldspat; selten größer, dann in zusammenhängenden Aggregaten
 Quarz: 1-5 mm; xenom.; farblos; vornehmlich als Zwickelfüllung
 Biotit: 1-5 mm; hypidiom.; schwarz



Mikroskopische Merkmale:

Korngefüge: inequigranular mit richtungslos-körniger Anordnung der Minerale
 Deformationsstrukturen: inter-, intra- und transgranulare Risse, Schachbrettmuster



Richtungslose gesteintechnische Eigenschaften:

Matrixdichte [g/cm³]: 2.66
 Rohdichte [g/cm³]: 2.64
 Porosität [Vol.-%]: 0.79 (Auftrieb)/ 0.44 (Hg)
 Mittl. Porenradienklasse [µm]: 0.051
 Sättigungsbeiwert: 0.79

Mineralogische Zusammensetzung (Vol.-%) nach röntgenographischer Analyse (RDA):

Quarz: 21.2
 K-Feldspat: 38.4 (Mikroklin)
 Plagioklas: 30.4 (Albit)
 Biotit: 1.3
 Amphibol: 0.8
 Serizit: 7.3
 Chlorit: 1.2

Durch Polarisationsmikroskopie nachgewiesen: Titanit

Richtungsabhängige gesteintechnische Eigenschaften:

	X-Richtung	Y-Richtung	Z-Richtung
Wasserdampfdiffusion (µ):	4730.44	4669.98	4582.74
Druckfestigkeit [MPa]:	181.8 +/- 5.0	113.2 +/- 28.4	164.6 +/- 58.8
Spaltzugfestigkeit [MPa]:	9.25 +/- 1.23	9.20 +/- 0.80	7.39 +/- 0.72
Biegezugfestigkeit [MPa]:	15.70 +/- 1.25	17.45 +/- 0.96	10.69 +/- 1.20
Abriebfestigkeit [cm³/50cm²]:	4.58	4.18	4.26
Ausdehnungskoeffizient [*10 ⁻⁶ K ⁻¹]:	8.21	8.18	8.26
Restdehnung [mm/m]:	0.00	0.00	0.00
Statischer E-Modul [GPa]:	27.36	16.58	25.60
Vp, trocken [km/s]:	5.086	5.232	5.224
Vp, nass [km/s]:	5.657	5.648	5.699

Petrographische Bezeichnung: **Granit**

Probenname: **SN-Blue**

Handelsname: **Fah TG/ Khaem Dok Khaw**

Stratigraphisches Alter: **Trias**

Makroskopische Merkmale:

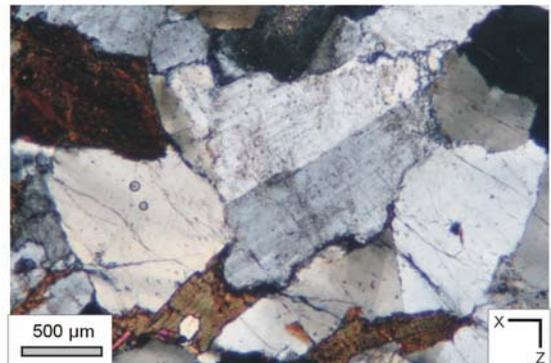
Mittel- bis grobkörniger Granit, der durch eine Grundmasse aus hellem Feldspat und dunklem Biotit, sowie durch gelegentlich auftretende graue bis grau-blaue Feldspat-Porphyrklasten gekennzeichnet ist. Zahlreiche Einschlüsse weißer und grauer Feldspäte in den Porphyrklasten reduzieren die Farbintensität der Kristalle, so dass die bläuliche Farbe nur noch fleckenhaft hervortritt. Zudem sind viele der größeren Feldspat-Kristalle durch xenomorphe, zerfranste Komgrenzen ausgewiesen. Dies führt zu einer lokalen Beeinträchtigung im Gesamtbild des Gesteins.

K-Feldspat: 10-20 mm, als Porphyrklasten bis 40 mm; hypidiom., xenom.; grau, bläulich
 Plagioklas: 5 mm; hypidiom., idiom.; weiß, grau
 Quarz: bis 7 mm; xenom.; als Knollen; lokal in hohen Konzentrationen
 Biotit: 1-2 mm, gelegentlich bis 5 mm; hypidiom., idiom.; teilweise in Nestern mit Größen bis 20 mm



Mikroskopische Merkmale:

Korngefüge: inequigranular mit richtungslos-körniger Anordnung der Minerale
 Deformationsstrukturen: undulöse Auslöschung und Deformationslamellen in Quarz; lokal duktile Verformung der Feldspäte; intragranulare Risse



Richtungslose gesteintechnische Eigenschaften:

Matrixdichte [g/cm³]: 2.67
 Rohdichte [g/cm³]: 2.65
 Porosität [Vol.-%]: 0.85 (Auftrieb)
 Mittl. Porenradienklasse [µm]: n/a
 Sättigungsbeiwert: 0.82

Mineralogische Zusammensetzung (Vol.-%) nach röntgenographischer Analyse (RDA):

Quarz: 34.0
 K-Feldspat: 21.8 (Mikroklin)
 Plagioklas: 29.2 (Oligoklas)
 Biotit: 5.1
 Amphibol: -
 Serizit: 7.7
 Chlorit: 1.6
 Rutil: accessorisch

Durch Polarisationsmikroskopie und makroskopische Untersuchungen nachgewiesen: Epidot, Chlorit, Pyrit, Turmalin

Richtungsabhängige gesteintechnische Eigenschaften:

	X-Richtung	Y-Richtung	Z-Richtung
Wasserdampfdiffusion (µ):	n/a	n/a	n/a
Druckfestigkeit [MPa]:	n/a	n/a	n/a
Spaltzugfestigkeit [MPa]:	n/a	n/a	n/a
Biegezugfestigkeit [MPa]:	n/a	n/a	n/a
Abriebfestigkeit [cm³/50cm²]:	n/a	n/a	n/a
Ausdehnungskoeffizient [$\cdot 10^{-6} K^{-1}$]:	n/a	n/a	n/a
Restdehnung [mm/m]:	n/a	n/a	n/a
Statischer E-Modul [GPa]:	n/a	n/a	n/a
Vp, trocken [km/s]:	n/a	n/a	n/a
Vp, nass [km/s]:	n/a	n/a	n/a

Petrographische Bezeichnung: **Granit**

Probenname: **BN-Pink**

Handelsname: **Fa Namdip/ Famanee ND**

Stratigraphisches Alter: **Trias**

Makroskopische Merkmale:

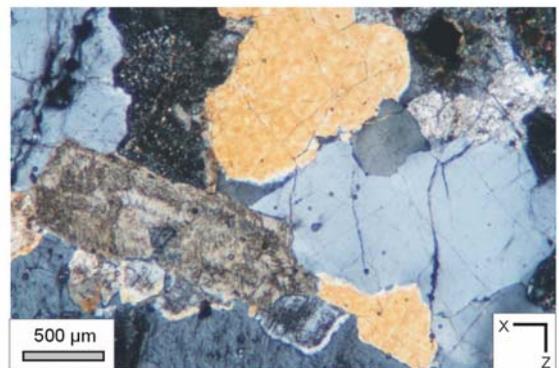
Mittel- bis grobkörniger Granit mit grau-bläulicher Farbe, der durch relativ große K-Feldspäte definiert wird. Die Minerale des Gesteins sind überwiegend richtungslos angeordnet. Bei hoher Konzentration mafischer Gemengteile kann allerdings lokal eine schwach ausgeprägte Fluidaltexur hervortreten.

K-Feldspat: 10-30 mm; xenom.; grau, leicht bläulich, gelegentlich violett
 Plagioklas: >10 mm; xenom., hypidiom.; weiß
 Quarz: 3-4 mm; xenom.; in Form individueller Kristalle und als Zwickelfüllung
 Biotit: 1-3 mm; hypidiom.-xenom.; schwarz



Mikroskopische Merkmale:

Korngefüge: inequigranular mit richtungslos-körniger Anordnung der Minerale
 Deformationsstrukturen: Schachbrettmuster in Quarz; inter-, trans- und intragranulare Risse



Richtungslose gesteintechnische Eigenschaften:

Matrixdichte [g/cm³]: 2.66
 Rohdichte [g/cm³]: 2.65
 Porosität [Vol.-%]: 0.50 (Auftrieb)
 Porenradienklasse [µm]: n/a
 Sättigungsbeiwert: 0.96

Mineralogische Zusammensetzung (Vol.-%) nach röntgenographischer Analyse (RDA):

Quarz: 24.9
 K-Feldspat: 32.5
 Plagioklas: 30.5
 Biotit: 3.6
 Amphibol: -
 Serizit: 7.3
 Rutil: accessorisch

Richtungsabhängige gesteintechnische Eigenschaften:

	X-Richtung	Y-Richtung	Z-Richtung
Wasserdampfdiffusion (µ):	n/a	n/a	n/a
Druckfestigkeit [MPa]:	n/a	n/a	n/a
Spaltzugfestigkeit [MPa]:	n/a	n/a	n/a
Biegezugfestigkeit [MPa]:	n/a	n/a	n/a
Abriebfestigkeit [cm ³ /50cm ²]:	n/a	n/a	n/a
Ausdehnungskoeffizient [*10 ⁻⁶ K ⁻¹]:	n/a	n/a	n/a
Restdehnung [mm/m]:	n/a	n/a	n/a
Statischer E-Modul [GPa]:	n/a	n/a	n/a
Vp, trocken [km/s]:	n/a	n/a	n/a
Vpl, nass [km/s]:	n/a	n/a	n/a

Petrographische Bezeichnung: **Hornblendit**

Probenname: **PTC-Black**

Handelsname: **Dam Nam Wang Kiew**

Stratigraphisches Alter: **Trias**

Makroskopische Merkmale:

Tiefschwarzes Gestein mit nahezu monomineralischer Zusammensetzung (Hornblende) und deutlichen Schwankungen in der Korngröße im Bereich von mittel- bis riesenkörnig. Die Größe der Hornblende-Kristalle kann über eine Distanz von wenigen Zentimetern variieren, so dass sich daran gebunden strukturelle Änderungen des Dekors ergeben können. Eine Chloritisierung der Hornblenden führt gelegentlich zu Farbtonänderungen von schwarz zu schwarz-grünlich. Der Charakter des Gesteins ist zudem durch Feldspäte in den Zwickeln der Hornblenden definiert. Die Feldspäte zeigen eine weiße bis rötliche Farbe und bilden damit einen deutlichen Kontrast zum dunklen Grundton des Gesteins.

Hornblende: 5 - 30 mm, teilweise 20- 50 cm; idiom.; schwarz, grünlich

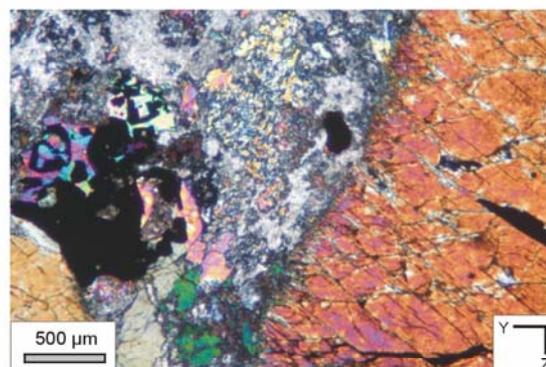
Plagioklas : <20 mm; xenom.; weiß, rötlich



Mikroskopische Merkmale:

Korngefüge: inequigranular mit richtungslos-körniger Anordnung der Minerale

Deformationsstrukturen: keine



Richtungslose gesteintechnische Eigenschaften:

Matrixdichte [g/cm³]: 3.17
 Rohdichte [g/cm³]: 3.16
 Porosität [Vol.-%]: 0.55 (Auftrieb)/ 0.30 (Hg)
 Mittl. Porenradienklasse [µm]: 0.163
 Sättigungsbeiwert: 0.83

Mineralogische Zusammensetzung (Vol.-%) nach röntgenographischer Analyse (RDA):

Quarz: -
 K-Feldspat: -
 Plagioklas: 3.7
 Biotit: -
 Amphibol: 90.3
 Serizit: -
 Chlorit: 4.0
 Akzessorisch: Diopsid, Pyrit

Richtungsabhängige gesteintechnische Eigenschaften:

	<i>X-Richtung</i>	<i>Y-Richtung</i>	<i>Z-Richtung</i>
Wasserdampfdiffusion (µ):	2573.80	3135.55	2732.39
Druckfestigkeit [MPa]:	123.7 +/- 26.7	120.5 +/- 18.7	132.1 +/- 21.6
Spaltzugfestigkeit [Mpa]:	5.32 +/- 0.75	8.90 +/- 1.66	6.23 +/- 1.84
Biegezugfestigkeit [MPa]:	9.06 +/- 3.07	13.43 +/- 2.52	12.08 +/- 1.34
Abriebfestigkeit [cm³/50cm²]:	6.77	7.76	6.61
Ausdehnungskoeffizient [*10 ⁻⁶ K ⁻¹]:	7.29	7.20	6.64
Restdehnung [mm/m]:	0.00	0.00	0.00
Statischer E-Modul [GPa]:	26.79	25.53	33.84
Vp, trocken [km/s]:	5.908	6.315	6.192
Vp, nass [km/s]:	6.080	6.315	6.389

Petrographische Bezeichnung: **Granitischer Gneis**

Probenname: **HH-Grey**

Handelsname: **n/a**

Stratigraphisches Alter: **Präkambrium**

Makroskopische Merkmale:

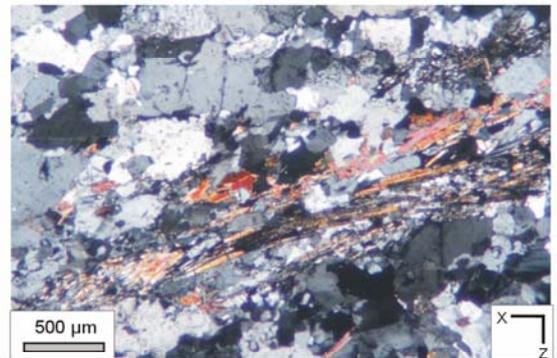
Feinkörniger, leukokrater Granat-Gneis mit deutlich ausgeprägtem metamorphem Lagerbau, der sich aus alternierenden hellen Quarz-Feldspat-Aggregaten und dunklem Biotit zusammensetzt. Die alternierenden Lagen sind dabei regelmäßig durch Kleinklüfte gegeneinander versetzt oder eng gefaltet. Einige Teile des Gesteins sind durch eine beginnende Migmatitisierung gekennzeichnet, die den insgesamt homogenen Charakter des Gesteins jedoch nicht beeinflusst.

- Feldspat: 3-10 mm; hypidiom., xenom.; weiß, grau; in Lagen angeordnet
- Quarz: 1-3 mm; oft in Form isolierter und gestreckter Kristalle; teilweise mit hoher Konzentration in Nestern
- Biotit: 1-3 mm; hypidiom.; schwarz
- Granat: 1-3 mm; idiom.; rot, violett



Mikroskopische Merkmale:

- Korngefüge: seriat mit deutlicher Vorzugsorientierung der Minerale
- Deformationsstrukturen: Rekristallisierte Quarze; Schachbrettmuster in Quarz; Myrmekite; verschiedene Rissysteme



Richtungslose gesteintechnische Eigenschaften:

- Matrixdichte [g/cm³]: 2.64
- Rohdichte [g/cm³]: 2.62
- Porosität [Vol.-%]: 0.97 (Auftrieb) / 0.76 (Hg)
- Mittl. Porenradienklasse [µm]: 0.066
- Sättigungsbeiwert: 0.68

Mineralogische Zusammensetzung (Vol.-%) nach röntgenographischer Analyse (RDA):

- Quarz: 30.4
- K-Feldspat: 24.2 (Mikroclin, Orthoklas)
- Plagioklas: 39.9 (Albit)
- Biotit: 2.0
- Amphibol: -
- Serizit: 3.6

Durch Polarisationsmikroskopie nachgewiesen: Granat (ca. 1%), Muskovit, Pyrit

Richtungsabhängige gesteintechnische Eigenschaften:

	<i>X-Richtung</i>	<i>Y-Richtung</i>	<i>Z-Richtung</i>
Wasserdampfdiffusion (µ):	1209.88	1241.13	1318.01
Druckfestigkeit [MPa]:	231.1 +/- 24.4	224.9 +/- 29.1	230.1 +/- 27.0
Spaltzugfestigkeit [MPa]:	12.38 +/- 1.95	11.08 +/- 1.57	7.85 +/- 1.71
Biegezugfestigkeit [MPa]:	21.59 +/- 1.14	20.36 +/- 0.49	13.49 +/- 1.35
Abriebfestigkeit [cm³/50cm²]:	4.34	4.45	4.44
Ausdehnungskoeffizient [*10 ⁻⁶ K ⁻¹]:	6.61	7.26	6.82
Restdehnung [mm/m]:	0.00	0.00	0.00
Statischer E-Modul [GPa]:	28.09	20.71	24.91
Vp, trocken [km/s]:	4.980	4.796	4.701
Vp, nass [km/s]:	5.569	5.641	5.652

Petrographische Bezeichnung: **Granit**

Probenname: **NB-Orange**

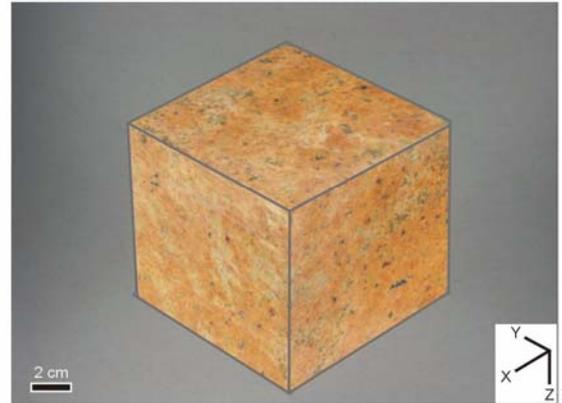
Handelsname: **Som Nong Bua**

Stratigraphisches Alter: **Trias**

Makroskopische Merkmale:

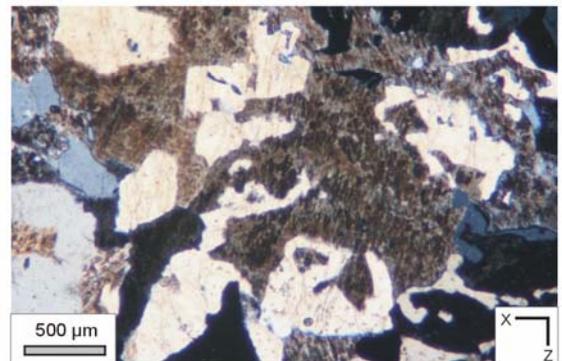
Fein- bis mittelkörniger Granit mit oranger Farbgebung der Feldspäte. Individuelle Kristalle sind aufgrund einer graphischen Verwachsung von Quarz und Feldspat nur schwer zu erkennen. Auffallend ist die Fleckigkeit von zentimeter- bis dezimetergroßen intensiv rötlichen Partien und netzartig angeordnete, helle Bereiche aus alteriertem Feldspat sowie Biotit und Chlorit. Biotit tritt optisch weniger deutlich hervor, so dass das Gestein recht hell erscheint. Quarz ist farblos ausgebildet und nimmt dadurch die orange Farbe der Feldspäte auf, was die Farbintensität des Gesteins noch verstärkt. Auffallend sind die millimetergroßen, offenen Stellen in der geschliffenen Oberfläche.

Feldspat: 1-2 mm; hypidiom.; xenom.; orange, rötlich, hellgrün; mit Quarz verwachsen
 Quarz: 1-2 mm, xenom.; farblos, klar



Mikroskopische Merkmale:

Korngefüge: equigranular mit granophyrischer Verwachsung der Minerale Quarz und Feldspat
 Deformationsstrukturen: ---



Richtungslose gesteintechnische Eigenschaften:

Matrixdichte [g/cm³]: 2.60
 Rohdichte [g/cm³]: 2.56
 Porosität [Vol.-%]: 1.72 (Auftrieb)/ 1.70 (Hg)
 Mittl. Porenradienklasse [µm]: 0.036
 Sättigungsbeiwert: 0.98

Mineralogische Zusammensetzung (Vol.-%) nach röntgenographischer Analyse (RDA):

Quarz: 35.4
 K-Feldspat: 31.1 (Mikroklin, Orthoklas)
 Plagioklas: 32.9 (Albit)

Durch Polarisationsmikroskopie und Mikrosonde nachgewiesen: Hämatit, Calcit

Richtungsabhängige gesteintechnische Eigenschaften:

	<i>X-Richtung</i>	<i>Y-Richtung</i>	<i>Z-Richtung</i>
Wasserdampfdiffusion (µ):	2745.92	2431.71	2408.20
Druckfestigkeit [MPa]:	186.5 +/- 32.6	146.0 +/- 22.8	187.5 +/- 10.2
Spaltzugfestigkeit [MPa]:	9.72 +/- 1.34	11.19 +/- 1.94	10.01 +/- 2.50
Biegezugfestigkeit [MPa]:	16.02 +/- 1.38	21.70 +/- 1.23	19.80 +/- 0.98
Abriebfestigkeit [cm³/50cm²]:			
Ausdehnungskoeffizient [$\cdot 10^{-6} K^{-1}$]:	8.60	8.55	8.59
Restdehnung [mm/m]:	0.00	0.00	0.00
Statischer E-Modul [GPa]:	25.55	24.87	23.35
Vp, trocken [km/s]:	4.876	5.091	4.952
Vp, nass [km/s]:	4.979	5.091	4.900

Petrographische Bezeichnung: **Gneisicher Granit**

Probenname: **PS-Grey**

Handelsname: **Phanom Sarakham**

Stratigraphisches Alter: **Trias**

Makroskopische Merkmale:

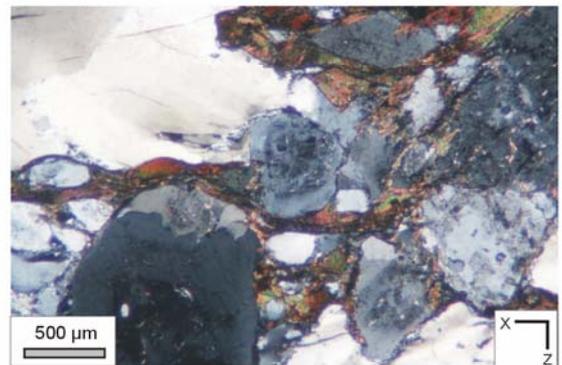
Mittelkörniger gneisicher Granit mit gräulicher Farbe und schwach ausgeprägter Textur. Das Gestein ist dabei durch zwei unterschiedliche Vorzugsorientierungen gekennzeichnet, die beide sowohl von Feldspat als auch von Glimmern nachgezeichnet werden und sich in einem Winkel von 120° schneiden. Auf einer polierten Oberfläche führt die Struktur bei entsprechender Schnittlage parallel zur xz-Ebene zu einem schachbrettartigem Muster.

- Feldspat: 5-10 mm; idiom., hypidiom.; grau, weiß; mit bevorzugter Orientierung der Längsachsen
- Quarz: 3-5 mm; hypidiom.; grau, farblos; in Aggregaten stark vernetzt; oftmals in Richtung der Foliation gestreckt
- Biotit: 1-8 mm; idiom., hypidiom.; schwarz; oft in direktem Kontakt parallel zu den Feldspat-001-Basisflächen; oft als Ummantelung einzelner Minerale



Mikroskopische Merkmale:

- Korngefüge: equigranular mit richtungslos-körniger Anordnung der Minerale
- Deformationsstrukturen: Rekristallisierte Quarze; Deformationslamellen in Quarz; Myrmekite



Richtungslose gesteintechnische Eigenschaften:

- Matrixdichte [g/cm³]: 2.67
- Rohdichte [g/cm³]: 2.65
- Porosität [Vol.-%]: 0.71 (Auftrieb)/ 0.50 (Hg)
- Mittl. Porenradienklasse [µm]: 0.036
- Sättigungsbeiwert: 0.81

Mineralogische Zusammensetzung (Vol.-%) nach röntgenographischer Analyse (RDA):

- Quarz: 32.3
- K-Feldspat: 22.1 (Mikroklin)
- Plagioklas: 33.7 (Oligoklas)
- Biotit: 6.5
- Amphibol: -
- Serizit: 6.5

Durch Polarisationsmikroskopie nachgewiesen: ---

Richtungsabhängige gesteintechnische Eigenschaften:

	<i>X-Richtung</i>	<i>Y-Richtung</i>	<i>Z-Richtung</i>
Wasserdampfdiffusion (µ):	3303.15	4091.79	2002.77
Druckfestigkeit [MPa]:	200.5 +/- 10.3	191.7 +/- 27.6	194.6 +/- 26.7
Spaltzugfestigkeit [MPa]:	12.08 +/- 1.65	10.71 +/- 1.66	9.80 +/- 1.73
Biegezugfestigkeit [MPa]:	20.89 +/- 1.17	19.75 +/- 1.22	16.60 +/- 2.10
Abriebfestigkeit [cm³/50cm²]:	4.3	3.8	4.0
Ausdehnungskoeffizient [*10 ⁻⁶ K ⁻¹]:	8.95	8.82	9.00
Restdehnung [mm/m]:	0.00	0.00	0.00
Statischer E-Modul [GPa]:	28.39	29.96	29.38
Vp, trocken [km/s]:	4.656	4.393	4.004
Vp, nass [km/s]:	5.399	5.245	5.297

Petrographische Bezeichnung: **Granit**

Probenname: **SP-Grey**

Handelsname: **Fahmuk**

Stratigraphisches Alter: **Jura-Kreide**

Makroskopische Merkmale:

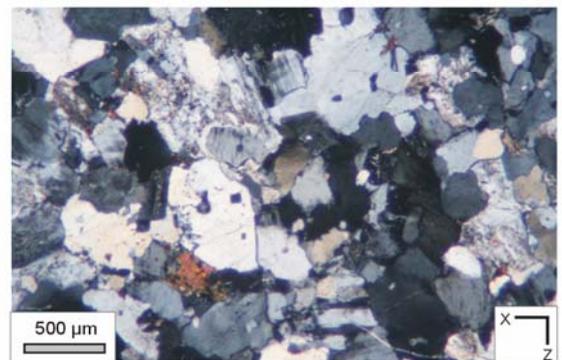
Mittelkörniges Gestein mit grauen, teilweise porphyrisch ausgebildeten Feldspäten, die in eine graue, leicht bläuliche Matrix aus Quarz und Feldspat eingebettet sind. Lokal zeigen sowohl Porphyroklasten als auch Biotite eine Einregelung nach der Kornform. Die bläulichen Anteile des Gesteins ergeben sich aus einem recht hohen Anteil einzelner Quarze, die als isolierte Kristalle im Gesteinsverband auftreten. Viele der bläulichen Quarze zeigen dabei eine Zonierung in Form blauer oder transparenter Kerne, die mit grauen Quarzanteilen umwachsen sind.

- Feldspat: 10-20 mm, als Porphyroklasten <120 mm; idiom.-hypidiom.; grau bis hellgrau
- Quarz: <10 mm; hypidiom.- xenom; als individuelle Kristalle, Einschlüsse oder Zwickelfüllungen
- Biotit: differenzierte Korngrößen bis 5 mm; hypidiom., teilweise idiom.; schuppig, plattig oder als Mineralcluster



Mikroskopische Merkmale:

- Korngefüge: inequigranular mit lokaler Auslenkung der Minerale
- Deformationsstrukturen: Rekristallisierte Quarze; Deformationslamellen in Quarz; Bulging



Richtungslose gesteintechnische Eigenschaften:

- Matrixdichte [g/cm³]: 2.65
- Rohdichte [g/cm³]: 2.64
- Porosität [Vol.-%]: 0.46 (Auftrieb)
- Mittl. Porenradienklasse: n/a
- Sättigungsbeiwert: 0.83

Mineralogische Zusammensetzung (Vol.-%) nach röntgenographischer Zusammensetzung (RDA):

- Quarz: 29.9
- K-Feldspat: 35.0 (Mikroklin)
- Plagioklas: 25.8 (Oligoklas)
- Biotit: 9.2
- Amphibol: -
- Serizit: 5.4
- Chlorit: 1.6

Richtungsabhängige gesteintechnische Eigenschaften:

	<i>X-Richtung</i>	<i>Y-Richtung</i>	<i>Z-Richtung</i>
Wasserdampfdiffusion (µ):	n/a	n/a	n/a
Druckfestigkeit [MPa]:	n/a	n/a	n/a
Spaltzugfestigkeit [MPa]:	9.95 +/- 0.91	13.80 +/- 3.34	10.54 +/- 2.29
Biegezugfestigkeit [MPa]:	26.50 +/- 1.99	25.40 +/- 1.60	23.24 +/- 2.38
Abriebfestigkeit [cm³/50cm²]:	4.30	3.80	3.98
Ausdehnungskoeffizient [*10⁶ K⁻¹]:	7.52	7.74	7.73
Restdehnung [mm/m]:	0.00	0.00	0.00
Statischer E-Modul [GPa]:	n/a	n/a	n/a
Vp, trocken [km/s]:	5.326	5.211	5.292
Vp, nass [km/s]:	5.456	5.417	5.439

Petrographische Bezeichnung: **Granit**

Probenname: **MC-Yellow**

Handelsname: **Lhuang Mae Chan**

Stratigraphisches Alter: **Trias**

Makroskopische Merkmale:

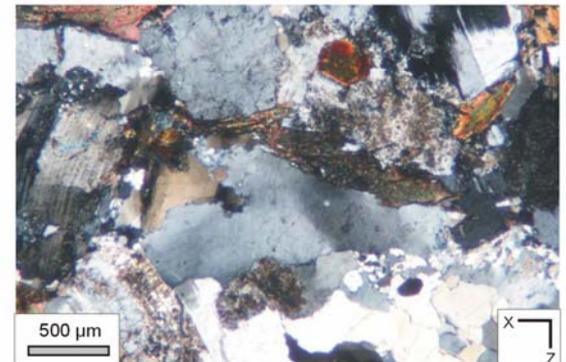
Fein- bis mittelkörniger Granit mit lokal auftretenden Feldspat-Porphyrklasten, die in eine Matrix bestehend aus hellem, alteriertem Feldspat sowie aus Quarz und Biotit eingebettet sind. Feldspäte zeigen aufgrund der Alteration eine gelbliche Verwitterungsfarbe, die den Grundton des Gesteins prägt. Alle Gemengteile sind der Kornform nach eingeregelt und definieren damit eine schwach bis relativ ausgeprägte Foliation.

K-Feldspat: 4 mm, als Porphyroklasten <120 mm; hypidiom.; weiß, gelblich; kurzprismatisch
 Plagioklas: 4 mm; idiom.; weiß, gelblich; kurzprismatisch bis oval
 Quarz: 2-3 mm; hypidiom. - xenom.; transparent, grau; teilweise ausgelängt, als Zwickelfüllung
 Biotit: <1 mm; häufig als Mineralcluster, dann <12 mm; idiom. - xenom.; schwarz, grünlich



Mikroskopische Merkmale:

Korngefüge: inequigranular mit lokal deutlicher Auslenkung der Minerale
 Deformationsstrukturen: Rekristallisierte Quarze; Bulging; Myrmekite



Richtungslose gesteintechnische Eigenschaften:

Matrixdichte [g/cm³]: 2.67
 Rohdichte [g/cm³]: 2.64
 Porosität [Vol.-%]: 0.83 (Auftrieb)
 Porenradienklasse [µm]:
 Sättigungsbeiwert: 0.82

Mineralogische Zusammensetzung (Vol.-%) nach röntgenographischer Analyse (RDA):

Quarz: 31.3
 K-Feldspat: 21.9
 Plagioklas: 28.4
 Biotit: 10.7
 Amphibol: -
 Serizit: 5.5
 Chlorit: 1.1
 Aktinolith: accessorisch

Richtungsabhängige gesteintechnische Eigenschaften:

	X-Richtung	Y-Richtung	Z-Richtung
Wasserdampfdiffusion (µ):	n/a	n/a	n/a
Druckfestigkeit [MPa]:	n/a	n/a	n/a
Spaltzugfestigkeit [MPa]:	7.98 +/- 0.71	6.83 +/- 0.59	7.16 +/- 0.88
Biegezugfestigkeit [MPa]:	n/a	n/a	n/a
Abriebfestigkeit [cm³/50cm²]:	n/a	n/a	n/a
Ausdehnungskoeffizient [*10 ⁻⁶ K ⁻¹]:	8.38	8.98	8.43
Restdehnung [mm/m]:	0.00	0.00	0.00
Statischer E-Modul [Gpa]:	n/a	n/a	n/a
Ultraschall, trocken [km/s]:	4.606	4.645	4.645
Ultraschall, nass [km/s]:	5.363	5.473	5.627

Petrographische Bezeichnung: **Marmorbreckzie**

Probenname: **PC-Red**

Handelsname: **Coco Dark**

Stratigraphisches Alter: **Perm**

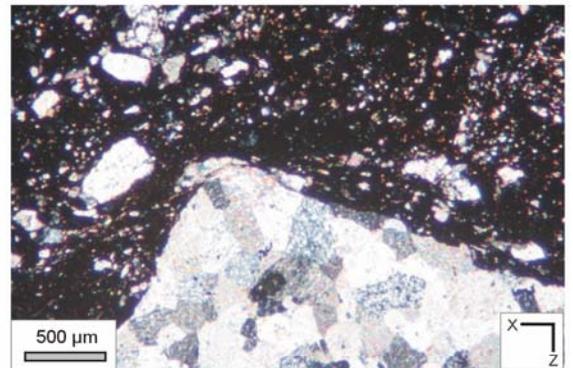
Makroskopische Merkmale:

Das Gestein zeichnet sich durch fein- bis mittelkörnige, weiße bis hellgraue Marmorlasten aus, die in einer Matrix aus feinstkörnigen, roten Tonmineralen schwimmen. Die Größe der Marmorlasten variiert erheblich in einem Bereich zwischen wenigen Millimetern und mehreren Zentimetern, teilweise auch Dezimetern. Marmorlasten können mineralisierte Adern aufweisen, die an dem Übergang zu den tonigen Anteilen enden oder sich im mikroskopischen Skalenbereich als Haarrisse fortsetzen.



Mikroskopische Merkmale:

Korngefüge: equigranular (400 µm)
 Korngrenzengeometrie: polygonal
 Deformationsstrukturen: intensive Breckziierung; calcitisch mineralisierte Risse in den Marmorpartien, die zu beiden Seiten mit Tonmineralen ausgekleidet sein können



Richtungslose gesteintechnische Eigenschaften:

Matrixdichte [g/cm³]: 2.71
 Rohdichte [g/cm³]: 2.69
 Porosität [Vol.-%]: 0.57 (Auftrieb)/ 0.62 (Hg)
 Mittl. Porenradienklasse [µm]: 0.165
 Sättigungsbeiwert: 0.56

**Mineralogische Zusammensetzung (Vol.-%)
 Nach röntgenographischer Analyse (RDA):**

Calcit: 86.5
 Dolomit: 0.4
 Quarz: 5.7
 Hämatit: 0.7
 Tonminerale: 6.1

Richtungsabhängige gesteintechnische Eigenschaften:

	<i>X-Richtung</i>	<i>Y-Richtung</i>	<i>Z-Richtung</i>
Wasserdampfdiffusion (µ):	1508.05	2109.11	1984.46
Druckfestigkeit [MPa]:	78.3 +/- 22.7	87.1 +/- 7.1	96.8 +/- 15.5
Spaltzugfestigkeit [MPa]:	6.01 +/- 1.46	6.38 +/- 0.81	6.30 +/- 1.58
Biegezugfestigkeit [MPa]:	11.58 +/- 3.14	6.70 +/- 5.61	12.38 +/- 2.30
Abriebfestigkeit [cm³/50cm²]:	17.09	16.32	14.42
Ausdehnungskoeffizient [*10 ⁻⁶ K ⁻¹]:	16.20	6.55	10.20
Restdehnung [mm/m]:	0.21	0.03	-0.03
Statischer E-Modul [GPa]:	19.50	19.66	28.36
Vp, trocken [km/s]:	5.767	5.640	5.917
Vp, nass [km/s]:	6.042	5.976	6.213

Petrographische Bezeichnung: **Marmor**

Probenname: **PC-White**

Handelsname: **Coco Light**

Stratigraphisches Alter: **Perm**

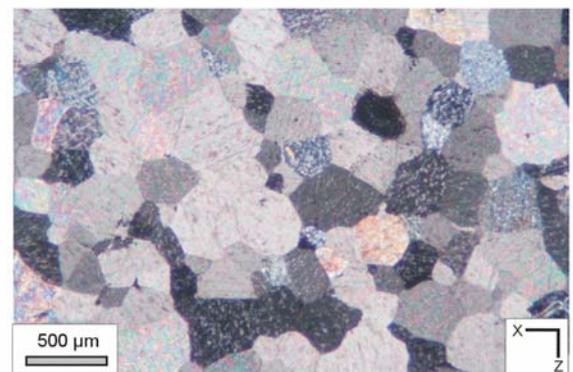
Mikroskopische Merkmale:

Fein- bis mittelkörniger, weißer Marmor mit dichtem Netz hell- bis dunkelroter Adern. Bei dem Gestein handelt es sich um ein Äquivalent der Varietät PC-Red, das im Gegensatz zu der stark breckzierten Ausbildung jedoch weniger Deformationsmuster erkennen lässt.



Mikroskopische Merkmale:

Korngefüge: equigranular (400 µm)
 Korngrenzengeometrie: polygonal
 Deformationsstrukturen: intensives Rissssystem ohne Vorzugsorientierung



Richtungslose gesteintechnische Eigenschaften:

Matrixdichte [g/cm³]: 2.70
 Rohdichte [g/cm³]: 2.69
 Porosität [Vol.-%]: 0.46 (Auftrieb)/ 0.30 (Hg)
 Mittl. Porenradienklasse [µm]: 0.149
 Sättigungsbeiwert: 0.52

Mineralogische Zusammensetzung (Vol.-%) nach röntgenographischer Analyse (RDA):

Calcit: 99.8
 Dolomit: -
 Quarz: 0.2
 Hämatit: -
 Tonminerale: -

Richtungsabhängige gesteintechnische Eigenschaften:

	<i>X-Richtung</i>	<i>Y-Richtung</i>	<i>Z-Richtung</i>
Wasserdampfdiffusion (µ):	2503.49	2583.57	2922.09
Druckfestigkeit [MPa]:	83.2 +/- 5.2	72.6 +/- 10.2	82.4 +/- 12.3
Spaltzugfestigkeit [MPa]:	4.90 +/- 0.79	5.25 +/- 0.81	4.26 +/- 0.47
Biegezugfestigkeit [MPa]:	8.13 +/- 0.71	7.88 +/- 1.21	9.20 +/- 0.92
Abriebfestigkeit [cm³/50cm²]:	27.34	23.68	24.01
Ausdehnungskoeffizient [*10 ⁻⁶ K ⁻¹]:	10.90	12.30	13.90
Restdehnung [mm/m]:	0.25	0.29	0.31
Statischer E-Modul [GPa]:	21.30	21.16	19.52
Vp, trocken [km/s]:	5.284	5.168	5.082
Vp, nass [km/s]:	6.198	6.377	6.086

Petrographische Bezeichnung: **Marmor**

Probenname: **PC-Grey**

Handelsname: **Tao-Ley Reaw**

Stratigraphisches Alter: **Perm**

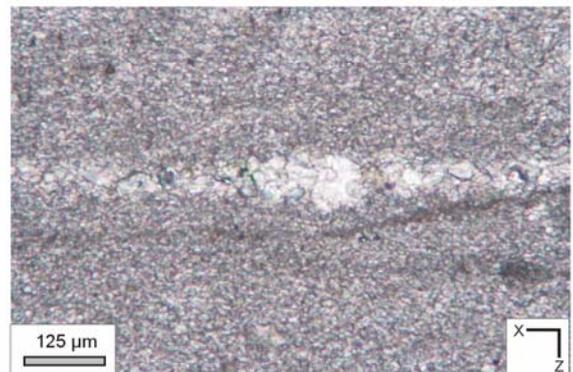
Makroskopische Merkmale:

Feinkörniges Gestein mit verschiedenen Schattierungen von hell- bis dunkelgrau. Die Farbanteile sind sehr regelmäßig in Form alternierender Lagen arrangiert. Diese Lagen erstrecken sich gewöhnlich über eine Distanz von einigen Zenitmetern bis Dezimetern und können zudem mit variabler Mächtigkeit ausgebildet sein. Lokal ist das Gestein durch Syolithen gekennzeichnet, die sich mit gelben bzw. roten Farbtönen deutlich von den Grauschattierungen abheben.



Mikroskopische Merkmale:

Korngefüge: mikritische Grundmasse mit teilweise rekristallisierten Lagen
 Kongrenzengeometrie: ---
 Deformationsstrukturen: duktil



Richtungslose gesteintechnische Eigenschaften:

Matrixdichte [g/cm³]: 2.72
 Rohdichte [g/cm³]: 2.69
 Porosität [Vol.-%]: 0.15 (Auftrieb)/ n/a (Hg)
 Mittl. Porenradienklasse [µm]: n/a
 Sättigungsbeiwert: 0.61

Mineralogische Zusammensetzung (Vol.-%) nach röntgenographischer Analyse (RDA):

Calcit: 97.9
 Dolomit: 2.0
 Quarz: 0.2
 Hämatit: -
 Tonminerale: -

Richtungsabhängige gesteintechnische Eigenschaften:

	<i>X-Richtung</i>	<i>Y-Richtung</i>	<i>Z-Richtung</i>
Wasserdampfdiffusion (µ):	n/a	n/a	n/a
Druckfestigkeit [MPa]:	n/a	n/a	n/a
Spaltzugfestigkeit [MPa]:	6.20 +/- 1.52	5.93 +/- 1.41	5.39 +/- 1.12
Biegezugfestigkeit [MPa]:	n/a	n/a	n/a
Abriebfestigkeit [cm³/50cm²]:	n/a	n/a	n/a
Ausdehnungskoeffizient [*10 ⁻⁶ K ⁻¹]:	n/a	n/a	n/a
Restdehnung [mm/m]:	n/a	n/a	n/a
Statischer E-Modul [GPa]:	n/a	n/a	n/a
Vp, trocken [km/s]:	n/a	n/a	n/a
Vp, nass [km/s]:	n/a	n/a	n/a

Petrographische Bezeichnung: **Marmor**

Probenname: **TS-Grey**

Handelsname: **Grey Princess**

Stratigraphisches Alter: **Karbon**

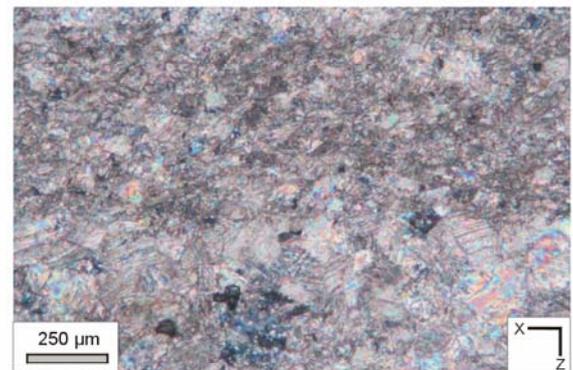
Makroskopische Merkmale:

Feinkörniger, grauer Marmor mit wechselnden Anteilen von Hell- und Dunkelpartien, die an einem intensiv ausgebildeten Netz von Haarrissen gegeneinander versetzt sein können. Die Risse sind gegenüber dem übrigen Gestein im Allgemeinen etwas aufgeheilt. Die Bleichung entlang dieser Frakturen zählt zum festen Bestandteil des Dekors.



Mikroskopische Merkmale:

Korngefüge: inequigranular (80-100 µm)
 Korngrenzengeometrie: polygonal
 Deformationsstrukturen: intensives Rissssystem mit etwas größerem Calcit im Vergleich zur umgebenden Matrix



Richtungslose gesteintechnische Eigenschaften:

Matrixdichte [g/cm³]: 2.71
 Rohdichte [g/cm³]: 2.69
 Porosität [Vol.-%]: 0.88 (Auftrieb)/ 1.20 (Hg)
 Mittl. Porenradienklasse [µm]: 0.030
 Sättigungsbeiwert: 0.85

Mineralogische Zusammensetzung (Vol.-%) nach röntgenographischer Analyse (RDA):

Calcit: 96.1
 Dolomit: 3.7
 Quarz: -
 Hämatit: -
 Tonminerale: -

Richtungsabhängige gesteintechnische Eigenschaften:

	<i>X-Richtung</i>	<i>Y-Richtung</i>	<i>Z-Richtung</i>
Wasserdampfdiffusion (µ):	3043.93	4557.08	2831.49
Druckfestigkeit [MPa]:	113.6 +/- 26.3	143.2 +/- 19.7	111.4 +/- 32.3
Spaltzugfestigkeit [MPa]:	6.91 +/- 2.66	6.04 +/- 1.49	7.70 +/- 1.84
Biegezugfestigkeit [MPa]:	14.66 +/- 3.98	7.79 +/- 7.64	15.45 +/- 2.06
Abriebfestigkeit [cm³/50cm²]:	10.75	12.17	11.00
Ausdehnungskoeffizient [*10 ⁻⁶ K ⁻¹):	1.91	7.89	4.55
Restdehnung [mm/m]:	0.00	0.00	0.00
Statischer E-Modul [GPa]:	30.64	26.91	25.16
Vp, trocken [km/s]:	6.224	6.049	6.114
Vp, nass [km/s]:	6.224	6.125	6.222

Petrographische Bezeichnung: **Marmor**

Probenname: **TS-Pink**

Handelsname: **Chompu Kame Mam**

Stratigraphisches Alter: **Karbon**

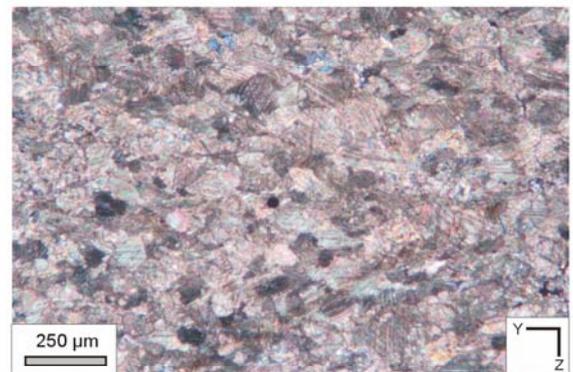
Makroskopische Merkmale:

Feinkörniger Marmor mit rosa und weißen Farbanteilen, die mit dünnen Rissen und Styolithen durchzogen sind. Durch Alteration entlang der teilweise offenen Styolithen ergeben sich relativ dunkle Farben, die sich deutlich von der umgebenden Matrix abheben.



Mikroskopische Merkmale:

Korngefüge: inequigranular (80-100 µm)
 Korngrenzengeometrie: polygonal
 Deformationsstrukturen: intensives Rissssystem mit etwas größerem Calcit im Vergleich zur umgebenden Matrix



Richtungslose gesteintechnische Eigenschaften:

Matrixdichte [g/cm³]: 2.69
 Rohdichte [g/cm³]: 2.66
 Porosität [Vol.-%]: 1.21 (Auftrieb)/ 2.52 (Hg)
 Mittl. Porenradienklasse [µm]: 0.059
 Sättigungsbeiwert: 0.87

Mineralogische Zusammensetzung (Vol.-%) nach röntgenographischer Analyse (RDA):

Calcit: 96.3
 Dolomit: 2.4
 Quarz: -
 Hämatit: -
 Tonminerale: -

Richtungsabhängige gesteintechnische Eigenschaften:

	<i>X-Richtung</i>	<i>Y-Richtung</i>	<i>Z-Richtung</i>
Wasserdampfdiffusion (µ):	2251.30	1663.86	2326.08
Druckfestigkeit [MPa]:	114.7 +/- 24.5	104.6 +/- 33.8	127.8 +/- 29.9
Spaltzugfestigkeit [MPa]:	10.18 +/- 1.33	8.54 +/- 2.21	7.76 +/- 1.41
Biegezugfestigkeit [MPa]:	9.35 +/- 3.24	14.03 +/- 1.69	8.77 +/- 2.40
Abriebfestigkeit [cm³/50cm²]:	10.3	10.0	12.2
Ausdehnungskoeffizient [*10 ⁻⁶ K ⁻¹):	2.31	n/a	7.81
Restdehnung [mm/m]:	0.00	n/a	0.00
Statischer E-Modul [GPa]:	28.35	20.25	28.65
Vp, trocken [km/s]:	5.582	5.522	5.417
Vp, nass [km/s]:	5.773	5.715	5.532

Petrographische Bezeichnung: **Marmor**

Probenname: **PK-Grey**

Handelsname: **Tao Phran Kratai**

Stratigraphisches Alter: **Silur-Devon**

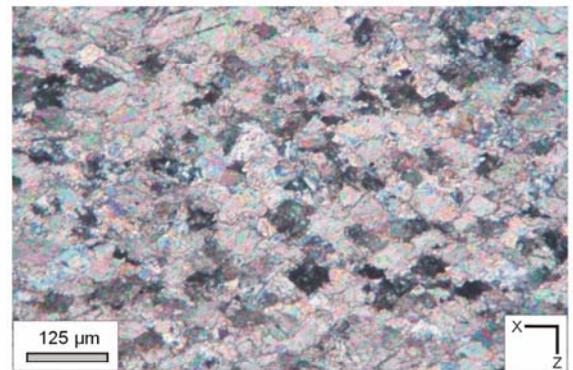
Makroskopische Merkmale:

Feinkörniger Marmor mit massivem Gesamtbild und alternierenden Anteilen hell- und dunkelgrauer Lagen. Das graue Farbspektrum wechselt über kurze Distanzen, so dass einzelne Lagen nur wenige Millimeter mächtig ausgebildet sind. Farbübergänge sind im Allgemeinen undeutlich und können lokal zu großflächigeren, wolkigen Strukturen führen.



Mikroskopische Merkmale:

Korngefüge: equigranular (80 -100µm)
 Korngrenzengeometrie: interlobat
 Deformationsstrukturen: duktil



Richtungslose gesteintechnische Eigenschaften:

Matrixdichte [g/cm³]: 2.69
 Rohdichte [g/cm³]: 2.68
 Porosität [Vol.-%]: 0.60 (Auftrieb)/ 0.37 (Hg)
 Mittl. Porenradienklasse [µm]: 0.013
 Sättigungsbeiwert: 0.92

Mineralogische Zusammensetzung (Vol.-%) nach röntgenographischer Analyse (RDA):

Calcit: 100
 Dolomit: -
 Quarz: -
 Hämatit: -
 Tonminerale: -

Durch Polarisationsmikroskopie nachgewiesen: Pyrit

Richtungsabhängige gesteintechnische Eigenschaften:

	<i>X-Richtung</i>	<i>Y-Richtung</i>	<i>Z-Richtung</i>
Wasserdampfdiffusion (µ):	3294.57	4013.57	5250.58
Druckfestigkeit [MPa]:	89.9 +/- 24.6	107.7 +/- 22.7	168.9 +/- 37.7
Spaltzugfestigkeit [MPa]:	10.69 +/- 1.49	10.14 +/- 2.47	5.94 +/- 1.80
Biegezugfestigkeit [MPa]:	34.76 +/- 6.32	27.24 +/- 6.36	13.95 +/- 3.66
Abriebfestigkeit [cm³/50cm²]:	10.68	11.93	11.04
Ausdehnungskoeffizient [*10 ⁻⁶ K ⁻¹]:	-0.60	2.20	11.70
Restdehnung [mm/m]:	0.00	0.00	0.00
Statischer E-Modul [GPa]:	29.58	32.29	29.35
Vp, trocken [km/s]:	6.297	6.247	5.708
Vp, nass [km/s]:	6.378	6.325	5.773

Petrographische Bezeichnung: **Marmor**

Probenname: **PK-Pink**

Handelsname: **Chompu Phran Kratai**

Stratigraphisches Alter: **Silur-Devon**

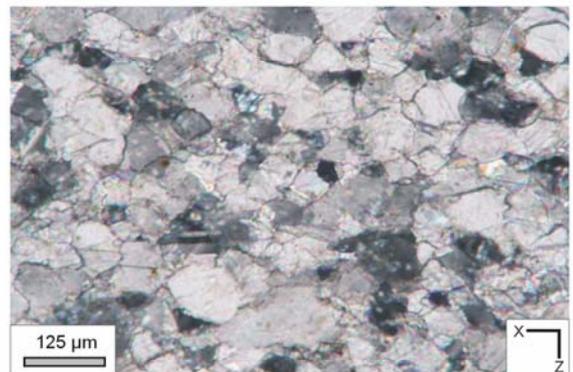
Makroskopische Merkmale:

Feinkörniger Marmor mit zart pinker Farbe. Das Gestein zeigt verschiedene Farbschattierungen, die mit diffusen Kontakten gegeneinander abgegrenzt sind. Die Ausbildung von Rissen wie rechts abgebildet ist relativ begrenzt, so dass das Gestein insgesamt einen sehr massiven Charakter aufweist. Wie die graue Varietät PK-Grey kann der pinke Marmor einen Lagenbau mit teilweise wolkigen Strukturen aufweisen.



Mikroskopische Merkmale:

Korngefüge: equigranular (80 - 100 µm)
 Korngrenzengeometrie: polygonal bis interlobat
 Deformationsstrukturen: duktil



Richtungslose gesteintechnische Eigenschaften:

Matrixdichte [g/cm³]: 2.70
 Rohdichte [g/cm³]: 2.68
 Porosität [Vol.-%]: 0.63 (Auftrieb)/ 1.08 (Hg)
 Mittl. Porenradienklasse [µm]: 0.024
 Sättigungsbeiwert: n/a

Mineralogische Zusammensetzung (Vol.-%) nach röntgenographischer Analyse (RDA):

Calcit: 100.0
 Dolomit: -
 Quarz: -
 Hämatit: -
 Tonminerale: -

Richtungsabhängige gesteintechnische Eigenschaften:

	<i>X-Richtung</i>	<i>Y-Richtung</i>	<i>Z-Richtung</i>
Wasserdampfdiffusion (µ):	7601.08	5508.15	7541.99
Druckfestigkeit [MPa]:	110.7 +/- 35.5	89.5 +/- 32.9	144.0 +/- 66.8
Spaltzugfestigkeit [MPa]:	6.92 +/- 1.51	9.17 +/- 1.30	6.01 +/- 1.64
Biegezugfestigkeit [MPa]:	n/a	n/a	n/a
Abriebfestigkeit [cm³/50cm²]:	n/a	n/a	n/a
Ausdehnungskoeffizient [$\cdot 10^{-6} K^{-1}$]:	3.45	-0.04	12.70
Restdehnung [mm/m]:	0.00	0.00	0.00
Statischer E-Modul [GPa]:	23.26	13.04	23.35
Vp, trocken [km/s]:	5.990	6.290	5.870
Vp, nass [km/s]:			

Petrographische Bezeichnung: **Marmor**

Probenname: **BTD-White**

Handelsname: **Khaw Uttaradit**

Stratigraphisches Alter: **Perm**

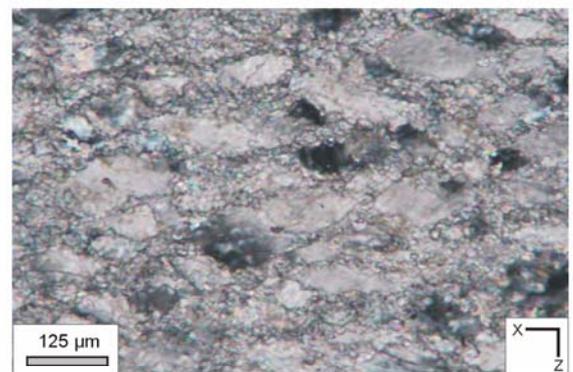
Makroskopische Merkmale:

Feinkörniger, weißer Marmor mit lokal auftretenden grauen Schleiern. Die grauen Anteile sind in der Regel diffus gegenüber den rein weißen Partien abgegrenzt und zeigen in vielen Fällen eine orientierte Anordnung parallel zur makroskopisch schwach erkennbaren Foliation des Gesteins. Teilweise können wie in der vorliegenden Abbildung rechts die grauen Schattierungen als fleckige Spots arrangiert sein.



Mikroskopische Merkmale:

Korngefüge: seriat (<125 µm)
 Korngrenzengeometrie: interlobat
 Deformationsstrukturen: Korngrenzenmigration



Richtungslose gesteintechnische Eigenschaften:

Matrixdichte [g/cm³]: 2.71
 Rohdichte [g/cm³]: 2.70
 Porosität [Vol.-%]: 0.39 (Auftrieb)/ 0.16 (Hg)
 Mittl. Porenradienklasse [µm]: 0.183
 Sättigungsbeiwert: 0.60

Mineralogische Zusammensetzung (Vol.-%) nach röntgenographischer Analyse (RDA):

Calcit: 100
 Dolomit: -
 Quarz: -
 Hämatit: -
 Tonminerale: -

Richtungsabhängige gesteintechnische Eigenschaften:

	<i>X-Richtung</i>	<i>Y-Richtung</i>	<i>Z-Richtung</i>
Wasserdampfdiffusion (µ):	3980.74	22008.17	8307.48
Druckfestigkeit [MPa]:	106.2 +/- 27.8	87.7 +/- 10.2	141.2 +/- 21.9
Spaltzugfestigkeit [MPa]:	8.78 +/- 1.92	6.22 +/- 2.04	6.15 +/- 1.66
Biegezugfestigkeit [MPa]:	27.16 +/- 3.08	11.29 +/- 1.00	15.29 +/- 0.87
Abriebfestigkeit [cm³/50cm²]:	15.59	17.27	16.89
Ausdehnungskoeffizient [*10 ⁻⁶ K ⁻¹]:	-0.05	2.60	8.34
Restdehnung [mm/m]:	0.00	0.00	0.00
Statischer E-Modul [GPa]:	28.12	24.31	30.27
Vp, trocken [km/s]:	6.038	6.369	5.696
Vp, nass [km/s] :	6.533	7.194	6.019

Petrographische Bezeichnung: **Kalkstein**

Handelsname: **n/a**

Probenname: **MP-Yellow**

Stratigraphisches Alter: **n/a**

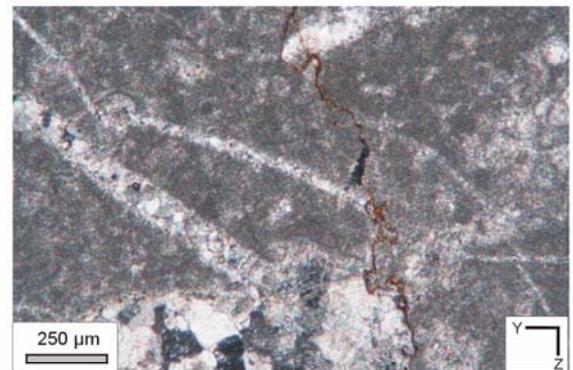
Makroskopische Merkmale:

Gelblich-grauer Kalkstein mit teilweise fleckiger Farbausbildung. Neben einer intensiven, richtungslosen Rissbildung wird das Dekor des Gesteins durch zahlreiche Styolithen definiert, die rötlich gefärbt und an vielen Stellen nur unzureichend mineralisiert sind.



Mikroskopische Merkmale:

Korngefüge: mikritische Matrix mit sparitischen Rissfüllungen
 Korngränzengeometrie: ---
 Deformationsstrukturen: spröde



Richtungslose gesteintechnische Eigenschaften:

Matrixdichte [g/cm³]: 2.71
 Rohdichte [g/cm³]: 2.70
 Porosität [Vol.-%]: 0.52 (Auftrieb)/ 0.44 (Hg)
 Mittl. Porenradienklasse [µm]: 0.070
 Sättigungsbeiwert: 0.74

Mineralogische Zusammensetzung (Vol.-%) nach röntgenographischer Analyse (RDA) :

Calcit: 100
 Dolomit: -
 Quarz: -
 Hämatit: -
 Tonminerale: -

Richtungsabhängige gesteintechnische Eigenschaften:

	<i>X-Richtung</i>	<i>Y-Richtung</i>	<i>Z-Richtung</i>
Wasserdampfdiffusion (µ):	1140.00	1458.58	1168.66
Druckfestigkeit [MPa]:	126.7 +/- 20.5	119.6 +/- 23.0	122.8 +/- 7.2
Spaltzugfestigkeit [MPa]:	5.93 +/- 1.48	5.28 +/- 1.24	6.15 +/- 1.07
Biegezugfestigkeit [MPa]:	n/a	n/a	n/a
Abriebfestigkeit [cm ³ /50cm ²]:	n/a	n/a	n/a
Ausdehnungskoeffizient [*10 ⁻⁶ K ⁻¹]:	4.36	4.69	4.18
Restdehnung [mm/m]:	0.00	0.00	0.00
Statischer E-Modul [GPa]:	29.16	25.46	33.21
Vp, trocken [km/s]:	5.440	5.355	5.500
Vp, nass [km/s]:	5.941	6.007	5.857

Petrographische Bezeichnung: **Kalkstein**

Probenname: **KH-Red**

Handelsname: **Daeng Prachin**

Stratigraphisches Alter: **Perm**

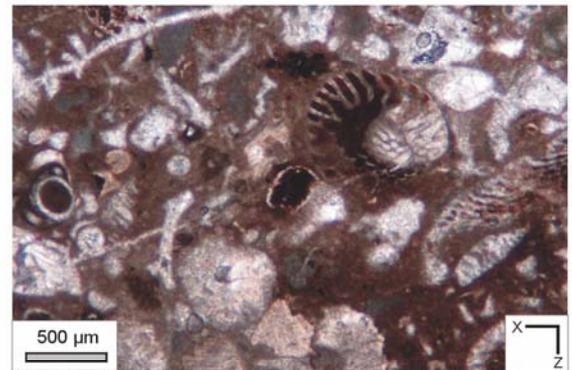
Makroskopische Merkmale:

Roter Kalkstein mit zahlreichen Fossilien, die das Gesamtbild des Gesteins dominieren. Die rote Farbgebung des Kalksteins kann lokal variieren und verschiedene Nuancen zu rötlich-braunen Tönen aufweisen. Durch die oftmals rein weißen Hohlraumfüllungen der Fossilien sowie die rein weiße Mineralisierung größerer Risse erlangt der Kalkstein ein optisch sehr dekoratives Erscheinungsbild.



Mikroskopische Merkmale:

Korngefüge: Mikritische Grundmasse mit hohem Anteil mineralisierter Fossilien
 Kongrenzengeometrie: ---
 Deformationsstrukturen: Staffelbrüche, Risse



Richtungslose gesteintechnische Eigenschaften:

Matrixdichte [g/cm³]: 2.72
 Rohdichte [g/cm³]: 2.71
 Porosität [Vol.-%]: 0.33 (Auftrieb)/ 0.19 (Hg)
 Mittl. Porenradienklasse [µm]: 0.193
 Sättigungsbeiwert: 0.65

Mineralogische Zusammensetzung (Vol.-%) nach röntgenographischer Analyse (RDA):

Calcit: 96.7
 Dolomit: 0.5
 Quarz: 2.5
 Hämatit: 0.4
 Tonminerale: -

Richtungsabhängige gesteintechnische Eigenschaften:

	<i>X-Richtung</i>	<i>Y-Richtung</i>	<i>Z-Richtung</i>
Wasserdampfdiffusion (µ):	6952.01	12442.54	29172.06
Druckfestigkeit [MPa]:	125.6 +/- 30.52	129.4 +/- 36.9	121.1 +/- 31.3
Spaltzugfestigkeit [MPa]:	7.53 +/- 2.15	8.59 +/- 1.82	9.29 +/- 2.53
Biegezugfestigkeit [MPa]:	14.65 +/- 1.21	15.60 +/- 2.11	13.88 +/- 1.77
Abriebfestigkeit [cm³/50cm²]:	10.38	9.44	10.01
Ausdehnungskoeffizient [$\cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$]:	4.21	4.18	4.11
Restdehnung [mm/m]:	0.00	0.00	0.00
Statischer E-Modul [GPa]:	36.04	19.54	24.14
Vp, trocken [km/s]:	5.935	5.788	5.841
Vp, nass [km/s]:	6.006	5.970	5.952

Petrographische Bezeichnung: **Subarkose**

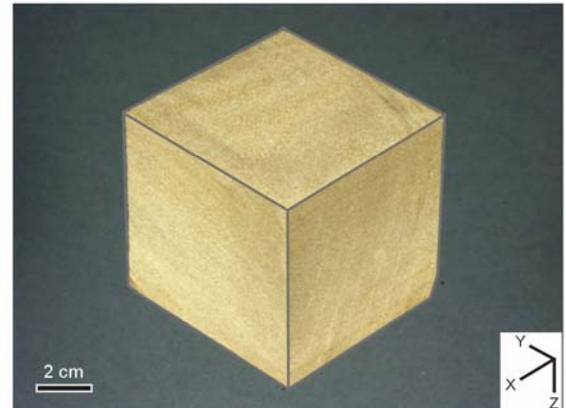
Handelsname: **n/a**

Probenname: **S-Brown**

Stratigraphisches Alter: **Mittl.-Oberer Jura**

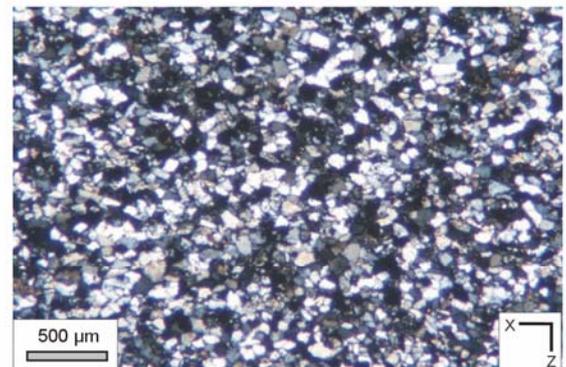
Makroskopische Merkmale:

Kennzeichnend für den Sandstein ist ein hellbrauner Farbton und eine sehr feinkörnige Ausbildung der beteiligten Mineralkomponenten. Das Gestein zeigt sowohl horizontale Schichtung als auch Kreuzschichtung. In Bereichen horizontaler Schichtung ist eine schwach ausgebildete Laminarstruktur erkennbar, die sich aus alternierenden hellen und dunklen Lagen zusammensetzt. Die Lamination zeigt dabei nur relativ geringe Unterschiede in der Farbgebung, was dem Sandstein zusammen mit der geringen Korngröße einen sehr massiven Charakter zuschreibt. Sowohl in Bereichen mit Horizontalschichtung als auch in Bereichen mit Kreuzschichtungselementen können darüber hinaus millimeterdicke Lagen auftreten, die sich aus dunklen Tonmineralen zusammensetzen.



Mikroskopische Merkmale:

Korngröße: 60-100 µm
 Kornbindung: silikatisch
 Sortierung: gut
 Abrundung: kanten-gerundet
 Zurundung: gering-mittel
 Kontakte: planar->konvex-konkav



Richtungslose gesteintechnische Eigenschaften:

Matrixdichte [g/cm³]: 2.66
 Rohdichte [g/cm³]: 2.38
 Porosität [Vol.-%]: 10.12 (Auftrieb) / 9.25 (Hg)
 Mittl. Porenradienklasse [µm]: 0.144
 Sättigungsbeiwert: 0.57

Mineralogische Zusammensetzung (Vol.-%) nach röntgenographischer Analyse (RDA):

Quarz: 93.6
 K-Feldspat: -
 Plagioklas: -
 Kaolinit: 3.9
 Illit: 2.6
 Calcit: -

Richtungsabhängige gesteintechnische Eigenschaften:

	<i>X-Richtung</i>	<i>Y-Richtung</i>	<i>Z-Richtung</i>
Wasseraufnahmekoeffizient [kg/m² h]:	13.29	3.06	5.11
Druckfestigkeit [MPa]:	132.6 +/- 23.5	166.8 +/- 1.25	143.1 +/- 39.3
Spaltzugfestigkeit [MPa]:	8.42 +/- 0.95	8.54 +/- 1.64	9.12 +/- 0.97
Biegezugfestigkeit [MPa]:	20.33 +/- 0.87	16.50 +/- 1.61	13.11 +/- 0.10
Abriebfestigkeit [cm³/50cm²]:	10.19	9.31	10.30
Ausdehnungskoeffizient [$\cdot 10^{-6} K^{-1}$]:	11.93	12.66	12.50
Restdehnung [mm/m]:	0.00	0.00	0.00
Hygrische Dehnung [mm/m]:	0.07	0.05	0.00
Statischer E-Modul [GPa]:	19.97	18.95	16.33
Vp, trocken [km/s]:	4.364	4.305	4.238
Vp, nass [km/s]:	4.546	4.536	4.461

Petrographische Bezeichnung: **Subarkose**

Probenname: **S-Yellow**

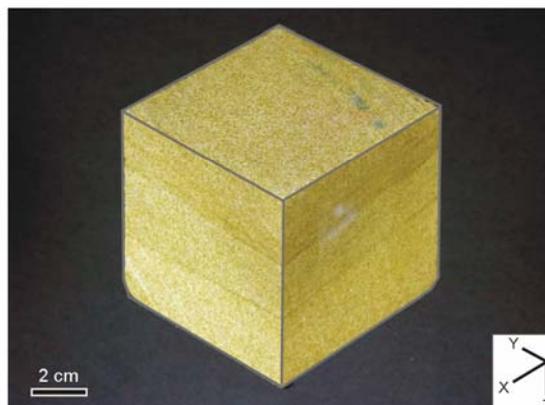
Handelsname: **Hin Trai Lhuang**

Stratigraphisches Alter: **Mittl.-Oberer Jura**

Makroskopische Merkmale:

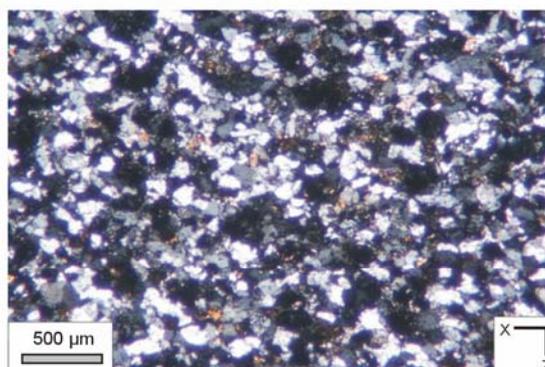
Das Gestein zeichnet sich durch sehr feinkörnige Minerale und durch einen gelblichen Grundton aus. Charakteristisch ist weiterhin eine feine Lamellierung, die sich aus einzelnen Schichten im Millimeterbereich zusammensetzt. Die Lamellierung ist makroskopisch anhand der Farbe und Korngröße zu erkennen, da hierbei gelbliche, sandige Lagen mit bräunlichen, tonigen Lagen im Wechsel stehen. Das Gestein kann sowohl horizontal- als auch kreuzgeschichtet auftreten. Lokal erscheinen auf den Schichtflächen Fe-Mn-Ausfällungen.

Die gelben Sandsteine zeigen einen makroskopisch sichtbaren Porenraum, der teilweise in offene Kavernen mit mehreren Zentimetern Größe übergeht. Diese makroskopisch zu erkennenden Poren sind durch eine ovale Form charakterisiert, die parallel zur sedimentären Schichtung orientiert und teilweise mit einer Akkumulation von Tonmineralen verfüllt ist.



Mikroskopische Merkmale:

Korngröße: 80-110 µm
 Kornbindung: silikatisch
 Sortierung: gut
 Abrundung: gerundet
 Zurundung: gering-mittel
 Kontakte: planar > konvex-konkav



Richtungslose gesteintechnische Eigenschaften:

Matrixdichte [g/cm³]: 2.66
 Rohdichte [g/cm³]: 2.30
 Porosität [Vol.-%]: 14.10 (Auftrieb) / 11.79 (Hg)
 Mittl. Porenradienklasse [µm]: 0.135
 Sättigungsbeiwert: 0.49

Mineralogische Zusammensetzung (Vol.-%) nach röntgenographischer Analyse (RDA):

Quarz: 91.4
 K-Feldspat: -
 Plagioklas: -
 Kaolinit: 5.0
 Illit: 3.6
 Calcit: -

Richtungsabhängige gesteintechnische Eigenschaften:

	X-Richtung	Y-Richtung	Z-Richtung
Wasseraufnahmekoeffizient [kg/m² h]:	6.17	4.31	7.48
Druckfestigkeit [MPa]:	101.0 +/- 15.4	92.3 +/- 12.2	105.5 +/- 7.2
Spaltzugfestigkeit [MPa]:	7.93 +/- 0.98	6.95 +/- 1.18	5.88 +/- 0.67
Biegezugfestigkeit [MPa]:	15.63 +/- 3.24	16.16 +/- 0.40	9.84 +/- 1.35
Abriebfestigkeit [cm³/50cm²]:	n/a	n/a	n/a
Ausdehnungskoeffizient [*10⁻⁶ K⁻¹]:	11.51	11.37	12.10
Restdehnung [mm/m]:	0.00	0.00	0.00
Hygrische Dehnung [mm/m]:	0.04	0.05	0.11
Statischer E-Modul [GPa]:	14.03	15.87	16.82
Vp, trocken [km/s]:	3.947	4.067	3.756
Vp, nass [km/s]:	4.128	4.313	4.017

Petrographische Bezeichnung: **Subarkose**

Handelsname: **n/a**

Probenname: **S-White**

Stratigraphisches Alter: **Mittl.-Oberer Jura**

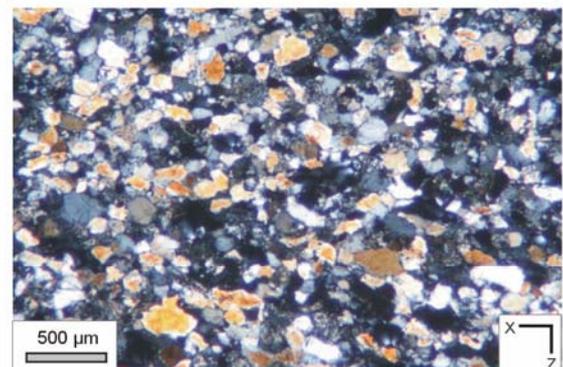
Makroskopische Merkmale:

Das Gestein ist feinkörnig und zeigt einen hellgrauen bis weißen Grundton. Aufgrund der relativ einheitlichen Farbgebung kommt das strukturelle Inventar des Materials, das sich aus Horizontalschichtung und Kreuzschichtungselementen zusammensetzt, optisch nur wenig zur Geltung. Das Gestein wirkt dadurch trotz seiner makroskopisch erkennbaren Porosität relativ massig.



Mikroskopische Merkmale:

Korngröße: 130-200 µm (vereinzelt <500 µm)
 Kornbindung: silikatisch
 Sortierung: mäßig
 Abrundung: kanten-gerundet
 Zurundung: gering-mittel
 Kontakte: planar>konvex-konkav



Richtungslose gesteintechnische Eigenschaften:

Matrixdichte [g/cm³]: 2.65
 Rohdichte [g/cm³]: 2.10
 Porosität [Vol.-%]: 20.93 (Auftrieb)/ 9.39 (Hg)
 Mittl. Porenradienklasse [µm]: 0.131
 Sättigungsbeiwert: 0.26

Mineralogische Zusammensetzung (Vol.-%) nach röntgenographischer Analyse (RDA):

Quarz: 87.9
 K-Feldspat: -
 Plagioklas: -
 Kaolinit: 5.9
 Illit: 6.2
 Calcit: -

Richtungsabhängige gesteintechnische Eigenschaften:

	<i>X-Richtung</i>	<i>Y-Richtung</i>	<i>Z-Richtung</i>
Wasseraufnahmekoeffizient [kg/m ² h]:	5.18	3.78	7.39
Druckfestigkeit [MPa]:	84.2 +/- 20.6	83.0 +/- 21.9	89.7 +/- 2.8
Spaltzugfestigkeit [MPa]:	7.02 +/- 0.74	7.00 +/- 0.81	5.50 +/- 0.85
Biegezugfestigkeit [MPa]:	n/a	n/a	n/a
Abriebfestigkeit [cm ³ /50cm ²]:	n/a	n/a	n/a
Ausdehnungskoeffizient [*10 ⁻⁶ K ⁻¹]:	11.44	11.13	11.26
Restdehnung [mm/m]:	0.00	0.00	0.00
Hygrische Dehnung [mm/m]:	0.06	0.05	0.11
Statischer E-Modul [GPa]:	16.38	14.72	13.64
Vp, trocken [km/s]:	3.954	3.947	3.689
Vp, nass [km/s]:	4.179	4.237	4.082

Petrographische Bezeichnung: **Subarkose**

Handelsname: **n/a**

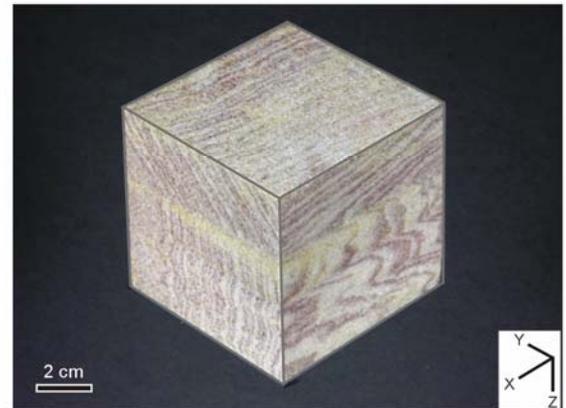
Probenname: **S-Rainbow**

Stratigraphisches Alter: **Mittl.-Oberer Jura**

Makroskopische Merkmale:

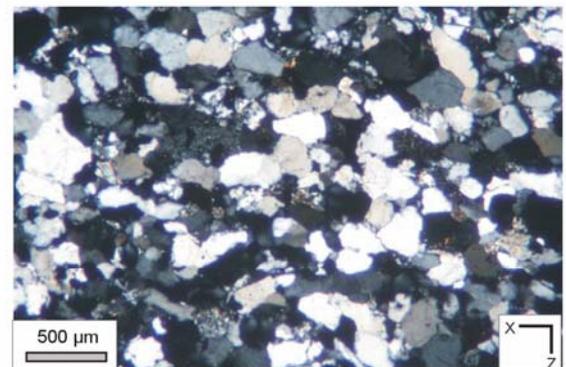
Feinkörniger, ursprünglich weißer Sandstein mit rötlich-violetten Verfärbungen. Die Verfärbungen treten dabei in Form so genannter Liesegangscher Ringe auf, die auf migrierende Lösungen im Gesteinsverband zurückgehen und die Migrationsfronten dieser Lösungen nachzeichnen. Die Liesegangschen Ringe führen zu parallelen, teilweise konzentrisch auftretenden oder sinuös verlaufenden Farbwechseln, die konkordant oder - wie in der vorliegenden Abbildung rechts - diskordant zur sedimentären Schichtung ausgebildet sind.

Die Farbausbildung des Gesteins kann in Abhängigkeit des Sättigungsgrads der Lösungen variieren, so dass sowohl intensiv als auch schwach verfarbte Gesteine vorliegen können.



Mikroskopische Merkmale:

Korngröße: 160-250 µm (vereinzelt <500 µm)
 Kombindung: silikatisch
 Sortierung: mäßig
 Abrundung: kanten-gerundet
 Zurundung: gering-mittel
 Kontakte: planar>konvex-konkav



Richtungslose gesteintechnische Eigenschaften:

Matrixdichte [g/cm³]: 2.65
 Rohdichte [g/cm³]: 2.32
 Porosität [Vol.-%]: 11.35 (Auftrieb)/ 10.48 (Hg)
 Mittl. Porenradienklasse [µm]: 0.428
 Sättigungsbeiwert: 0.49

Mineralogische Zusammensetzung (Vol.-%) nach röntgenographischer Analyse (RDA):

Quarz: 92.4
 K-Feldspat: -
 Plagioklas: -
 Kaolinit: 3.9
 Illit: 3.7
 Calcit: -

Richtungsabhängige gesteintechnische Eigenschaften:

	<i>X-Richtung</i>	<i>Y-Richtung</i>	<i>Z-Richtung</i>
Wasseraufnahmekoeffizient [kg/m² h]:	12.97	1.33	3.32
Druckfestigkeit [MPa]:	114.1 +/- 18.8	116.7 +/- 8.8	110.9 +/- 13.9
Spaltzugfestigkeit [MPa]:	6.46 +/- 1.18	7.19 +/- 1.22	4.96 +/- 0.72
Biegezugfestigkeit [MPa]:	13.26 +/- 0.50	12.40 +/- 0.24	8.30 +/- 0.81
Abriebfestigkeit [cm³/50cm²]:	9.57	9.46	9.78
Ausdehnungskoeffizient [*10⁻⁶ K⁻¹]:	12.15	11.95	12.45
Restdehnung [mm/m]:	0.00	0.00	0.00
Hygrische Dehnung [mm/m]:	0.03	-0.30	0.04
Statischer E-Modul [GPa]:	19.06	18.18	17.86
Vp, trocken [km/s]:	4.081	3.940	3.782
Vp, nass [km/s]:	4.371	4.174	4.157

Petrographische Bezeichnung: **Arkose**

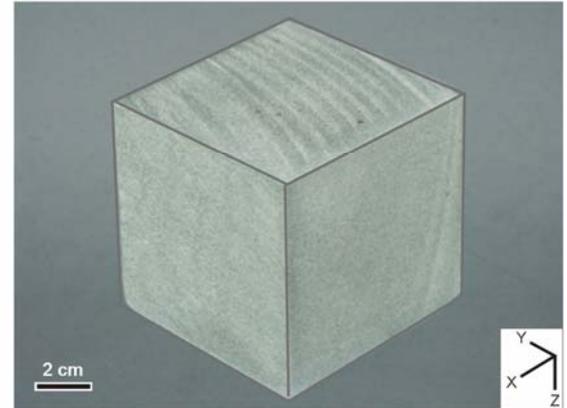
Probenname: **PC-Green**

Handelsname: **Hin Trai Khiew**

Stratigraphisches Alter: **Mittlerer Jura**

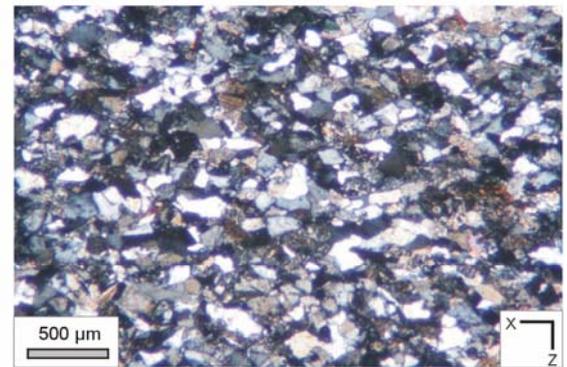
Makroskopische Merkmale:

Kennzeichnend für den Sandstein ist ein grüner Farbton und eine sehr feinkörnige Ausbildung der Minerale. Das Gestein liegt fast ausnahmslos mit einer sehr ruhigen, ungestörten Horizontalschichtung vor, die sich aus alternierenden Lagen im Millimeterbereich zusammensetzt. Vereinzelt ist bei dem Sandstein über eine Mächtigkeit von mehreren Dezimetern kein Anzeichen einer sedimentären Schichtung zu erkennen. Dies führt in diesem Fall zu einem dichten und massigen Gesamtbild. Die Schichtflächen des grünen Sandsteins sind vereinzelt mit einem dichten Belag an Glimmern, vorzugsweise Biotit tapeziert, der insbesondere auf den Oberflächen spaltrauer Produkte zum Vorschein kommt.



Mikroskopische Merkmale:

Korngröße: 100-160 µm
 Kornbindung: silikatisch, carbonatisch
 Sortierung: gut
 Abrundung: gerundet
 Zurundung: gering
 Kontakte: planar->konvex-konkav



Richtungslose gesteintechnische Eigenschaften:

Matrixdichte [g/cm³]: 2.73
 Rohdichte [g/cm³]: 2.53
 Porosität [Vol.-%]: 7.23 (Auftrieb)/ 7.68 (Hg)
 Mittl. Porenradienklasse [µm]: 0.053
 Sättigungsbeiwert: 0.85

**Mineralogische Zusammensetzung (Vol.-%)
 Nach röntgenographischer Analyse (RDA):**

Quarz: 43.5
 K-Feldspat: 8.4
 Plagioklas: 25.0
 Kaolinit: -
 Illit: 16.1
 Calcit: 2.8
 Chlorit: 4.1

Richtungsabhängige gesteintechnische Eigenschaften:

	<i>X-Richtung</i>	<i>Y-Richtung</i>	<i>Z-Richtung</i>
Wasseraufnahmekoeffizient [kg/m² h]:		3.77	4.47
Druckfestigkeit [MPa]:	89.6 +/- 9.9	108.1 +/- 10.3	112.0 +/- 7.4
Spaltzugfestigkeit [MPa]:	6.36 +/- 0.80	6.02 +/- 0.65	4.76 +/- 1.32
Biegezugfestigkeit [MPa]:	14.21 +/- 0.56	9.37 +/- 0.30	8.64 +/- 1.83
Abriebfestigkeit [cm³/50cm²]:	10.79	12.72	15.06
Ausdehnungskoeffizient [$\cdot 10^{-6} K^{-1}$]:	8.91	8.25	8.45
Restdehnung [mm/m]:	0.00	0.00	0.00
Hygrische Dehnung [mm/m]:	0.9	1.13	1.34
Statischer E-Modul [GPa]:	12.28	12.99	15.17
Vp, trocken [km/s]:	3.597	3.879	3.009
Vp, nass [km/s]:	4.098	3.972	3.919

Petrographische Bezeichnung: **Arkose**

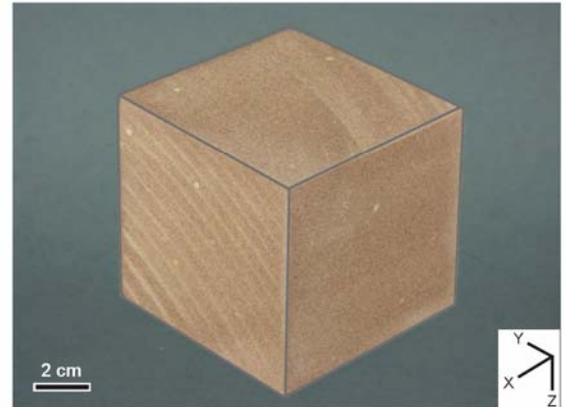
Probenname: **S-Red**

Handelsname: **Hin Sai Daeng**

Stratigraphisches Alter: **Abt-Alb**

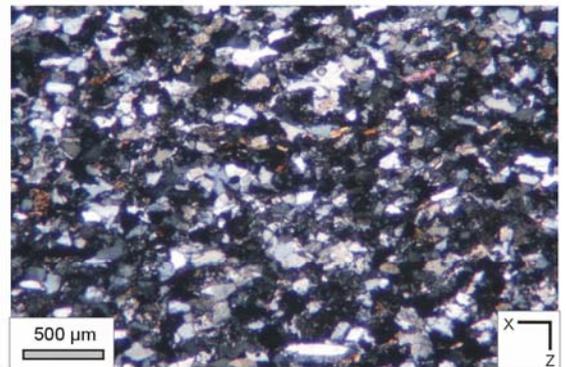
Makroskopische Merkmale:

Das Gesamtbild des Gesteins ist durch rötliche Farben und durch einen sehr feinkörnigen, laminaren Horizontalbau definiert. Die wechselnden Lagen besitzen in der Regel eine Mächtigkeit von wenigen Millimetern, wobei sich durchaus mächtigere Partien bis zu wenigen Dezimetern abzeichnen können. Typisch für den roten Sandstein sind helle, gelblich-graue Bleichungszonen, die kreisrund ausgebildet sind und selten einen Durchmesser von 30 mm überschreiten. Darüber hinaus ist der rote Sandstein ähnlich wie die gelbe Varietät (siehe S-Yellow) durch ovale Tonakkumulationen parallel zum sedimentären Lagenbau gekennzeichnet.



Mikroskopische Merkmale:

Korngröße: 100-130 µm
 Kornbindung: silikatisch
 Sortierung: gut
 Abrundung: kanten-gerundet
 Zurundung: gering
 Kontakte: planar>konvex-konkav



Richtungslose gesteintechnische Eigenschaften:

Matrixdichte [g/cm³]: 2.65
 Rohdichte [g/cm³]: 2.28
 Porosität [Vol.-%]: 13.25 (Auftrieb) 13.13 (Hg)
 Mittl. Porenradienklasse [µm]: 0.236
 Sättigungsbeiwert: 0.68

**Mineralogische Zusammensetzung (Vol.-%)
 Nach röntgenographischer Analyse (RDA):**

Quarz: 47.0
 K-Feldspat: 5.6
 Plagioklas: 34.9
 Kaolinit: -
 Illit: 11.2
 Calcit: -
 Hematit: 1.4

Richtungsabhängige gesteintechnische Eigenschaften:

	X-Richtung	Y-Richtung	Z-Richtung
Wasseraufnahmekoeffizient [kg/m² h]:	8.79	4.08	2.83
Druckfestigkeit [MPa]:	n/a	92.2 +/-	96.3 +/-
Spaltzugfestigkeit [MPa]:	6.50 +/- 0.56	5.56 +/- 0.69	5.46 +/- 0.43
Biegezugfestigkeit [MPa]:	11.03 +/- 0.41	9.56 +/- 0.17	7.38 +/- 0.30
Abriebfestigkeit [cm³/50cm²]:	n/a	n/a	n/a
Ausdehnungskoeffizient [*10⁻⁶ K⁻¹]:	9.56	8.89	8.64
Restdehnung [mm/m]:	0.00	0.00	0.00
Hygrische Dehnung [mm/m]:	0.21	0.20	0.76
Statischer E-Modul [GPa]:	n/a	11.44	13.00
Vp, trocken [km/s]:	3.054	2.861	2.579
Vp, nass [km/s]:	3.563	3.456	3.339

Anhang III: Lagerstättenenerträge, Blockgrößen und durchschnittliche Blockabmessungen.

Lagerstätte	Produktion [m ³ / Monat]	Blockgrößen		
		min.	max.	L*H*B (m)
<i>Magmatite</i>				
MT-Orange1	700	2.2	4.7	2.6*1.3*1.6
BT-Violet	500	2.9	6.4	2.2*1.5*1.4
BT-Blue2	120-170	3.5	9.9	2.4*2.0*1.9
BT-White	100-160	2.2	13.2	1.9*1.7*1.6
BT-Black	100	1.0	6.1	1.8*1.4*1.4
BN-Pink	100	3.4	6.0	1.9*1.8*1.3
BT-Blue1	80	3.8	8.7	2.0*1.5*1.0
SN-Blue	50	1.0	4.5	1.7*1.7*1.0
MT-Orange2	0	1.7	10.8	1.6*1.6*1.6
NB-Orange	100-150	1.1	10.3	2.0*1.6*1.4
SP-Grey	70-100	4.2	7.2	1.9*1.7*1.2
PS-Grey	50	n/a	n/a	n/a
PTC-Black	50	3.5	8.2	2.5*1.6*1.4
HH-Grey	n/a	2.9	9.3	2.6*1.6*1.4
MC-Yellow	n/a	2.2	3.7	1.6*1.4*1.2
<i>Carbonatgesteine</i>				
PK-Grey/Pink	1000	2.5	8.1	2.4*1.7*1.1
TS-Grey/Pink	500-600	3.5	8.1	2.0*1.6*1.4
PC-White/Red	<300	2.0	5.4	1.9*1.5*1.2
PC-Grey	150	5.4	6.5	2.5*1.6*1.5
KH-Red	<100	1.9	6.1	2.2*1.4*1.3
BTD-White	(<300)	-	-	-
<i>Sandsteine</i>				
S-White	n/a	2.0	6.5	1.9*1.6*1.5
S-Brown	n/a	2.7	5.8	1.9*1.7*1.3
S-Yellow	n/a	1.3	8.1	1.9*1.2*1.0
PC-Green	n/a	2.3	6.7	2.7*1.5*1.2
S-Red	n/a	1.2	3.9	1.9*1.1*1.0

Anhang IV: Maximale Abstandsverteilung der Trennflächen in den Lagerstätten.

Lagerstätte	Maximaler Abstand der Klüfte [m]	
	vertikal	horizontal
<i>Magmatite</i>		
MT-Orange1	20.0	5.0
BT-Violet	20.7	14.4
BT-Blue2	5.6	4.0
BT-White	12.6	2.7
BT-Black	7.2	4.0
BN-Pink	7.5	8.0
BT-Blue1	2.4	1.3
SN-Blue	8.9	6.0
MT-Orange2	3.3	2.8
NB-Orange	9.0	5.0
SP-Grey	4.0	5.0
PS-Grey	15.4	4.5
PTC-Black	10.0	>6.0
HH-Grey	2.4	6.0
MC-Yellow	3.4	6.0
<i>Carbonatgesteine</i>		
PK-Grey/Pink	14.8	20.1
TS-Grey/Pink	10.6	3.1
PC-White/Red	7.1	2.3
PC-Grey	6.2	2.5
KH-Red	6.3	3.3
BTD-White	-	-
<i>Sandsteine</i>		
S-White	6.0	2.4
S-Brown	5.5	1.6
Gelbe Sandsteine	14.0	2.3
PC-Green	8.8	4.0
S-Red	3.3	1.5

Danksagung

Die vorliegende Forschungsarbeit entstand auf Anregung und unter Betreuung von Herrn Prof. Dr. S. Siegesmund (Geowissenschaftliches Zentrum der Universität Göttingen), dem ich an dieser Stelle für das sehr interessante Thema der Arbeit sowie für das rege Interesse an dem Stand der Ergebnisse danke. Ich danke weiterhin Herrn Prof. Dr. Bernhard Stribny (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover) für das Interesse am Dissertationsthema sowie für die Übernahme des Korreferats.

Der Einstieg in die Arbeit wurde durch ein Kurzstipendium des Deutschen Akademischen Austausch Diensts (DAAD) ermöglicht, in dessen Rahmen die Geländearbeiten in Thailand durchgeführt wurden. Dem DAAD sei an dieser Stelle sehr herzlich für die Vergabe dieses Stipendiums gedankt.

Des Weiteren gilt mein Dank:

- insbesondere Jochen Stein für seine große Unterstützung bei fachlichen Fragen und Problemen. Jochen steuerte durch sein Engagement und seine Diskussionsbereitschaft wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit bei.
- Dr. Helmut Duerrast und Wanpen Vechlang für die große Hilfe in organisatorischen und logistischen Belangen während meiner Aufenthalte in Thailand. Ohne ihre freundschaftliche Mitwirkung hätten viele Grundlagen für die vorliegende Arbeit nicht realisiert werden können.
- Dipl.-Geol. Stephan Mosch für seine stete Diskussionsbereitschaft und Unterstützung, vor allem gegen Ende der Dissertation.
- Dr. Thomas Weiß, Dr. Jörg Rüdlich und Dr. Andreas Koch für eine gute Zusammenarbeit und die Hilfsbereitschaft bei Fragestellungen.
- Dr. Alfons van der Kerkhoff und Dr. A. Kronz für die Hilfe am Katholumineszenz-Mikroskop bzw. an der Elektronenstrahl-Mikrosonde.
- der Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, sowie dem Department of Mineral Resources, Bangkok, Thailand. Stellvertretend seien Dr. Chongpan Chonglakmani und Khun Cherdsak Utha-aroon genannt.
- Günter Tondock und Michael Sosnitzer für die Hilfsbereitschaft bei technischen Problemenstellungen sowie den Hiwis des Tektoniklabors für ihre zuverlässige Unterstützung bei der Probenpräparation
- den zahlreichen thailändischen Naturwerkstein-Firmen für die Bereitstellung des Probenmaterials
- meinen Eltern, deren Unterstützung ich mir zu jeder Zeit der Dissertation sicher sein konnte.
- Jessica für die außerordentliche Geduld und das große Verständnis, das sie mir während der gesamten Arbeitsphase entgegengebracht hat.

Lebenslauf

Andreas Hoffmann
geboren am 28.04.1975 in Bad Driburg
Staatsangehörigkeit deutsch

Hochschulausbildung und wissenschaftlicher Werdegang

- Seit 02/2003 **Promotion**
Geowissenschaftliches Zentrum der Universität Göttingen (GZG)
- Thema der Dissertation:
„Naturwerksteine Thailands: Lagerstättenerkundung und Bewertung“
- 02/2003 – 08/2003 **Gastwissenschaftler** im Rahmen eines DAAD-Stipendiums
Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand
- Geländearbeiten zu lagerstättengeologischen, gesteintechnischen und ökonomischen Aspekten der Naturwerksteingewinnung in Thailand
 - Cooperation u. a. mit dem Department of Mineral Resources, Bangkok, Thailand
- 02/2004 – 12/2005 **Wissenschaftlicher Mitarbeiter**
Geowissenschaftliches Zentrum der Universität Göttingen (GZG)
- Mitarbeit an dem Projekt „Textur und Spannung als Ursache mangelnder Formbeständigkeit von Fassadenplatten aus Naturstein“
(Fördernummer GIN 03 DU03G1)
- Durchführung von Versuchen zum thermischen Dehnungsverhalten und zum Verbiegungspotential von Marmor
 - Verfassen von Zwischenberichten und wissenschaftlichen Beiträgen
- 06/2001 – 11/2002 **Studentische bzw. wissenschaftliche Hilfskraft**
Geowissenschaftliches Zentrum der Universität Göttingen (GZG)
- Isotopengeologische Untersuchungen
- 05/2000 **Praktikum:** Instituto de Geochronología y Geología Isotópica (INGEIS),
Geologische Fakultät der Univ. Buenos Aires, Argentinien.
- 10/1996 – 06/2002 **Diplomstudium**
Geowissenschaftliches Zentrum der Universität Göttingen (GZG)
- Geologische Kartierung des Las Chacras-Potrerrillos Batholithen (Sierra de San Luis, Argentinien)
 - Thema der Diplomarbeit: „Datierung der Abkühlungsgeschichte des Las Chacras-Potrerrillos Batholithen und seiner Rahmengesteine (Sierra de San Luis, Argentinien)“