

Zusammenhang zwischen technischen Eigenschaften und Gefüge eines Marmors^{*)}

Von P. Paulitsch

(Aus dem Mineralogisch-Petrographischen Institut der Universität Graz)

(Am Beispiel eines Bändermarmors wurden die richtungsabhängigen Druckfestigkeiten und die Anisotropie der thermischen Leitfähigkeit ermittelt und den Einkristall-Daten gegenübergestellt.)

(Banded marble was selected for the determination of the compressive strength as dependant on direction and of the anisotropy of the thermal conductivity, and a comparison was made with the data on single crystals.)

(Du marbre veiné fut choisi pour déterminer les résistances à la pression en fonction de la direction et l'anisotropie de la conductivité thermique; elles sont comparées avec celles des données des monocristaux.)

Bei der Interpretation technischer Eigenschaften von Werkstoffen muß auch das Gefüge der Probe berücksichtigt werden. Dieser Zusammenhang kann in mehrfacher Weise ausgenützt werden.

Einmal kann aus physikalischen Daten, die in verschiedenen Richtungen gewonnen wurden, auf das Gefüge, die Textur rückgeschlossen werden. Eine Rückrechnung auf die Textur eines Materials führt aber nicht in allen Fällen zum Ziel (1). Beim zweiten Weg kann versucht werden, aus einer quantitativen Erfassung der Textur, auf röntgenographischem oder optischem Wege, Rückschlüsse auf die Eigenschaften des Gefüges zu machen. Die Schwierigkeiten, die hierbei auftreten, sind: Störungen im Korngrenzenbereich, Poren und zum Teil unbekannte Einschlüsse. Zudem ist, wie Wassermann (1) berichtet, bei Metallgefügen eine sehr genaue Kenntnis der Textur nötig.

Im vorliegenden Falle eines Bändermarmors wurden sowohl das Gefüge, mit der Lage der einzelnen Körner, den Kornformen und der Menge der einzelnen Komponenten in der Probe messend erfaßt, wie auch die physikalischen Eigenschaften am gleichen Material bestimmt. Die in verschiedenen Richtungen des Gefüges ermittelten Werte der Druckfestigkeit und der thermischen Leitfähigkeit wurden den Daten der einzelnen Minerale, die dieses Gefüge aufbauen, gegenübergestellt. Dabei wurde der Zusammenhang zwischen Einkorn- und Gefügeeigenschaften erhalten; gleichzeitig konnte versucht werden, das Ausmaß der einzelnen Faktoren an der Anisotropie der Probe zu erkennen.

I.

Der vorliegende untersuchte Bändermarmor liegt in dem Teil des Gailtaler Kristallins, der jüngst vom hiesigen Institute aus kartiert wurde. Er ist in einem Steinbruch am Ostausgang des Ortes Reisach im Gailtal, Kärnten, aufgeschlossen, der gegenwärtig nicht in Betrieb ist.

Die Bänderung des Handstückes wird durch einen Wechsel von pigmentfreien und pigmenthaltigen

^{*)} Nach einem im Naturwissenschaftlichen Verein für Steiermark, Sektion Geologie und Mineralogie in Graz gehaltenen Vortrag.

Lagen erzeugt. Makroskopisch können noch Quarz-Augen erkannt werden, deren Größe im Zentimeterbereich liegt. Unter dem Mikroskop findet sich Kalzit ($0,2 \times 0,1 - 0,5$ mm), vereinzelt Muskovit ($0,1 \times 0,01$ mm) und Quarz im Kalzitgefüge in der Form der Tropfenquarze ($0,03 - 0,1 \times 0,07 - 0,2$ mm). Diese können vom Quarz in den Augen ($0,05 - 0,5 \times 0,1 - 1,5$ mm) getrennt werden.

Pyrit ($\varnothing = 0,08$ mm) und Limonit bilden das sichere Lagenpigment im untersuchten Bereich.

Die Messung der Drehlage der Gemengteile nach kristallographischer Hauptachse und z. T. auch nach kristallographischer Stellung im Gefüge erfolgte am Universaldrehtisch (2).

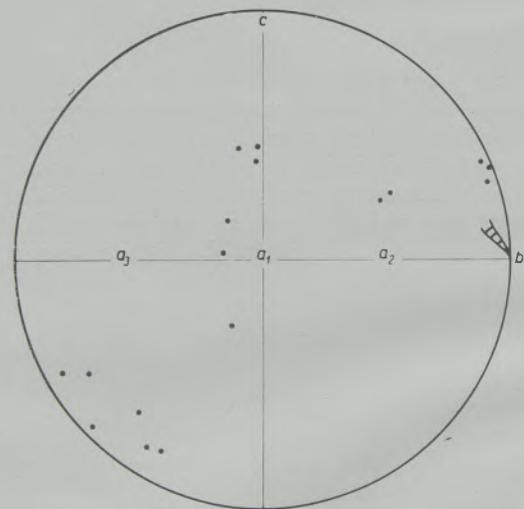


Abb. 1

Die im Steinbruch vermessenen Kluftpole streuen um die Gefügeebenen (a_1c), (a_2c), und (a_3c). Die sichtbaren Achsen der Kleinfaltung der pigmentierten Lagen variieren im schraffierten Bereich bei b_1 .

Auf die Art der Darstellung der Meßergebnisse in der flächentreuen Projektion der Lagenkugel braucht in diesem Rahmen nicht eingegangen zu werden. Es kann auf die Ausführungen von E. Clar (3) in dieser Zeitschrift hingewiesen werden.

Bereits einmal wurde die Lage einzelner Komponenten in diesem Gestein untersucht, und zwar im Zusammenhang mit der Frage des Auftretens von optisch anomal zweiachsigen Kalziten. Zudem wurde die Bedeutung der Koordinaten a_1 , a_2 , und a_3 darin behandelt (4).

Für die nunmehrige Fragestellung werden neue, noch nicht veröffentlichte Messungen mitgeteilt. Ein Vergleich der neuen Messungsergebnisse über die Kornlagen in diesem Bändermarmor mit den bereits erhaltenen, gibt zugleich über die Genität der untersuchten Bereiche Auskunft.

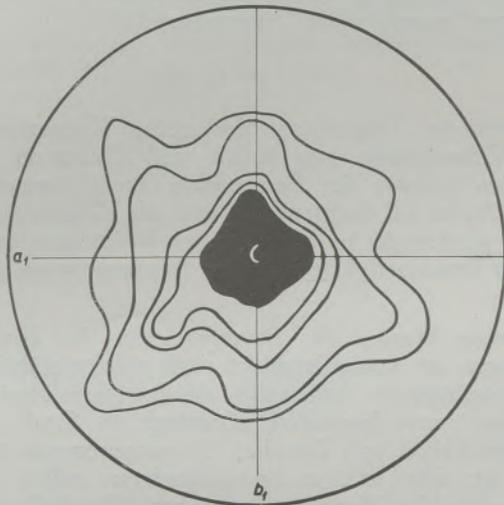


Abb. 2

Normal c . 120 Kalzitachsen. 13-10-9-7-51-0.

Zunächst seien die im Steinbruch sichtbaren Klüfte in ihrer Lage zu den Handstückkoordinaten wiedergegeben. (a_1b_1) = Bänderungsebene; c ist Normale auf (a_1b_1) ; b_1 ist die Achse der Kleinfaltung der pigmenthaltigen Lagen; zudem Richtung der Linearen, die im Muskovitbelag der Bänderungsebene zum Ausdruck kommt. a_1 liegt in (a_1b_1) und normal auf b_1 .

Die Vermessung der Klüfte konnte an zwei Abbruchwänden ausgeführt werden, von denen eine etwa OW, die andere NS streicht. Wie aus Abb. 1 ersichtlich, liegen die Pole der meisten Kluftflächenarten (mit $\pm 5^\circ$ Abweichung) auf den Großkreisen des Gefüges (a_1c) , (a_2c) und (a_3c) ; demnach (hol)-Flächen des Gefüges. Das Ergebnis der Vermessung von 120 optischen Achsen (= trigonale Hauptachse des Kalkspates) in einem Schliff parallel zur Bänderungsebene ist in der Abb. 2 niedergelegt. In Übereinstimmung mit den bereits vorliegenden Untersuchungen (4) liegt eine Achsenkonzentration normal bis subnormal zur Bänderungsebene vor; deutlich wird ferner die Dehnung in den Großkreisen (a_1c) und (b_1c) .

Der Vergleich der bisherigen Vermessungen mit den neuen ergibt, daß die Regelung der Kalzitachsen in den untersuchten Bereichen des Bändermarmors homogen ist. Weiter geht aus beiden Vermessungen hervor, daß eine „Fast-Einkornregel“ auftritt.

Als Ausdruck dieser Pseudosymmetrie können einige später folgende technische Daten angesehen werden.

Im Zusammenhang mit der Festigkeit eines Gesteins sind neben den freisichtigen Kluftflächen auch die Fugen der Einzelkörner von Interesse. Drei Kornfugenarten wurden vermessen und in einem Sammel-diagramm dargestellt, und zwar die Ebene der Druckwillinge e (0112), der Spaltfläche r (1011) und des Rhomboeders u (1014).

In Abb. 3 ist die Lage von 234 Flächennormalen dieser Kristallflächenarten dargestellt; vermessen in einem Dünnschliff normal auf der Gefügerichtung a_1 .

Die Häufigkeit der einzelnen Flächen ist bereits niedergelegt (4); demnach überwiegen die e -Flächen.

Der Kreis in der Mitte des Diagrammes deutet den Bereich an, in dem bei dieser Schnittlage die Flächennormalen nicht vermessen werden konnten, weil die Flächenpole einen zu kleinen Winkel mit der Schliffformalen einschließen.

Im Schliff normal b_1 wurden aber auch diese Flächenlagen vermessbar. Aus der zugehörigen Darstellung von 381 Flächenpolen in (25) Abb. 14 und bei gleichzeitiger Betrachtung der Abb. 3 wird ersichtlich, daß die Lage der Kornfugen im Bändermarmor charakterisiert ist durch:

1. Eine Häufung der Flächenlagen parallel bis subparallel zur Bänderungsebene; ihr Pol ist c .
2. Eine Gürtelbesetzung nach (a_1c) . Die Breite dieses Gürtels bis zu 80° wird bedingt durch die weiter unterbrochene Großkreisbesetzung nach (a_2c) und (a_3c) .

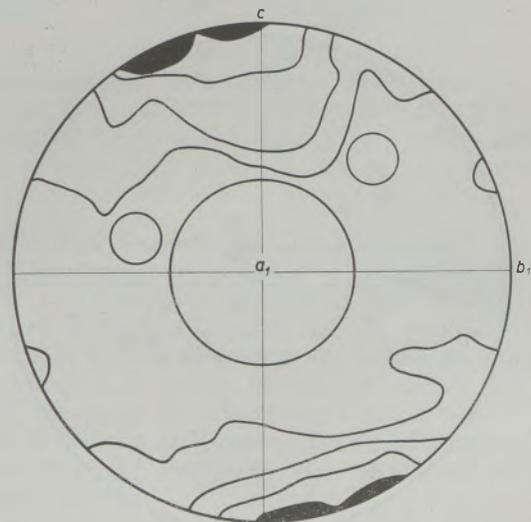


Abb. 3

Normal a_1 . 234 Kalzitfugen, e , r , u .
12-10-8-7-5-4-3-2-0

Für die Orientierung der Glimmerblättchen kann auf die schon vorliegende Untersuchung hingewiesen werden (4). Darnach liegen die meisten Glimmerblättchen parallel bis subparallel zur Bänderungsebene (a_1b_1) . Die übrigen pendeln in weiten Gren-

zen um diese Lage. Ihre Pole bilden einen nicht geschlossenen (a_1c)-Gürtel.

Die Orientierung von 1079 Achsen der Quarze im Kalzitgefüge wurde gleichfalls schon mitgeteilt (4). Die untersuchten Bereiche ergaben eine inhomogene Regelung dieser Quarzart. Nur das Untermaximum um b_1 trat in allen Diagrammen hervor. Es ist als Regel nach der Kornform für Quarz mit dem Gefügegenossen Kalzit bekannt.

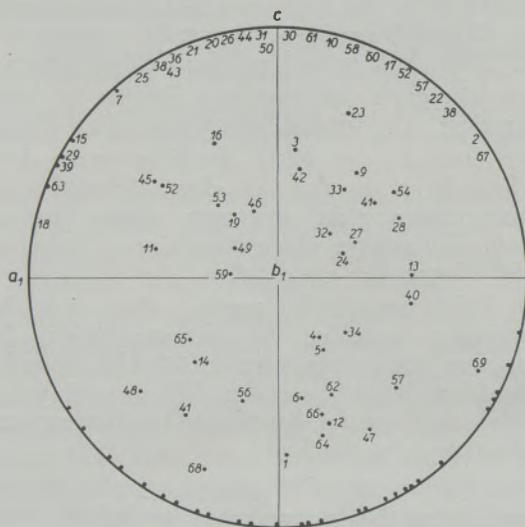


Abb. 4

Normal b_1 . 69 Quarzachsen eines Auges. Aus der laufenden Nummer kann die Nachbarschaft der Körner entnommen werden

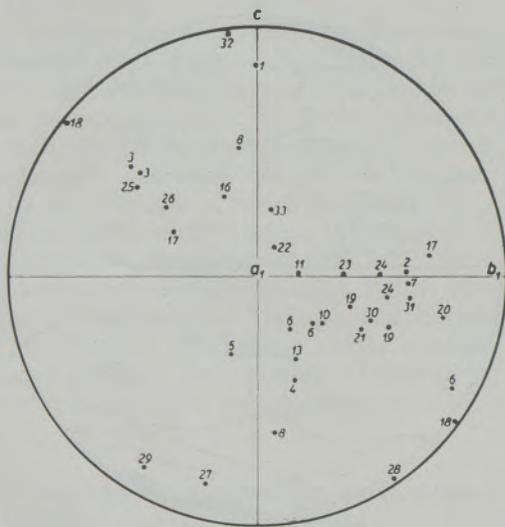


Abb. 5

Normal a_1 . 34 Quarzachsen desselben Auges

Auch für die Orientierung der Quarze in den „Augen“ geben die bereits vermessenen 290 Quarzachsen Auskunft (4). Zudem sollen aber weitere Vermessungen mitgeteilt werden, die 103 Achsen

von Quarzindividuen innerhalb eines „Auges“ betreffen. Abb. 4 gibt die Lage von 69 Quarzachsen im Zwickel des „Auges“ wieder, und zwar aus einem Schliff normal b_1 . Aus der fortlaufenden Nummer kann die Nachbarschaft der Körner und zugleich die Besetzungsfolge des Diagrammes entnommen werden.

Im Schliff normal a_1 wurde in der Mitte desselben „Auges“ die Lage von 34 Quarzachsen bestimmt, und in Abb. 5 dargestellt. Ein Vergleich der beiden Abbildungen 4 und 5 läßt die ungleiche Quarzkornlage in der Mitte (Schliff normal a_1) und im Zwickel des „Auges“ (Schliff normal b_1) deutlich werden. Auf die Häufigkeit dieser inhomogenen Regelung in „Augen“ wurde schon hingewiesen (4).

II.

Nach der Darstellung der neuen Vermessungen der Orientierung von Kalzit und Quarz in den „Augen“, sowie der Besprechung der Orientierung der Quarze im Kalzitgefüge und der Glimmerblättchen, werden die in verschiedenen Richtungen erhaltenen Druckfestigkeiten dieses Bändermarmors mitgeteilt.

Diesen Werten der Druckfestigkeit des Bändermarmors sei vorausgeschickt, daß eine ausführliche Untersuchung der Anisotropie der Festigkeit an einem Marmor vom Spertental, Kirchbach in Tirol, von Sander, Felkel und Drescher (5) vorgenommen worden ist. Die jetzigen Festigkeitsdaten sollen aufzeigen, welche Werte in diesem speziellen Falle festgestellt werden können. Zudem sollen sie den, wie mir scheint, neuen Daten über die Anisotropie der Temperatur- und Wärmeleitfähigkeit dieses Bändermarmors in ihrem Ausmaße gegenübergestellt werden.

Da die Festigkeitsdaten nur zu dieser Eingliederung dienen sollten, wurden sie auch nur an 6 Gesteinswürfeln geprüft. Da aber darauf geachtet wurde, daß nur Würfel ohne durchgehende Sprünge und Feinklüfte verwendet wurden, ist ein Vergleich der in der Abb. 6 dargestellten Daten untereinander sinnvoll. Die Würfel entstammen den grobkörnigen entpignierten Lagen des Bändermarmors.

Für die Druckfestigkeitsprüfung der Marmorwürfel möchte ich auch an dieser Stelle Herrn Dr. O. W. Blümel von der Versuchsanstalt der Technischen Hochschule Graz und Herrn Prof. Dr. H. Tschsch meinen Dank aussprechen.

Die Würfel Flächen ($a = 5$ cm) lagen für die folgenden Druckversuche parallel der Bänderungsebene (a_1b_1) sowie den Gefügeebenen (a_1c) und (b_1c). Das Ergebnis der Druckversuche von dieserart zur Bänderung orientierten Marmorwürfeln ist folgendes:

Druckrichtung	kg/cm ²
c	1320
a_1	970
b_1	931

Weiterhin wurden auch Marmorwürfel geschnitten, bei denen die Normalen der Winkel mit der Bänderungsebene (mit Normale c) verschiedene Winkel einschlossen. Die Würfelnormale des einen Würfels schließt mit dem Pol der Bänderungsebene c den Winkel von 10° ein, und zwar auf dem Großkreis nach (b_1c) . Die Druckfestigkeit der in dieser Richtung (mit $\rho = 10^\circ$, $\varphi = 0^\circ$) abgedrückten Würfel ergab: 1105 kg/cm^2 .

Die Würfelnormale der anderen Orientierung schließt einen Winkel von 16° mit dem Pol der Bänderung $= c$ ein, und zwar auf dem Großkreis von c nach $-a_1$. Bei dieser Prüfung wurden zwei Würfel verwendet, die folgende Daten der Druckfestigkeit in der Würfelnormale obiger Orientierung lieferten: 1090 und 1120 kg/cm^2 .

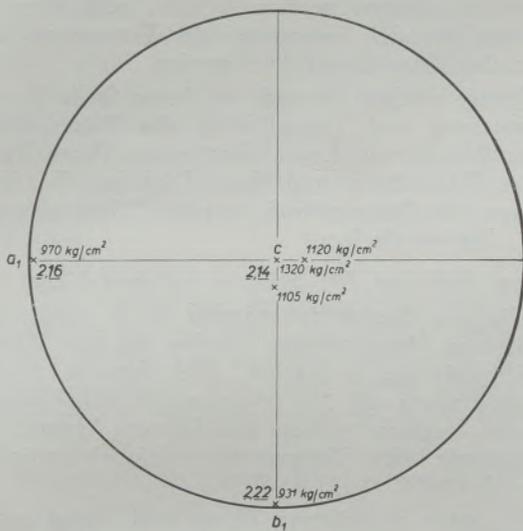


Abb. 6

Normal c . Die Abhängigkeit der Druckfestigkeiten (in kg/cm^2) und der thermischen Leitfähigkeit (in $\text{kcal/m, h, }^\circ\text{C}$) von den Gefügerichtungen. Die Druckfestigkeitsdaten in dicken Ziffern, die Wärmeleitfähigkeitszahlen in schräggestellten Ziffern

Mit diesen Werten ist die Größenordnung der Druckfestigkeit dieses Bändermarmors aufgezeigt. Zum Teil wird auch die Abhängigkeit vom Gefüge, im besonderen von der Lage der einzelnen Gemengteile sichtbar. Eine Darstellung dieser Daten auch in ihrer Abhängigkeit von der Richtung ist in der Abb. 6 vorgenommen worden.

Im vorliegenden Fall liegt das Ausmaß der Anisotropie der Festigkeit bei 42% gerechnet vom kleinsten Wert aus. Bei dem in (5) untersuchten Fall erreicht sie unter Bezug auf eine Wertegruppe 38% , wobei noch zu betonen ist, daß es sich um einen Marmor gehandelt hat, bei dem freisichtig keine Gefügerichtungen erkennbar waren.

Im vorliegenden Fall kann aber bereits eine Bänderung erkannt werden. Um so mehr ist die von Sander, Felkel und Drescher (5) erarbeitete Folgerung zu erwarten, daß „der höchste Wert den Würfeln“ zufällt, „in denen die Lamellen der Druckfläche gegenüber am flachsten liegen“. Wie aus

Abb. 6 entnommen werden kann, sind auch die höchsten Werte von 1320 und 1120 kg/cm^2 in und um c , d. h. parallel den Häufungsstellen der Lamellenpole (siehe Abb. 3). Zudem läßt ein Vergleich der richtungsabhängigen Kompressibilität von Kalziteinkristallen mit den im vorliegenden Marmor festgestellten Kalzitkornlagen die erhaltenen Gesteinsfestigkeiten verständlich erscheinen.

Auf weitere Faktoren, die die Festigkeit von Gesteinen beeinflussen, hat bereits Sander (5) hingewiesen; es sind dies die Anisotropie der Korngestalt sowie die Gestalt der Intergranularen.

Diese Faktoren kamen besonders deutlich in der von Bell (6) ausgeführten Untersuchung über die Festigkeit und Gefügeregel eines Granits hervor. Zugleich wurde darin festgestellt, daß die Deformation durch Verschiebung zwischen den Körnern beginnt und nicht innerhalb der Körner, wie bei manchen Marmoren.

Eine Zusammenstellung der bisher bekannten und überprüften Werte richtungsabhängiger Druckfestigkeiten hat Ingerson (7) ausgeführt, die im folgenden auszugsweise wiedergegeben sei.

Verhältnis der Festigkeit zu Gesteinsgefüge

Material	Druckfestigkeit			Lit.
	a	b	c	
Marmor	1118	1291	1470	(5, 1929)
Diabas	1876	1705	1607	(13, 1935)
Granulit	3467	3225	1778	„
Basalt	3209	3208	2508	„
	H	K	L	
Diorit-Hornfels	3260 < (ab)	2990 b	2000 c	„
Granit	2090	2430	2170	(6, 1935)

Alle diese Versuche zur Gesteinsfestigkeit wurden bei Raumtemperatur und dem allseitigen Druck von etwa 1 Atmosphäre ausgeführt. Der Einfluß von höheren allseitigen Drucken auf die Festigkeit von Mineralen ist von Bridgmann (8) untersucht worden. Für Quarz z. B. wurde hierbei festgestellt, daß bei einer Erhöhung des allseitigen Druckes von 0 auf etwa 24.000 atm in Richtung der kristallographischen Hauptachse die Festigkeit von 24.000 auf 40.000 kg/cm^2 ansteigt.

Von Griggs (9) wurden auch die Festigkeiten von Kalzit-Einkristallen ermittelt, und zwar bei verschiedenen allseitigen Drucken. Die Zunahme der Festigkeit bei Steigerung des allseitigen Druckes wurde darin erfaßt. Sie wird besonders bei Betrachtungen über die Deformation in verschiedener Erdrindentiefe herangezogen werden können.

Außerdem traten bei diesen Versuchen vor dem Bruch Verkürzungen der Einkristallprobe auf, die bei einem allseitigen Druck von 1 atm und rund 1500

kg/cm² Belastung etwa 4 % betragen, während sie bei einem allseitigen Druck von 10.060 Atm. und 5000 kg/cm² Belastung etwa 10 % erreichte; bei 8000 Atm. betrug sie um 7 %.

Bei einem Kalkstein lag die Verkürzung bei den letztgenannten Versuchsbedingungen hingegen bei 32 Prozent.

Aus diesem großen Unterschied der Verkürzung zwischen Gestein und Kalziteinkristall wurde geschlossen, daß neben intra- vor allem intergranulare Verformung stattgefunden hat.

Weitere Untersuchungen an Kalkstein und Marmor liegen von Griggs (10) vor. Für Marmor wurde im Bereich des allseitigen Druckes von 0 bis etwa 10.000 atm eine Zunahme der Festigkeit von etwa 15.000 auf 160.000 lbs/in.² gefunden. Weiter geht hervor, daß Zug-Rupturen parallel zur Richtung des Druckes häufiger bei niederem allseitigem Druck auftreten.

Die modernsten Experimente und gefügekundlichen Untersuchungen der amerikanischen Forschungsgemeinschaft, die die künstliche Gefügeänderung betreffen, können in diesem Zusammenhang nicht unerwähnt bleiben. Bei Drucken bis zu 10.000 atm, 20 ° C und 0,5 % Wassergehalt wurden völlige Gefügeänderungen innerhalb von 15 Min. in gewünschter Art erzielt, und zwar bei Druckversuchen wie auch bei Zugbeanspruchung (11).

Auch bei metallographischen Untersuchungen wird — nach der röntgenographischen Erfassung der Kornorientierung — auf den Einfluß der Kornform auf die Eigenschaften des Werkstoffes hingewiesen. Wassermann (1) berichtet, daß gelängte Formen von Metallkristallen und Schlacken die Zugfestigkeit im gesamten Werkstoff quer zur Stengelrichtung (Walzrichtung) bis zu 35 % verringern können. Zugleich wird dargestellt, daß es nicht häufig möglich ist, aus der Kenntnis von z. B. elastischen Daten auf die Blechtextur zurückzuschließen. Es kann demnach nur in den seltensten Fällen auf eine röntgenographische oder optische Vermessung des Gefüges verzichtet werden. Außerdem wird darauf verwiesen, daß die Zerreißfestigkeit im überwiegenden Maße von der Kornform der Gemengteile abzuhängen scheint.

Auch für die magnetischen Eigenschaften von metallischen Werkstoffen wurde bereits mit industriellem Erfolg die Regelung der Komponenten berücksichtigt.

Für eine praktische Auswertung der Kalzit-Regel in Marmoren kann auf die Untersuchung von Bain (12) verwiesen werden. Hierbei war die Kornorientierung der Kalzite zur Erzeugung einer maximalen Lichtdurchlässigkeit zu berücksichtigen.

Anschließend soll darauf hingewiesen werden, daß die Wichtigkeit der Berücksichtigung der Gesteinsanisotropie bei der Interpretation von Festigkeiten Sander (12) betont hat. Eine Berücksichtigung erscheint auch dann nötig, wenn gegenwärtig von der totalen Gesteinsfestigkeit nur ca. 200—400 kg/cm² je nach Verwendung ausgenützt erscheinen. Denn in wieweit dies auch bei zukünftigen Bauten der Fall sein wird, ist noch offen.

Gleichzeitig kann hier bemerkt werden, daß in der Praxis des Materialprüfers als eine der Ursachen der Streuung von Festigkeitswerten die Gesteinsanisotropie Berücksichtigung findet (z. B. Holler, 13). Auch die ÖNORM B 3124 verlangt bei der Druckfestigkeitsprüfung von Naturstein (15): „Bei ausgesprochen geschieferten oder geschichteten Gesteinen hat die Druckfestigkeitsprüfung . . . auch bei einer Druckrichtung parallel zur Schieferung zu erfolgen. Im Falle eines stark gestreckten Gefüges auch noch in der dritten Richtung“.

III.

Nachdem das Ausmaß der zu erwartenden Anisotropie der Festigkeit dieses Bändermarmors erfaßt ist und auf einige der Festigkeit beeinflussende Faktoren eingegangen werden konnte, soll über die Untersuchung der Anisotropie der Temperatur- und Wärmeleitfähigkeit berichtet werden.

Vorerst möchte ich noch an dieser Stelle für die Vermittlung und Ermöglichung der Untersuchung Herrn Prof. Dr. F. Angel, Graz, sowie Herrn Dr. F. Trojer, Radenthein, und Herrn Dipl.-Ing. W. Treffner von der Österreichisch-Amerikanischen Magnesit A.G., bestens danken.

Herr Dipl.-Ing. W. Treffner berichtet hiezu:

„Die uns übersandten parallel a_1 , b_1 und c geschnittenen Marmorproben wurden auf ihre Wärmeleitfähigkeit hin untersucht. Die Messung erfolgte in dem bei uns seit 2½ Jahren zur Betriebskontrolle und zu Versuchszwecken installierten Apparat zur Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit zwischen 20 und 100 ° C (14).

Die unten angeführten Werte sind Mittel aus je 14 Messungen an zwei Platten (der gleichen Orientierung). Die Unterschiede zwischen a_1 , b_1 , und c liegen praktisch außerhalb der Meßgenauigkeit, die für nicht poröse Körper bei der Temperaturleitfähigkeit bei $\pm 0,00002$ und bei der Wärmeleitfähigkeit bei $\pm 0,005$ liegt (in den jeweiligen Maßeinheiten). Zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit aus der Temperaturleitfähigkeit wurde für alle Proben die spezifische Wärme zu 0,206 kcal/kg ° C, angenommen (16); das Raumgewicht (die Dichte) der Proben war im Mittel 2700 kg/m³“.

(Die spezifische Wärme für das Mineral Kalzit im Bereich von 0° bis 100° C ist 0,206 cal. [17]).

Die Wärmeleitfähigkeit hat die Dimension cal, sec⁻¹, cm⁻¹, grad⁻¹. Hierbei ist zu erwähnen, daß in der deutschsprachigen Literatur die „14,5°-Kalorie“, in Amerika die „20°-Kalorie“ verwendet wird. Für die Wärmeleitfähigkeit von Gesteinen liegen schon Daten vor, die aber nicht in Zusammenhang mit quantitativen gefügekundlichen Messungen stehen.

Für Marmor kann für den Bereich zwischen 0 bis 20 Grad gefunden werden: 1,8—3,0 Kcal/, m, h, grad. (16).

Friedländer (18, 1912) hat die Daten der thermischen Leitfähigkeit von rezenten Laven für die Frage der geothermischen Tiefenstufe herangezogen. Reich (19) berichtet über die unregelmäßige Temperatur-

	Temperaturleitfähigkeit	Wärmeleitfähigkeit	
	a ² , in m ² /h	in kcal/m, h, C ⁰ .	in cal/cm, sec °C
Probe in Richtung a	0,00388	2,16	0,00600
Probe in Richtung b	0,00399	2,22	0,00616
Probe in Richtung c	0,00385	2,14	0,00594

verteilung in geologischen Körpern und sagt, daß diese in den meisten Fällen nicht durch die Verschiedenheit in der thermischen Leitfähigkeit bedingt ist, als vielmehr durch die ungleiche Wärmezufuhr, und zwar durch Vulkane und die Wärmeabfuhr durch kalte Tiefenwässer der Meere.

Für Marmor aus dem Simplontunnel gemessen parallel der Schieferung findet Königsberger (21) 0,00520 gcal/cm, grad. Zugleich weist er darauf hin, daß ungleiche Daten oft auf der Verschiedenheit der Methoden beruhen.

Jannetaz (20) fand, daß die thermische Leitfähigkeit besser in der Schieferung als normal dazu ist; der Unterschied kann in Glimmerschiefer bis zu 3 : 1 ausmachen.

Im speziellen Fall des Bändermarmors von Reisach kann das Ausmaß der Anisotropie der thermischen Leitfähigkeit aus der Abb. 6 und obiger Tabelle entnommen werden. Die maximale Anisotropie erreicht für eine berechnete Wertgruppe 3,7%; während die Fehlergrenze in der Meßmethode bei 0,2 % liegt.

Im folgenden soll nun aufgezeigt werden, wie groß die Anisotropie der thermischen Leitfähigkeit für die einzelnen Komponenten dieses Bändermarmors ist. Kalzit, Quarz, Glimmer neben Pigment und vereinzelt Pyrit sind die Gemengteile.

Für Kalzit sind folgende Werte gemessen (17) in cm, g, sec.

	Less	Tuchschmid
parallel c	0,010	0,0096
normal c	0,0084	0,0079

Das Ausmaß der Einkorn-Anisotropie ist vom jeweils kleineren Wert aus gerechnet 19 und 21 %.

Aus der Angabe der thermischen Leitfähigkeit für Kalziteinkristalle ist ersichtlich, daß die Anisotropie in einem Gefüge mit „Fast-Ein-Kornregel“ im Maximum 21 % betragen kann. Diese mögliche Anisotropie wurde aber im untersuchten Marmor nicht gefunden; sie liegt hingegen nur bei 3,7 %, und außerdem in einem nicht erwarteten Sinne. Denn auf Grund der Kalzitregel konnte erwartet werden, daß in der Richtung c des Gefüges (Pol der Bänderung) eine größere Leitfähigkeit als in den Richtungen a₁ und b₁ des Gefüges auftritt. Tatsächlich ist aber in der Gefügerichtung c die geringste Wärmeleitfähigkeit = 2,14.

Nun pendeln aber die Kalzitachsen im Gefüge, und zwar nach der planimetrischen (und gravimetrischen) Messung der einzelnen Felder im Diagramm Abb. 2, die die Besetzungsdichte der optischen Achsen der Kalzite darstellen, in folgender Weise: 47 % aller Kalzit-Kornachsen pendeln um die „Einkornlage“ (Achse in c des Gefüges) nur um den Winkelbetrag von 14° bzw. 22°. Insgesamt 68 % aller Kalzit-Kornachsen pendeln um 40° aus dieser Lage. Die übrigen 32 % stehen höchstens 65° von der Orientierung: Kalzitachse in c des Gefüges, ab.

Daraus wird ersichtlich, daß auch bei einer Berücksichtigung der Abweichung von der „Einkornregel“ für die Kalzite, die geringe und umgekehrte thermische Anisotropie des Gefüges nicht erklärt werden kann. Es müssen vielmehr weitere Faktoren, z. B. die weiteren Gemengteile mitwirken.

Der Gemengteil Quarz ist nach den optischen Analysen in den verschiedenen Gesteinsbereichen in 4—10 Vol. % vertreten. Eine quantitative chemische Analyse ergab: SiO₂ = 4,7 Gew. %. Bei der Vermessung der Quarzregel wurde festgestellt, daß sowohl eine inhomogene Regel der Quarze im Kalzitgefüge, wie auch der Quarze in den „Augen“ vorliegt. Oft trat aber das Untermaximum unweit b₁ auf (4).

Für Quarzinkristalle sind bei 100° C folgende Werte für die thermische Leitfähigkeit in verschiedenen kristallographischen Richtungen bekannt.

	Knapp (22)	Birch u. Clark (23)
normal c	0,0212	0,019
parallel c	0,0095	0,012

Die Anisotropie im Quarzkristall ist von kleinerem Wert aus jeweils gerechnet 58 und 120 %.

Bei homogener Verteilung der Quarzachsen auf der Lagenkugel müßte sich die Anisotropie der thermischen Leitfähigkeit der Quarzinkörner statistisch aufheben. Da in der Richtung b₁ des Gefüges der größte Wert der thermischen Leitfähigkeit beobachtet wurde, kann man versucht sein, einen Einfluß des in fast allen Diagrammen erscheinenden Untermaximums der Quarz um b₁ zu vermuten. Offenbar genügt aber dieses Untermaximum der Quarze im Kalzitgewebe nicht, um die thermische Leitfähigkeit des Gesamtgefüges umzukehren. Eine weitere qualitative Berücksichtigung der Einkorn-

anisotropie läßt die inhomogene Quarzregel noch nicht zu. Siehe (25).

Die Wirkung der Gesteinskomponente Glimmer ist äußerst schwer abzuschätzen, weil Auskünfte fehlen, die über die Lage des Glimmerblättchenpoles noch hinausgehen (25). In Betracht kommen die Orientierung der Zonenachse [100] pro Korn und die Art der räumlichen Verteilung der Glimmerblättchen; ob nebeneinander lückenlos eine homogene Schicht bildend oder nicht.

Die Kenntnis der Drehlage der Glimmer alleine (ohne Kenntnis des Ortslage-Typen) genügt nicht, um die Anisotropie der Gesteinswärmeleitfähigkeit zu klären.

Es muß weiter an noch andere die thermische Leitfähigkeit eines Gefüges beeinflussende Faktoren gedacht werden. Es sind dies: Die Poren in den Körnern und in der Intergranularen, sowie deren Wasser- und Gasfüllung. Ferner Druck und Temperatur bei den Meßbedingungen.

Über das Ausmaß der Veränderungen der thermischen Leitfähigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur bei konstantem Druck von 1 atm. geben die einzelnen Zahlen Auskunft (23).

	50°	200°
Dunit	0,0081	0,0101

Daraus ist zu ersehen, daß bei einer Temperaturerhöhung die Leitfähigkeit innerhalb der gleichen Größenordnung bleibt. Der Einfluß, den eine Druckzunahme auf die Wärmeleitfähigkeit nimmt, wurde von Bridgmann (in 23) studiert. Es tritt eine erkennbare Zunahme der Wärmeleitfähigkeit ein. Bei Basalt wurde bei 10.000 kg/cm² eine 4,7 % Änderung gegenüber der bei 1 kg/cm² festgestellten thermischen Leitfähigkeit erhalten. Da alle Messungen im vorliegenden Fall bei gleichem Atmosphärendruck ausgeführt wurden, fällt dieser Faktor weg.

Der Einfluß der Poren auf die Wärmeleitfähigkeit von Gesteinen ist verständlich, da Luft eine geringe Wärmeleitfähigkeit besitzt. Je nach dem Porengehalt schwankt nach Friedländer (18) die Wärmeleitfähigkeit von Vesuv-Laven von 0,0027—0,0047 g, cm, sec. grad. Reich (19) führt ein weiteres Beispiel hierfür an: Trockener Quarzsand ergab 0,001, derselbe Sand angefeuchtet ergab 0,0082 gcal. cm. sec. grad.

Der zahlenmäßige Unterschied zwischen Wasser und Luft sei gegenübergestellt: Für Wasser bei 4,1°C beträgt er 0,0012, für Luft bei 0° C 0,000056 in g, cm, sec, grad.

Mit welcher Häufigkeit Flüssigkeitseinschlüsse in Gesteinsgemengteilen auftreten, hat vor kurzem Deicha (24) aufgezeigt. Darnach sind bei Gesteinen aus dem Montblanc in einem Dünnschliff von 0,1 mm Dicke und auf einer Fläche von 0,01 mm² bis zu 100 Flüssigkeitseinschlüsse gefunden worden.

Inwieweit die in Marmoren bekannten und beobachteten Fadenporen (2) die Anisotropie der thermischen Leitfähigkeit dieses Bändermarmors beeinflussen, ist offen (25).

Einen allgemeinen Anhaltspunkt für den Einfluß der Poren und ihrem eventuellen Materialgehalt geben die absoluten Zahlen der thermischen Leitfähigkeit für Kalzit-Einkörner und von Marmoren. Diese zeigen, daß in einem Kalzitgefüge die thermische Leitfähigkeit kleiner ist als in einem Einkristall; siehe weiter oben.

Aus den vorliegenden Untersuchungen geht hervor:

Die Anisotropie der thermischen Wärmeleitfähigkeit dieses Marmors ist im Verhältnis zur Orientierung seiner Kalkspäte umgekehrt. Denn im Marmor ist parallel *c* die Richtung der kleinsten Wärmeleitfähigkeit. In dieser Gefügerichtung *c* liegen aber die Kalzit-Hauptachsen („Fast-Einkorn-Regel“). Im Kalkspat ist nun die Wärmeleitfähigkeit so, daß parallel der Hauptachse der größte Wert liegt.

Zur Erklärung dieser Verhältnisse könnte in beschränktem Maße die Mitwirkung des Gefügeelementes Quarz (schwache Häufung um *b*₁) herangezogen werden. Um den Effekt von Glimmer und den weiteren Komponenten beurteilen zu können, müssen noch weitere Daten über die räumliche Verteilung (Ortslage nach (2)) dieser Komponenten vorliegen. Die relative Wärmeleitfähigkeit in den einzelnen Gefügerichtungen dieses Bändermarmors scheint von der Orts- und Drehlage, sowie von den Gittereigenschaften seiner Gemengteile abzuhängen; die absolute Wärmeleitfähigkeit (im Verhältnis zu Einkristallen und anderen Gesteinen) zudem vorwiegend von der Korngröße seiner Komponenten und von der Porenführung.

Zugleich sei darauf hingewiesen, daß die hier im Marmor-Einzelfall ermittelten Ergebnisse noch einer weiteren statistischen Überprüfung bedürfen. Auch für magnesitische Gesteine sind sie noch offen.

Zusammenfassung

Die Orientierung der einzelnen Gemengteile in einem Bändermarmor wurde mit dem Universal-Drehtisch gemessen. Die Kalzitkörner bilden ein „Fast-Einkorngefüge“. Die Quarze in den Augen sind inhomogen geregelt. Ähnliches gilt für die Quarze im Kalzitgewebe, doch tritt fast immer das Untermaximum um *b*₁ auf. Die meisten Glimmerblättchen liegen parallel der Bänderungsebene; einige pendeln in weiten Grenzen aus dieser Lage.

Die in verschiedenen Richtungen des Gefüges erhaltenen Druckfestigkeiten werden schon aus dem Kalzitgefüge verständlich und werden mit dem bisher schon bekannten anisotropen Festigkeitsverhalten der Gesteine verglichen.

Für die Erklärung der beobachteten Anisotropie der thermischen Leitfähigkeit des Gesteins müssen mehrere Faktoren behandelt werden (25).

Summary

The orientation of the individual constituents of banded marble was measured by means of the Federow universal-stage. The calcite grains form a quasingle-crystal fabric. The quartz grains in the eyes are arranged inhomogeneously. Those in the calcite texture are arranged similarly, but around b_1 they are below the secondary maximum. Most of the mica lamellae are parallel to the banding plane, and

some of them oscillate widely from this position.

The compression strength found in the various directions of the texture becomes intelligible from the calcite fabric, and are compared with the known anisotropic strength of other rocks.

For the explanation of the observed anisotropy of the thermal conductivity of the rock several factors must be considered.

Résumé

L'orientation des constituants individuels du marbre veiné est mesurée à l'aide de la table rotative suivant le système de M. Federow.

Les grains de calcite forment une structure quasi monogranulaire. Les grains du quartz sont arrangés d'une manière non homogène dans les yeux. Les quartz dans le réseau de calcite sont disposés d'une manière analogue, mais autour de b_1 ils se trouvent au-dessous du maximum secondaire. La plupart des lamelles de mica sont parallèles au plane veiné et

quelques-unes oscillent largement de cette position.

La résistance à la compression trouvée dans les différentes directions du réseau devient compréhensible de la texture du calcite; elle est comparée avec les résistances anisotropiques déjà connues des autres roches.

Quant à l'interprétation de l'anisotropie observée de la conductivité thermique des roches des facteurs divers doivent être pris en considération.

Literaturverzeichnis

1. Wassermann, G., Die Texturen metallischer Werkstoffe, Springer Berlin 1939.
2. Sander, B., Gefügekunde der Gesteine, Springer Wien, 1930 und Einführung in die Gefügekunde der geologischen Körper, Springer Wien 1948 u. 1950.
3. Clar, E., Über die geologische Auswertung von Falten der Gesteine. Radex-Rundschau, Radenthein, 1951, H. 2, S. 65.
4. Paulitsch, P., Zweiachsige Kalzite und Gefügeregelung, TMPM Bd. 2, 1951, S. 180–197.
5. Sander, B., Felkel, E., Drescher, F. K., Festigkeit und Gefügeregel am Beispiel eines Marmors. N. Jb. f. Min. etc. BB 59, Abtl. A. 1929, S. 1–26.
6. Bell, J. F., Festigkeit und Gefügeregel am Beispiel eines Granits. N. Jb. für Min. etc., BB 71, Abt. A 1936, S. 193–213.
7. Ingerson, E., Why petrofabrics? Trans. Am. Geophys. Union. 1944, p. 635.
8. Bridgmann, P. W., zitiert in Fairbairn, H. W., Structural petrology of deformed rocks. Addison Wesley Press, Cambridge, Mass. 1949.
9. Griggs, D., Deformation of single calcite crystals under high confining pressures. Am. Min. 23, 1938 p. 28.
10. Griggs, D., Deformation of rocks, etc. Journ. Geol. 1936, 44, p. 541.
11. Knopf, E. B., Study of Experimentally Deformed Rocks, Science, Vol. 103, 1946, Nr. 2665, P. 99–103. und Griggs, D. Miller W. B., Bandin J. W., Thurner F. J., Chih' C. S., Deformation of Yule marble. Bull. Geolog. Soc. Am. Vol. 62, 1951, p. 853–905.
12. Bain, G. W., (1936) zitiert in Sander, B., Gefügekunde und ihre Anwendungen. Zeitschr. f. angew. Mineralogie, Bd. 1. 1939, S. 285.
13. Holler, K., Über die Abhängigkeit der technologischen Gesteinseigenschaften von der Gefügeregelung. Zeitschr. D. geol. Ges., Bd. 87, 1935, S. 385, 447.
14. Ryk, S., B. Stalhane, Techn. Didskr. 62, (1932) 285. W. Steger, Ber. DKG 16, (1935) 596. G. Jaeger, W. Koehler, F. Stapelfeldt, Ber. DKG 27 (1950).
15. Kieslinger, K., Die neue österreichische Gesteinsnormung. Geologie und Bauwesen, Jg. 20, 1953, 1–5.
16. Landolt-Börnstein (1923) Hw. II 1259. aus Messungen von H. Hecht (bei 0–100 Grad C).
17. Hintze, C., Handbuch der Mineralogie, 1930 I/III/1, 2861.
18. Friedländer, I., Über die Wärmeleitfähigkeit einiger vulkanischer Gesteine. Gerl. Beitr. Geophys. Bd. 11. Kl. Mitt. S. 85, 1912.
19. Reich, H., Handbuch der Exp. Physik, Bd. 25/III, S. 45.
20. Jannetaz, E., Bull. soc. geol. France. (3) 4. 1876. 116.
21. Königsberger, J., und Mühlberg, M., Über Messungen der geotherm. Tiefenstufe etc. N. Jb. f. Min. etc. BB. 31, 1911, 107.
22. Knapp, W. J., J. Amer. Ceram. Soc. 26, (1943) Nr. 2, S. 48–55.
23. Niggli, P. und E., Gesteine und Minerallagerstätten, Birkhäuser Basel 1948, nach Messungen von Birsch und Clark.
24. Deicha, G. A., Flüssige Einschlüsse in Granit und seiner Gangfolgschaft und deren Bedeutung. N. Jb. Min. etc. Monatshefte 1952, S. 145.
25. Torkar, O., und Paulitsch, P., Die Anwendung der Mischkörpertheorie auf Gesteinsgefüge. Kalk, Zement, Gips 1954 im Druck.