

## **Göflaner (Laaser) Marmor: Gefügeabhängigkeit wichtiger Materialeigenschaften**

Fabian Gamper<sup>1</sup>, Hannah Pomella<sup>1</sup>, Ulrich Obojes<sup>2</sup>, Andreas Saxer<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Institut für Geologie, Universität Innsbruck. F.Gamper@student.uibk.ac.at

<sup>2</sup> Amt für Geologie und Baustoffprüfung, Autonome Provinz Bozen-Südtirol

<sup>3</sup> Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften, Universität Innsbruck

### **Zusammenfassung**

Der bekannte Laaser Marmor tritt sowohl in reinweißen als auch in diversen gebänderten Varietäten auf. In den reinweißen Bereichen lässt sich oft kein Gefüge erkennen, das Gestein erscheint isotrop. Die vorliegende Studie geht der Frage nach, ob in diesen makroskopisch isotropen Bereichen trotzdem ein gerichtetes Gefüge vorliegt und wie dieses sich auf die Materialeigenschaften auswirkt. Zu diesem Zwecke wurden zwei, von der Göflaner Marmor GmbH zur Verfügung gestellte Marmorblöcke untersucht, welche jeweils sowohl einen reinweißen als auch einen gebänderten Abschnitt aufweisen. Zur Bestimmung des Gefüges in 3D wurden magnetische Untersuchungen (Anisotropie der magnetischen Suszeptibilität = AMS) durchgeführt, als Materialeigenschaften wurden der statische und der dynamische E-Modul mittels Druckversuche und Ultraschallmessungen sowie die einaxiale Druckfestigkeit ermittelt. Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass auch die reinweißen, makroskopisch isotrop erscheinenden Abschnitte der Marmors ein deutliches Gefüge aufweisen, wobei hier weniger die Schieferung (oblates Gefüge) als vielmehr die Lineation (prolates Gefüge) dominiert. Die ermittelten Materialeigenschaften weisen sowohl in den gebänderten als auch in den makroskopisch isotrop erscheinenden weißen Gesteinsabschnitten eine deutliche Gefügeabhängigkeit auf.

### **Einleitung**

Der im Vinschgau (Südtirol) in mehreren Brüchen abgebaute Marmor der Laaser Einheit des Ortler-Campo-Kristallins, zu dem die unter den Handelsnamen „Göflaner Marmor – Marmo di Covelano“ und „Laaser Marmor – Marmo di Lasa“ bekannten Natursteine gehören, zählt zu den wichtigsten und bekanntesten Marmorgesteinen in Zentraleuropa. Das Gestein besitzt eine sehr hohe Qualität in Bezug auf Reinheit, Weißegrad und Feinkörnigkeit der Textur (Unterwurzacher & Obojes, 2012). Archäologische Funde belegen, dass dieser Kalzitmarmor schon seit etwa vier Jahrtausenden genutzt wird (siehe Auflistung in Unterwurzacher, 2007). Bis heute wird das Gestein gerne von Künstlern verwendet, aber auch zu Wandverkleidungen, Bodenplatten, Fliesen, Fensterbänke usw. verarbeitet.

Der Göflaner (Laaser) Marmor weist oft eine markante graue, schwarze, grüne oder goldfarbene Bänderung auf, es gibt aber auch reinweiße Varietäten. In seiner reinweißen Ausprägung erscheint das Gestein makroskopisch oft völlig isotrop und homogen. In der vorliegenden Studie wurde überprüft, ob in makroskopisch isotropen Proben dennoch ein geregeltes Gefüge messbar ist. Des Weiteren wurde der Einfluss des Gefüges auf verschiedene Materialeigenschaften in weißen und gebänderten Marmoren analysiert. Analysiert

wurden Marmorblöcke aus dem Göflaner Mitterwandbruch (2.200 m ü. NN), die freundlicherweise von der Firma Göflaner Marmor GmbH mit Sitz in Schlanders zur Verfügung gestellt wurden. Das Gefüge der Proben wurde über die Anisotropie der magnetischen Suszeptibilität (AMS) bestimmt. Als Materialeigenschaften wurden der statische und dynamische E-Modul mittels Druckversuch und Ultraschallmessungen sowie die einaxiale Druckfestigkeit bestimmt.

### Geologische Stellung des Laaser Marmors

Das Tal Vinschgau in Südtirol zeichnet über weite Bereiche eine wichtige tektonische Linie nach, die Vinschgau Scherzone. An dieser Verwerfung wurden im Zuge der eoalpinen Gebirgsbildung süd-apulische Einheiten (hier Ötztal-Stubai Kristallin + Mesozoikum) an einer SE fallenden interkontinentalen Scherzone auf nordapulische Einheiten (hier Ortler-Campo Kristallin + Mesozoikum)

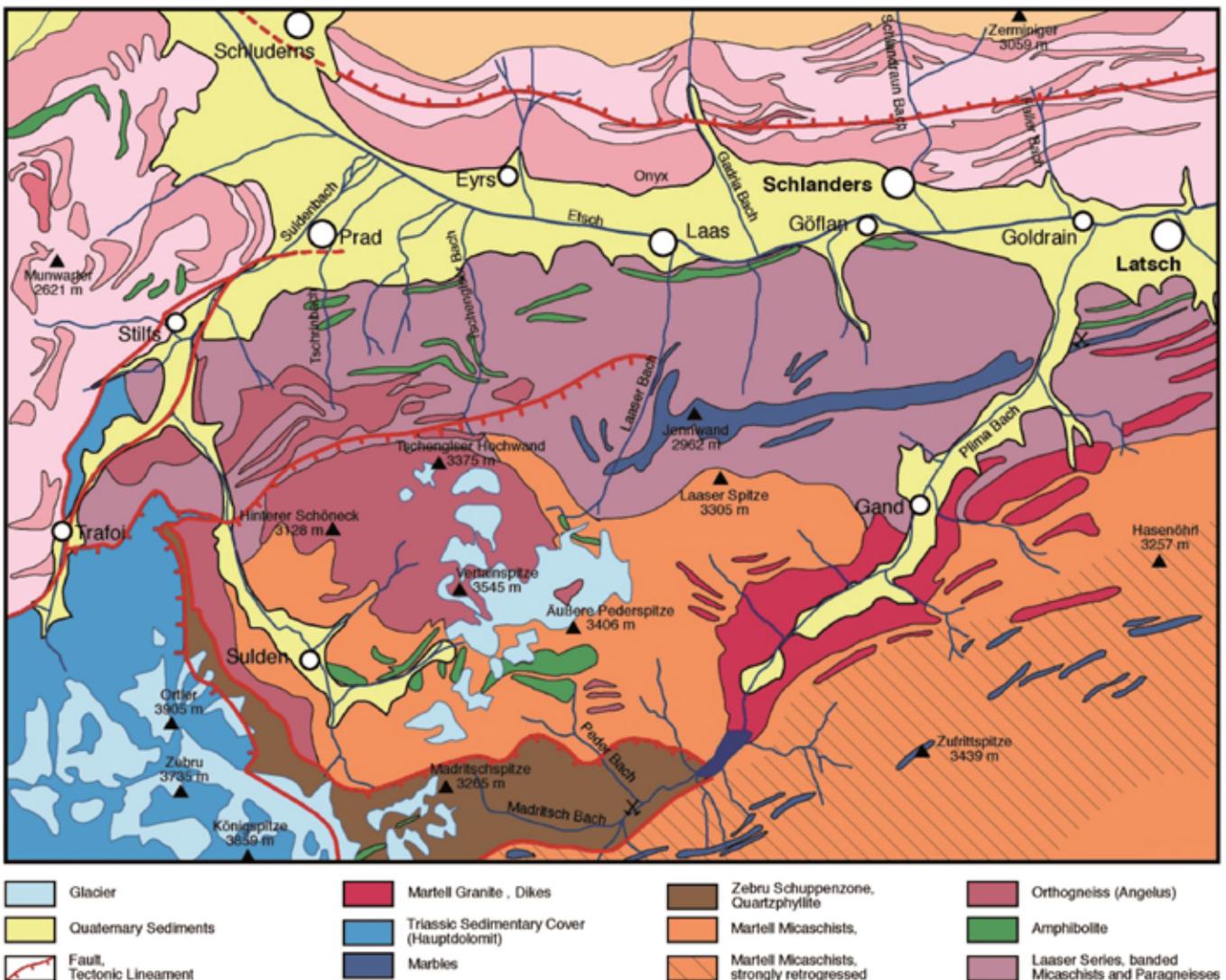


Abb. 1: Vereinfachte geologische Karte südlich des Vinschgaus (Mair et al 2007)

überschoben. Dabei kam es in der Tiefe zur Bildung von Hochdruck Gesteinen, die heute in Form der Texel Einheit an der Oberfläche vorliegen. Im Zuge der nealpinen Gebirgsbildung wurde der Deckenstapel verfault, was dazu führte, dass die Scherzone und die Hauptschieferungen der angrenzenden Einheiten heute nach N-NW einfallen (Pomella et al., 2016).

Die heute noch aktiven Marmorsteinbrüche liegen alle in der Laaser Einheit des Ortler-Campo Kristallins und somit südlich bzw. im Liegenden der Vinschgau Scherzone. Das Ortler-Campo-Kristallin kann in drei tektonische Einheiten untergliedert werden: Laaser Einheit, Pejo Einheit und die Zebbru Schuppenzone (Abb. 1; Mair et al., 2007). Unterscheidbar sind die Einheiten bezüglich ihres lithologischen, petrographischen und strukturellen Aufbaus, außerdem weisen sie eine unterschiedliche polymetamorphe P-T Entwicklung auf (Mair et al., 2007). Die Laaser Einheit stellt die tiefste Einheit des Ortler-Campo Kristallins dar und zeigt die stärkste eoalpine metamorphe Überprägung der drei Einheiten. Die variszische Metamorphose ist amphibolitfaziell, während die eoalpine Metamorphose bis in die hohe Grünschieferfazies hineinreicht (Mair et al., 2007). Die Einheit besteht aus hochdeformierten und teilweise mylonitischen Glimmerschiefern, Paragneisen und Amphiboliten sowie den in dieser Studie untersuchten Marmoren.

## Petrologie

Der Laaser Marmor ist großteils ein reiner Kalzitmarmor und besteht im Durchschnitt aus 85-98% Kalzit, 1-5% Quarz, 0-5% Muskovit, 0-5% Tremolit und opaken Mineralen. Sehr untergeordnet treten auch Dolomitmarmore auf (Martin et al., 2009). Unterwurzacher & Obojes (2012) haben die verschiedenen Vorkommen des Laaser Marmors im Detail untersucht und bieten einen Überblick über die verschiedensten petrographischen und geochemischen Parameter. Einige für die vorliegende Studie interessante Daten werden hier zusammengefasst: Die Korngröße der Marmore nimmt von Westen nach Osten hin zu, parallel zum alpidischen Metamorphosegrad. Die maximale Korngröße erreicht im Osten (bei Morter,

Eingang Martelltal) 2.5 mm, im Westen (bei Laas) zwischen 0.6 und 1.75 mm. Der Göflaner Marmor liegt bei 0.75-1.5 mm Korngröße. Laaser Marmor ist allgemein sehr kompakt und weist eine hohe Kristallinität auf. Der Weißegrad beträgt zwischen 94.63 und 97.04%, wobei der höchste Weißegrad bei den Proben des heute aktiven „Weißwasserbruches“ bei Laas gemessen wurde. Die Farbe des Gesteins reicht von weiß über weißgelb bis grünbraun. Je nach Mineralbeimengung variiert die Farbe der Bänderung: Biotit-reiche Lagen sind gelb gefärbt, Chlorit-Lagen grün, Klinozoisit-Lagen rosa und die grau-schwarzen Lagen enthalten Graphit.

## Probenmaterial

Um die Gefügeabhängigkeit der Materialeigenschaften in unterschiedlich reinen Marmoren zu überprüfen, wurden zwei Marmorblöcke ausgewählt, die jeweils einen reinweißen und einen gebänderten Bereich aufweisen und keine Faltung der Bänderung zeigten. Aus jedem Marmorblock wurden anschließend orientierte Probenkörper aus dem gebänderten Bereich sowie aus dem reinweißen Bereich geschnitten. Somit war gewährleistet, dass auch für den reinweißen Bereich die Orientierung des umgebenden und eventuell im Gestein zu erwartenden Gefüges bekannt ist.

Für die Messungen standen somit folgende Probengruppen zur Verfügung: Block1b (gebändert), Block1w (weiß), Block2b (gebändert), Block2w (weiß) (Abb. 2). Unter diesen Bezeichnungen werden die Ergebnisse der Messungen im folgenden Abschnitt beschrieben.

Da das Probenmaterial aus Blöcken stammt, also nicht anstehend war, können für die Orientierung des Gefüges keine geographischen Richtungen angegeben werden. Um die Messungen zwischen den Blöcken vergleichbar zu machen und dem Leser die räumliche Vorstellung zu erleichtern, werden die Proben im Folgenden alle so dargestellt, dass die Schieferung horizontal liegt. Ein-, zwei- und dreistrahlige Pfeile markieren die verschiedenen Flächen, wobei der einstrahlige Pfeil senkrecht zur Schieferung steht und nach oben zeigt

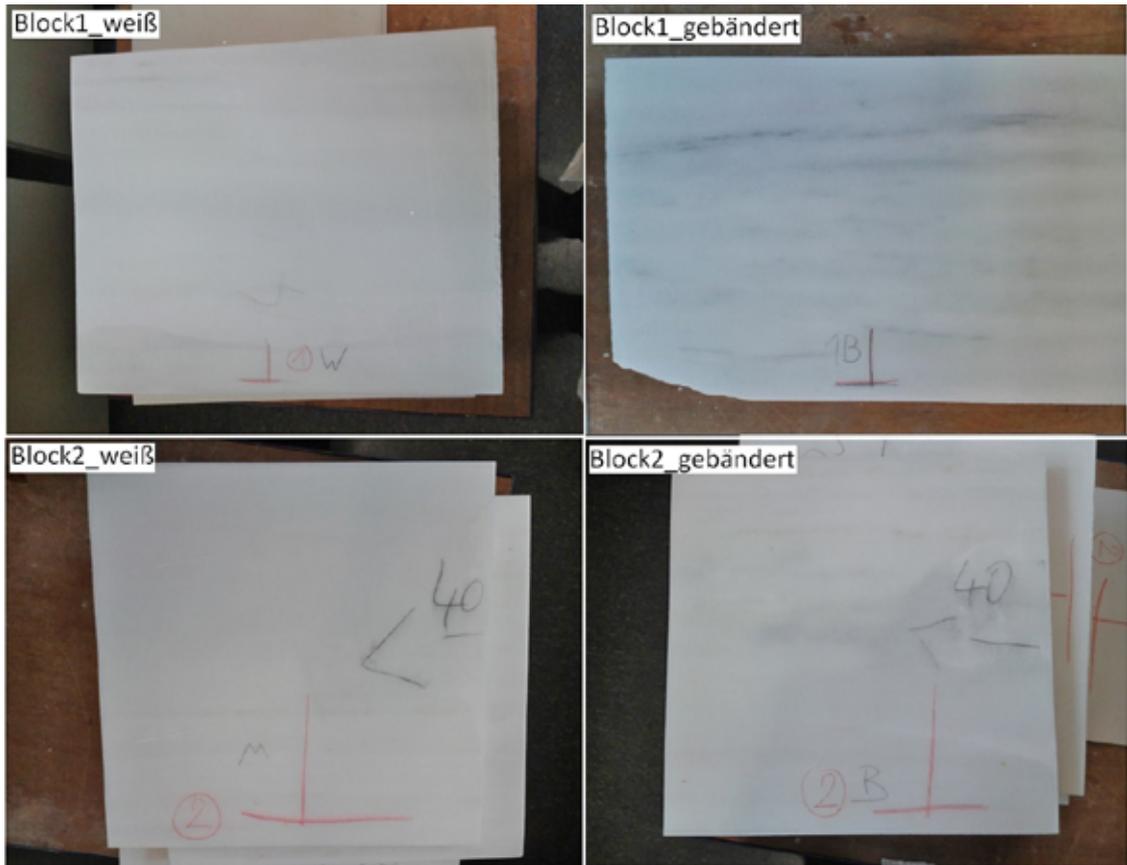


Abb.2: Die vier zur Beprobung ausgewählten Blockabschnitte

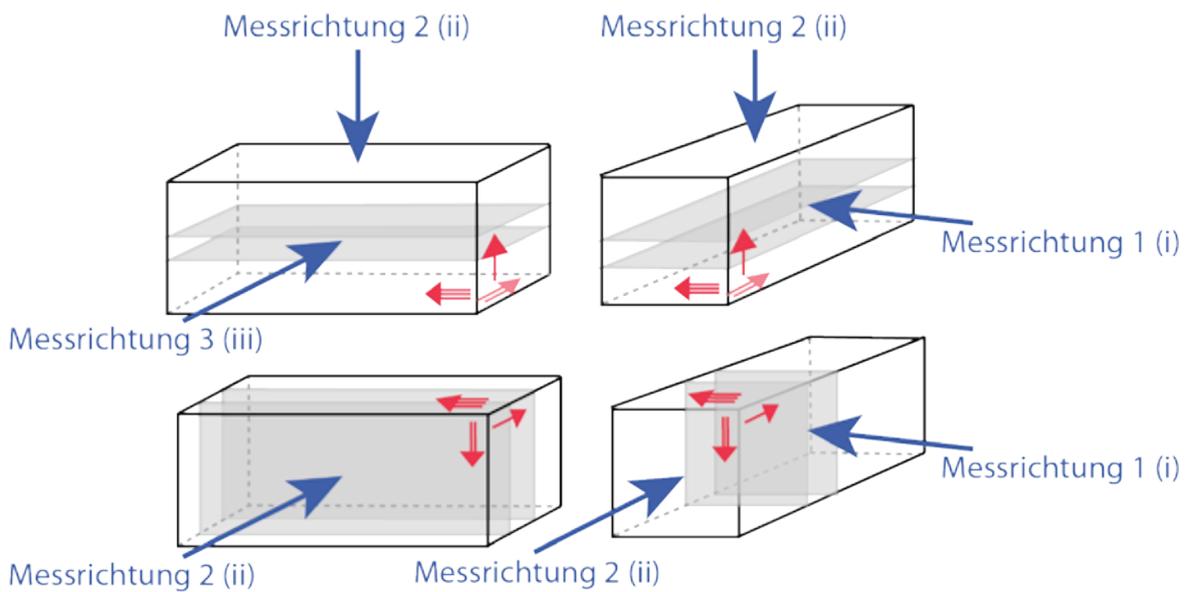


Abb.3: Beschriftung der Proben und Bezeichnung der Messrichtungen bezogen auf das Probenkoordinatensystem und die in den gebänderten Abschnitten der Blöcke erkennbare Schieferung (graue Flächen). Dieselben Bezeichnungen gelten auch für die kubischen Messkörper.

## Methodik

### Anisotropie der magnetischen Suszeptibilität (AMS)

Die magnetische Suszeptibilität beschreibt die Magnetisierbarkeit eines Minerals bzw. eines Gesteins als Aggregat von Mineralen. Die Anisotropie der magnetischen Suszeptibilität (AMS) beschreibt die Eigenschaft eines Materials, bei identischen äußeren Feldern unterschiedliche Intensitäten der induzierten Magnetisierung in verschiedene Raumrichtungen auszubilden. Die AMS kann als Ellipsoid dargestellt werden mit einer großen, mittleren und kleinen Halbachse entsprechend den Suszeptibilitäten  $K_{\max}$  ( $K_1$ ; größte),  $K_{\text{int}}$  ( $K_2$ ; mittlere) und  $K_{\min}$  ( $K_3$ ; kleinste) (Soffel, 1991).

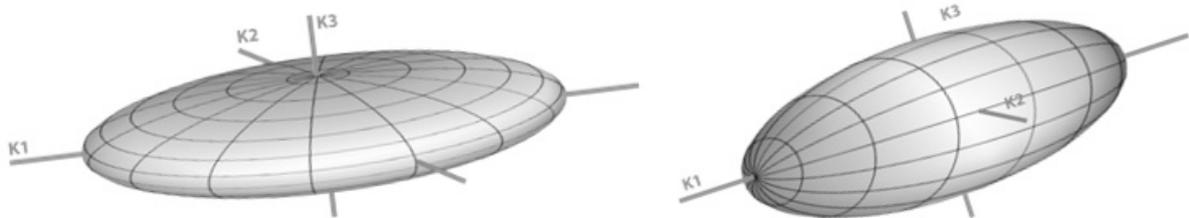


Abb.4: Abhängig vom Verhältnis der Hauptachsen zueinander entsteht ein oblates Gefüge (links,  $K_1 \geq K_2 > K_3$ ) oder ein prolates Gefüge (rechts,  $K_1 > K_2 \geq K_3$ ). Ein oblates Gefüge bedeutet die magnetische Foliation ist gut definiert, bei einem prolates Gefüge dominiert die magnetische Lineation und die magnetische Schieferung ist schwach ausgeprägt oder nicht vorhanden.

Die AMS beschreibt das (magnetische) Gefüge der Summe aller Minerale in der Probe. Bei Mineralen mit einer isotropen Magnetisierbarkeit bezogen auf die kristallographischen Achsen zeigt die AMS die Vorzugsorientierung bezogen auf die Form der Mineralkörner oder eine Anordnung in Lagen bzw. entlang einer Lineation. Einkristalle einiger Minerale zeigen in verschiedenen kristallographischen Achsen unterschiedliche Werte für die Suszeptibilität, so z.B. Kalzit. Die AMS kann in diesem Fall somit eine kristallographische Vorzugsorientierung aufzeichnen, auch wenn keine Formvorzugsorientierung besteht. Kalzit ist wie auch Dolomit, Quarz und Feldspat

ein diamagnetisches Mineral. Aber auch Graphit, der häufig in den grauen Varietäten des Laaser Marmors vorkommt, ist ein diamagnetisches Mineral. In diamagnetischen Stoffen wird durch das Anlegen eines äußeren Feldes eine linear abhängige, entgegengesetzte Magnetisierung induziert, die wieder gegen Null abnimmt, wenn das Feld entfernt wird. Die gemessene Suszeptibilität dieser Stoffe ist daher sehr klein, negativ und Temperatur-unabhängig (Soffel, 1991). Wenn das untersuchte Gestein auch eine gewisse (geringe) Menge an para- und/oder ferromagnetischen Mineralen enthält, so überlagert deren stark positives Signal das schwach negative Signal der diamagnetischen Minerale.

Bezogen auf die Kalzitmarmore der vorliegenden Studie ergeben sich somit zwei Möglichkeiten:

- Enthält das Gestein para- und ferromagnetische Akzessorien, so ist die gemessene Suszeptibilität positiv und die AMS repräsentiert die Einregelung der Trägerminerale der Suszeptibilität. Diese Minerale sind vor allem in den nicht reinweißen Varietäten zu erwarten.
- Enthält das Gestein keine para- und ferromagnetischen Akzessorien ist die gemessene Suszeptibilität schwach negativ und die AMS repräsentiert die kristallographische Vorzugsorientierung der Kalzitkristalle und somit der Grundmasse des Gesteins.

### Ultraschallmessungen (E-Modul dynamisch)

Bei der Ultraschall-Messtechnik wird die Ausbreitung von mechanischen Wellen in einem festen Medium zur Materialanalyse genutzt. Die mechanischen Wellen breiten sich im Gestein mit einer gewissen Geschwindigkeit, abhängig von der Beschaffenheit des Gesteins, aus. Die Laufzeitmessung wird dabei von Dispersion, Absorption und Anisotropie sowie Korngröße, Verfestigungsgrad, Wassergehalt, Alter der Gesteine, Porosität, Druck und Temperatur beeinflusst (Kabashi F.S., 2002).

Die Ultraschall-Messtechnik (Frequenzen zwischen 20 kHz und 1 MHz bei Naturstein) dient zur Charakterisierung von Naturgesteinen und zur Qualitätseinstufung nach ihrem Abbau. Verwendet wird die Messmethode zur Erkennung des Verwitterungszustandes, der Prüfung der Homogenität und Gefügestruktur von Gesteinen, sowie der Verortung von Rissen und Mikrorissen. Der E-Modul ist ein Maß für die Verformbarkeit bzw. Steifigkeit eines Körpers. Je höher der E-Modul desto größer die Steifigkeit eines Körpers. Mit Hilfe von Ultraschallmessungen (nach EN12504) kann der dynamische Elastizitäts-Modul bestimmt werden, ohne den Werkstoffkörper zu beschädigen. Dabei wird aus den gemessenen Laufzeiten der dynamische E-Modul berechnet. In die Berechnung gehen neben der Laufgeschwindigkeit der p-Wellen (Longitudinalwellen) auch die Dichte (Berechnung aus Volumen und Gewicht des jeweiligen Probenkörpers), Poisson-Zahl und eine Konstante (für korrekte Einheiten) mit ein.

$$E_{\text{dynam}} = c^2 * \rho * k(\mu) * 1 * 10^{-6}$$

$E_{\text{dynam}}$ : dynamischer E-Modul (N/mm<sup>2</sup>)

c: Geschwindigkeit der p-Wellen (Probenlänge in m / Laufzeit in s)

$\rho$ : Dichte (kg/m<sup>3</sup>)

$\mu$ : Poissonzahl für Natursteine (0,2-0,25)

$k(\mu)$ :  $(1+\mu)*(1-2\mu)/(1-\mu)$

Für die späteren Berechnungen der E-Module wurden die Längen und Breitenmaße der Würfel und Prismen mit der digitalen Schiebelehre gemessen und das exakte Gewicht der Probenkörper bestimmt. Die Poisson-Zahl wurde mit  $\mu=0,245$  angenommen. Die Schallköpfe des

Analysegerätes wurden manuell an die Probe gedrückt, als Kopplungsmedium zur Gesteinsprobe diente eine dünne Schicht Vaseline. Die Messungen für die vorliegende Studie wurden mit einem Gerät Pundit Lab der Firma „proceq“ bei einer Messfrequenz von 54 kHz durchgeführt. Bei jedem Block erfolgten 18 Messungen an den Gesteinswürfeln (9 für den weißen und 9 für den gebänderten Marmor). Dabei wurden in jede Richtung (Richtung 1, Richtung 2 und Richtung 3) drei Messungen durchgeführt. Bei den Prismen wurde nur in Richtung der Höhe gemessen und zwar senkrecht und parallel der Bänderung (Schieferung).

Um Messfehler möglichst auszuschließen, wurden alle Messungen von derselben Person (~ gleicher Anpressdruck) unter denselben Laborbedingungen an trockenen Probenkörpern durchgeführt.

### Bestimmung der Druckfestigkeit

Druckversuche werden zur Ermittlung der einaxialen Druckfestigkeit verwendet. Die Probenkörper werden zentrisch in eine Druckpresse eingebaut und mit einer konstanten Verformungsgeschwindigkeit in axialer Richtung bis zum Bruch belastet. Aus der Bruchlast wird die Druckfestigkeit durch Division mit der Probenfläche bestimmt.

Für die Messungen wurde eine hydraulische Druckprüfmaschine (Fa. AMSLER) mit einer Maximalast von 5000 kN verwendet. Die Belastungsgeschwindigkeit erfolgte kraftgeregelt mit einer konstanten Zunahme von 0,5 N/mm<sup>2</sup>s. Die Druckfestigkeit wurde an würfelförmigen Proben (7\*7\*7 cm) nach EN1926 gemessen. Wie bei den Ultraschallmessungen wurden auch hier 18 Messungen pro Block (9 für den weißen und 9 für den gebänderten Marmor) durchgeführt. Für jeden Blockabschnitt erfolgten drei Messungen pro Richtung, um die Werte parallel und senkrecht zur Bänderung zu vergleichen.

### Bestimmung des statischen E-Moduls

Die Bestimmung des statischen Elastizitätsmoduls erfolgte mit einer Universalprüfmaschine der Fa. SHIMADZU. Die Messungen wurden an Prismen mit Abmessung 10\*5\*5 cm (L\*B\*H) mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 0,75 N mm<sup>2</sup>s

durchgeführt. Die Prismen wurden nach planparallelem Schleifen der Stirnflächen mit einer Druckkraft bis zu einer Oberlast entsprechend 1/3 der Druckfestigkeit und einer Unterlast entsprechend 1/10 der Oberlast beansprucht. Die Belastung erfolgte in 4 Zyklen. Die bei der Druckbeanspruchung resultierende Stauchung der Proben wurde mittels zwei gegenüberliegend direkt an der Probe befestigten Aufnehmern auf DMS-Basis (DD1 Aufnehmer der Fa. Hottinger Baldwin

Messtechnik GmbH) gemessen (siehe Abb. 5) Die Messwerte wurden mittels PC aufgezeichnet und mit der Software Origin 2015 64Bit ausgewertet. Dazu wurde ein Spannungs-Verformungs-Diagramm erstellt und aus den Entlastungsstufen der E-Modul bestimmt. Beispielhaft sind die Spannungs-Verformungs-Kurven für Messungen von Proben aus Block 1b für die Belastungsrichtung 1 i und 2 ii in Abb. 6 dargestellt.



Abb.5: Messeinrichtungen zur Bestimmung des statischen und dynamischen E-Moduls sowie der Bruchlast und Druckfestigkeit. Oben: Ultraschallmessung an einem Prisma (10\*5\*5 cm) zur Bestimmung des dynamischen E-Moduls. Mitte: Probenwürfel (7\*7\*7 cm) unter der Druckprüfmaschine AMSLER (5000 kN) zur Bestimmung der Bruchlast und Druckfestigkeit. Unten: Prismatischer Probenkörper (10\*5\*5 cm) in der Prüfmaschine zur Bestimmung des statischen E-Moduls.

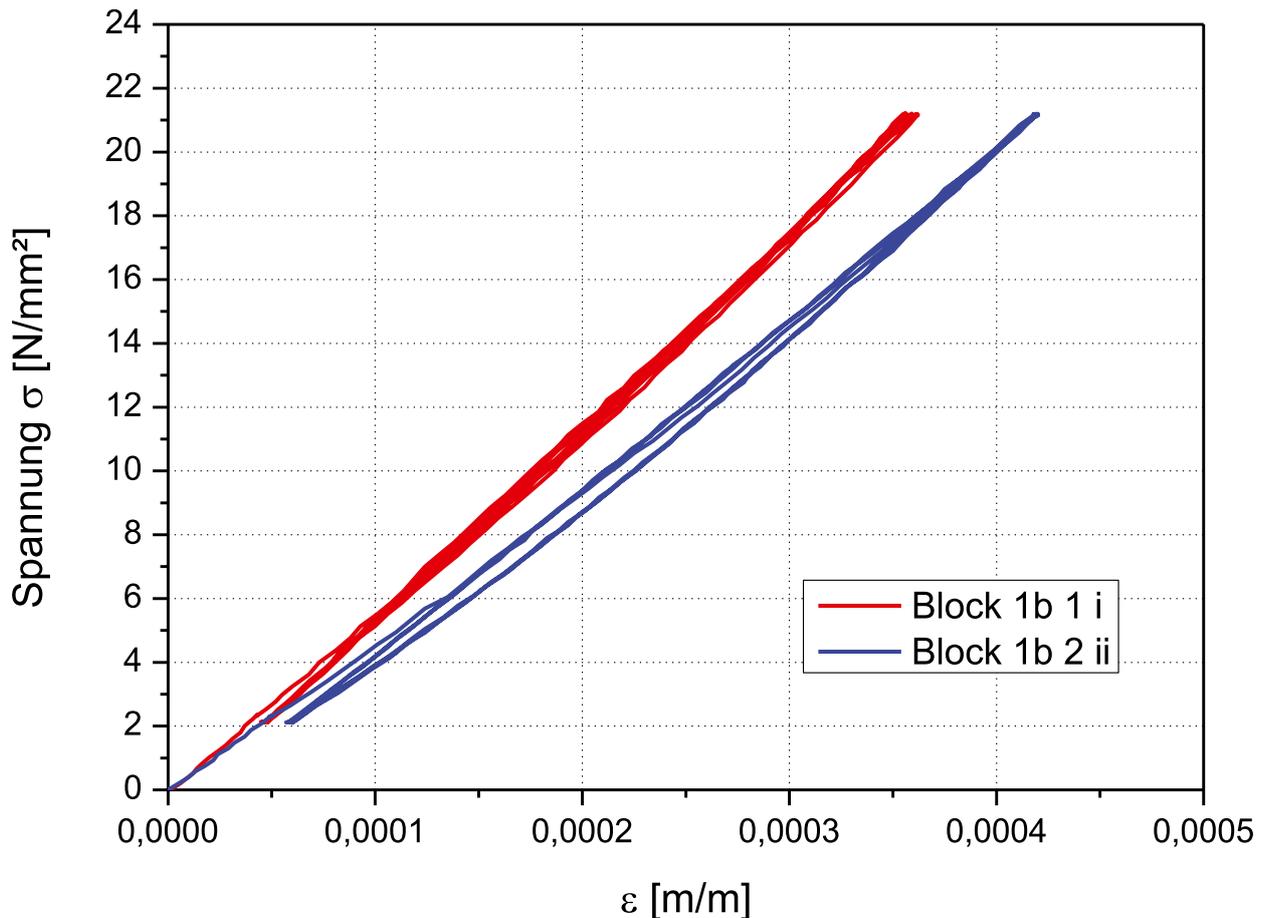


Abb. 6: Spannungs-Verformungs-Diagramm für Proben aus Block 1b mit Richtung 1 i (rote Kurve) und 2 ii (blaue Kurve)

## Messergebnisse

Im folgenden Abschnitt werden die Messergebnisse der einzelnen Proben besprochen.

### Block1b gebändert

Der Stereoplot der AMS Daten zeigt deutlich, dass alle drei Hauptachsen gut definierte Cluster bilden. Somit ist sowohl die magnetische Lineation (K1, blau) als auch der Pol der magnetischen Foliation (K3, pink) deutlich definiert. Die magnetische Foliation liegt nahezu horizontal, was der Orientierung der makroskopischen Bänderung im Probenkoordinatensystem entspricht. Die absoluten Werte der Richtungen sind nicht relevant, da es sich um kein geographisches Bezugssystem

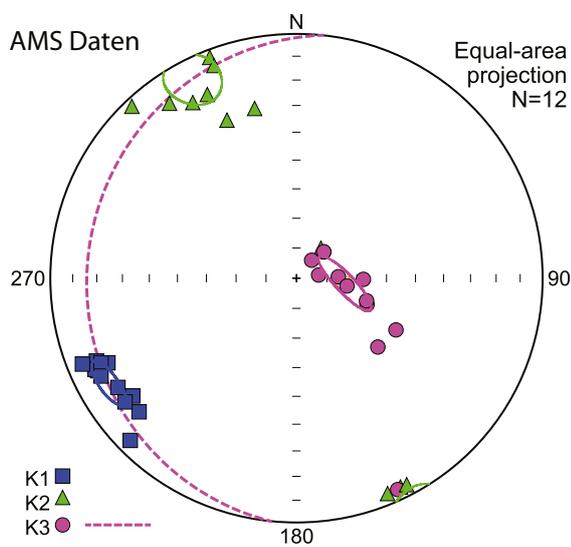
handelt. Wichtig ist in dieser Hinsicht nur der Vergleich mit der Orientierung der Hauptachsen in Block1w weiß.

Der P-Km Plot (Anisotropie - Suszeptibilität) zeigt, dass alle 12 gemessenen Würfel eine schwache, negative Suszeptibilität aufweisen. Nur mit modernsten Messgeräten können in diesem Bereich überhaupt noch aussagekräftige Messungen durchgeführt werden. Im Diagramm ist keine Korrelation zwischen Grad der Anisotropie und Suszeptibilität zu erkennen. Die negative Suszeptibilität zeigt, dass keine ferromagnetischen und so gut wie keine paramagnetischen Minerale in der Probe vorkommen. Die dunkelgraue Bänderung entsteht somit ausschließlich durch Graphit.

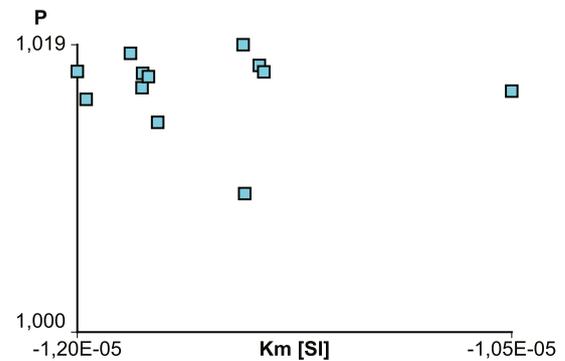
Für den dynamischen E-Modul ergeben sich sowohl für die Prismen als auch Würfel in Richtung 2 ii die niedrigsten Werte. Ebenso ist diese Tendenz für den statischen E-Modul festzustellen. Bei den Würfeln zeigt Richtung 3 iii im Gegensatz zu Richtung 1 i einen höheren dynamischen E-Modul, obwohl beide Richtungen parallel zur Schieferung orientiert sind. Der Grund dafür

könnte das Linear (K1) sein, das parallel zur Messrichtung 3 iii orientiert ist.

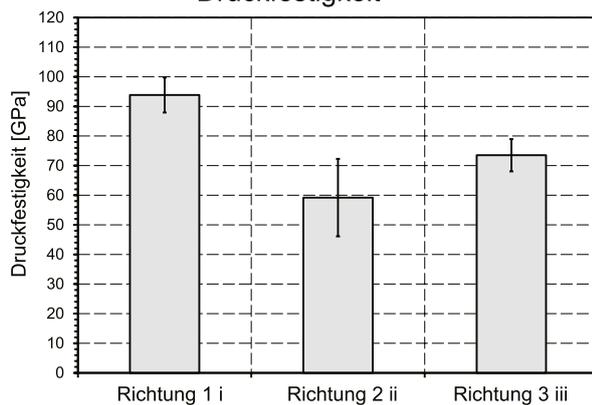
Bei der Druckfestigkeit ist in Richtung 2 ii der kleinste Wert feststellbar. Dieses Ergebnis verwundert, da eigentlich senkrecht auf die Schieferung höhere Werte zu erwarten wären. Bei den anderen drei Blockabschnitten ist dies nicht zu beobachten.



### Block 1b gebändert



### Druckfestigkeit



### Vergleich dynam./statischer E-Modul

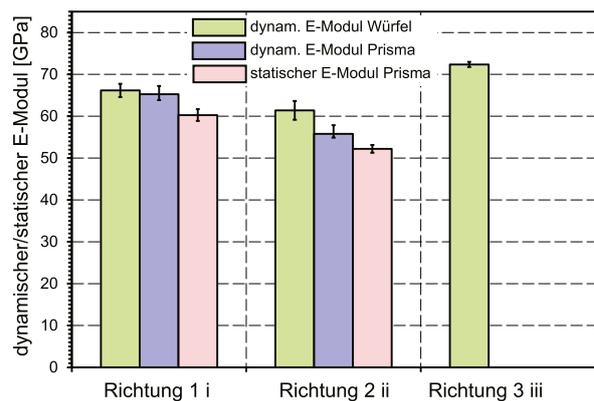


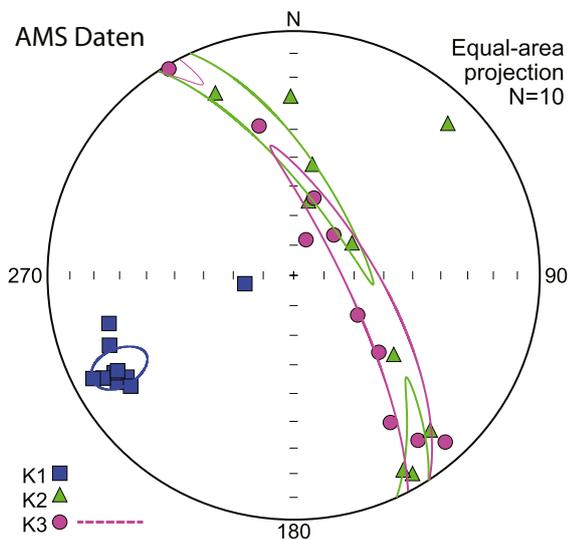
Abb. 7: Messwerte Block 1b gebändert. Oben links: Magnetisches Gefüge: Stereoplot der Orientierung der AMS Hauptachsen in den einzelnen Probewürfeln. Oben rechts: Diagramm der mittleren Suszeptibilität ( $K_m$ ) aufgetragen gegen den Grad der Anisotropie ( $P=K_1/K_3$ ) in den einzelnen Probewürfeln. Unten links: Mittelwerte der Druckfestigkeit der Proben abhängig von der Orientierung des Probenkörpers, mit Angabe der Schwankungsbreite. Unten rechts: Vergleich der Mittelwerte des dynamischen und statischen E-Moduls abhängig von der Orientierung des Probenkörpers, mit Angabe der Schwankungsbreite.

### Block1w weiß

Der Stereoplot zeigt, dass die AMS Hauptachsen K2 und K3 keine Cluster bilden, sondern entlang eines Großkreises streuen, in dessen Polpunkt die K1 Achsen plotten. In diesen Proben ist somit zwar ein magnetisches Linear aber keine magnetische Schieferung definiert. Es handelt sich um ein prolates, zigarrenförmiges Verformungs-Ellipsoid mit kreisrundem Querschnitt. Die Orientierung der K1 Achsen stimmt mit jener in Block1b gebändert sehr gut überein.

Auch in diesem Set haben alle 12 gemessenen Würfel eine schwache, negative Suszeptibilität, die zwei Cluster zu bilden scheint. Es ist keine Korrelation zwischen Grad der Anisotropie und Suszeptibilität zu erkennen, die gemessenen P-Werte sind unmerklich geringer als Block1b.

Für den dynamischen E-Modul ergeben sich keine großen Unterschiede in Abhängigkeit der Richtungen. Tendenziell zeigt die Richtung 2 ii, wie bei Block 1b gebändert, die niedrigsten



### Block 1w weiß

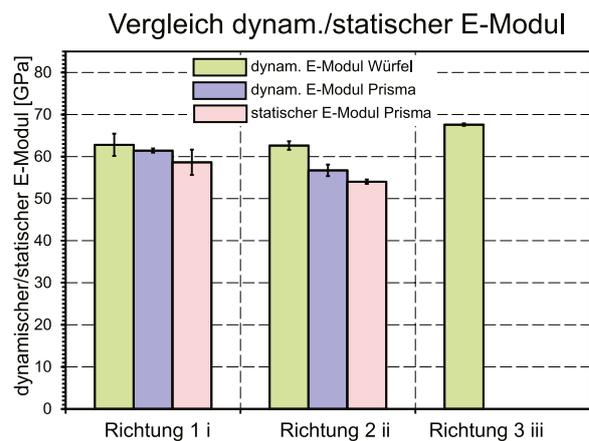
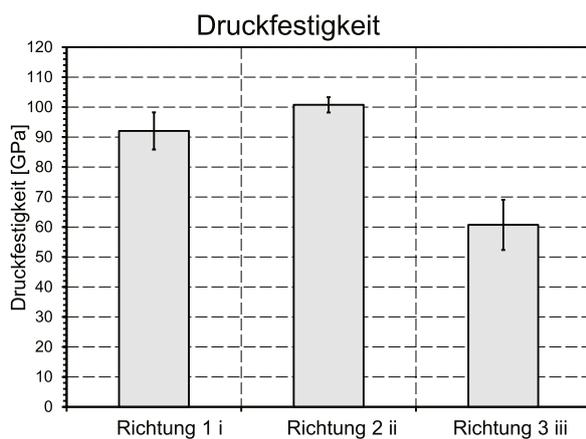
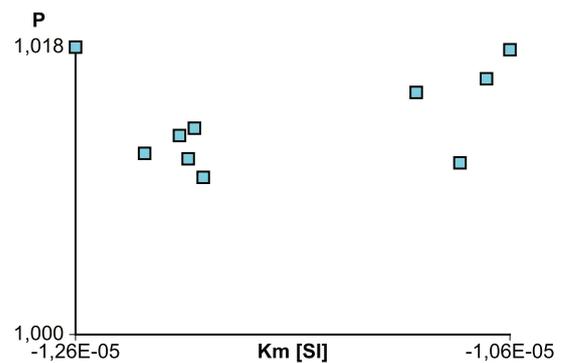


Abb. 8: Messwerte Block1wweiß. Oben links: Magnetisches Gefüge: Stereoplot der Orientierung der AMS Hauptachsen in den einzelnen Probewürfeln. Oben rechts: Diagramm der mittleren Suszeptibilität (Km) aufgetragen gegen den Grad der Anisotropie ( $P=K1/K3$ ) in den einzelnen Probewürfeln. Unten links: Mittelwerte der Druckfestigkeit der Proben abhängig von der Orientierung des Probenkörpers, mit Angabe der Schwankungsbreite. Unten rechts: Vergleich der Mittelwerte des dynamischen und statischen E-Moduls abhängig von der Orientierung des Probenkörpers, mit Angabe der Schwankungsbreite.

dynamischen E-Module. Gleiches ist auch für den statischen E-Modul festzustellen.

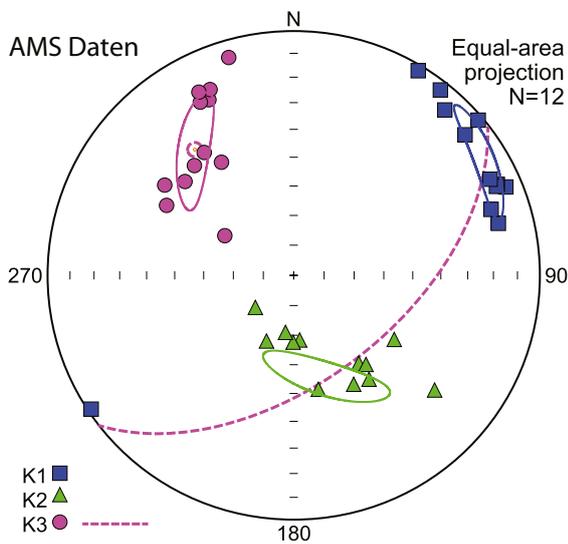
Bei der Druckfestigkeit ergeben sich für die Richtung 1 i und 2 ii sehr hohe Werte, während in Richtung 3 iii ein deutlicher Abfall der Druckfestigkeit erkennbar ist.

### Block2b gebändert

Der Stereoplot zeigt, dass alle drei AMS Hauptachsen Cluster bilden, allerdings sind diese nicht

so gut definiert wie in Block1b. Außerdem ist die magnetische Foliation im Gegensatz zu Block1b hier nicht horizontal gelagert, obwohl die Proben bei der Probenahme nach der makroskopischen Bänderung orientiert wurden. Eine nochmalige Begutachtung des Probenmaterials zeigte, dass die Bänderung in Block2b nicht streng planar ausgebildet ist wie in Block1b sondern eher wolkig.

Der P-Km Plot zeigt eine schwache, negative Suszeptibilität ohne Korrelation zum Grad der



### Block 2b gebändert

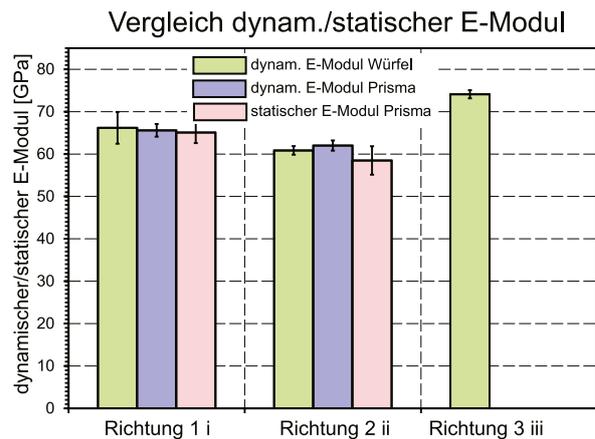
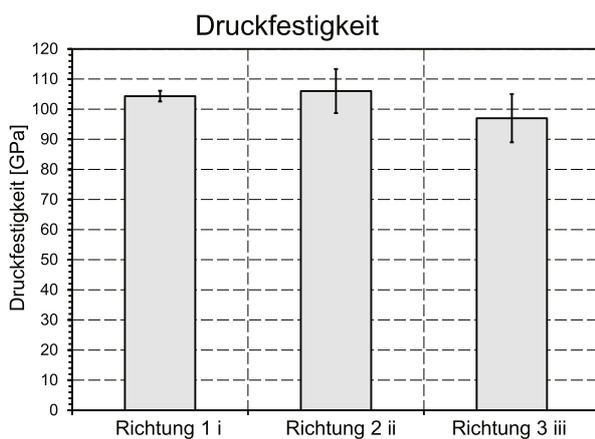
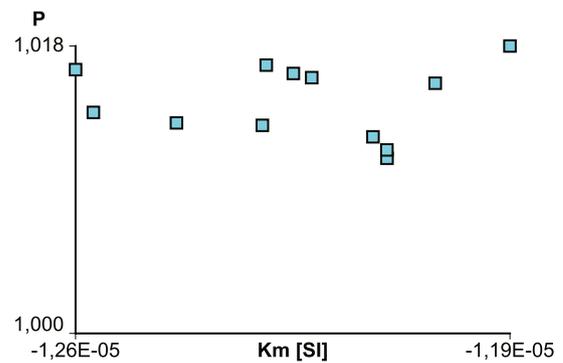


Abb. 9: Messwerte Block2b gebändert. Oben links: Magnetisches Gefüge: Stereoplot der Orientierung der AMS Hauptachsen in den einzelnen Probewürfeln. Oben rechts: Diagramm der mittleren Suszeptibilität (Km) aufgetragen gegen den Grad der Anisotropie ( $P=K1/K3$ ) in den einzelnen Probewürfeln. Unten links: Mittelwerte der Druckfestigkeit der Proben abhängig von der Orientierung des Probenkörpers, mit Angabe der Schwankungsbreite. Unten rechts: Vergleich der Mittelwerte des dynamischen und statischen E-Moduls abhängig von der Orientierung des Probenkörpers, mit Angabe der Schwankungsbreite.

Anisotropie. Die Messwerte liegen im selben Bereich wie bei Block1b.

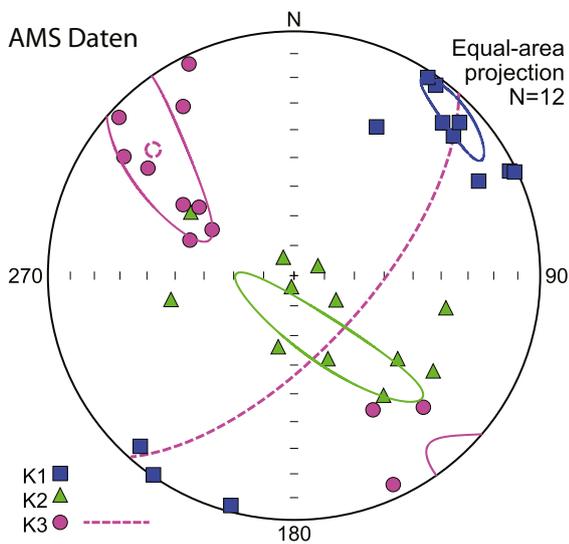
Beim dynamischen E-Modul werden sowohl bei Prisma als auch Würfel für die Richtungen 1 i und 2 ii ähnliche Werte ermittelt. Auch die statischen E-Module dieser Richtungen zeigen dieselbe Tendenz. Den höchsten Wert weist die Richtung 3 iii auf, wie dies bereits bei Block 1b gebändert beobachtet wurde.

Bei der Druckfestigkeit ergeben sich nur relativ geringe Unterschiede bei den drei Richtungen.

### Block2w weiß

Analog zu Block1 ist auch hier im weißen Anteil des Blockes die magnetische Foliation schlechter definiert als im gebänderten Anteil, allerdings fällt der Unterschied bei weitem nicht so markant aus. Der Vertrauensbereich der Messwerte für K2 und K3 zeigt die Andeutung einer Großkreisverteilung senkrecht zum Linear.

Die Suszeptibilität ist auch in diesem Block schwach negativ, streut aber etwas mehr als in den vorherigen Probensets. Es zeigt sich eine



### Block 2w weiß

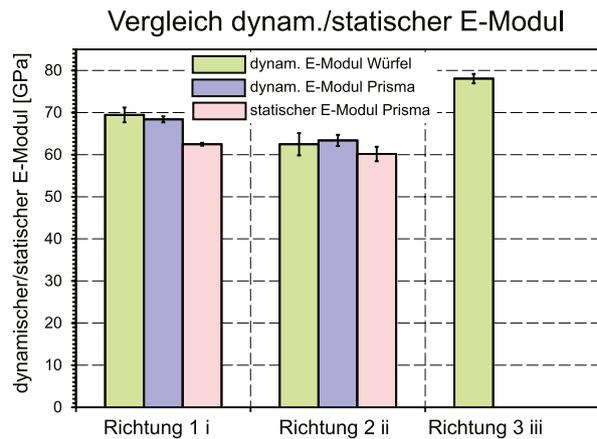
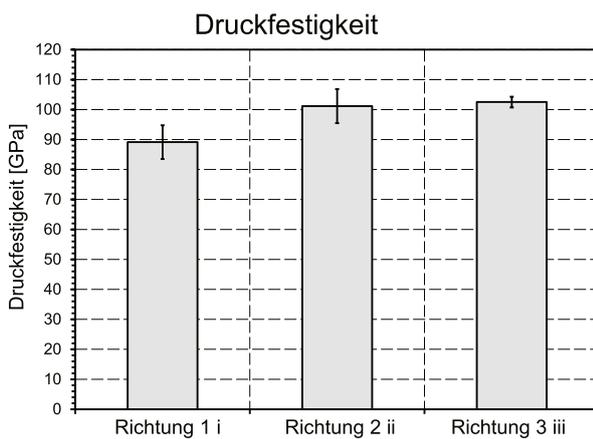
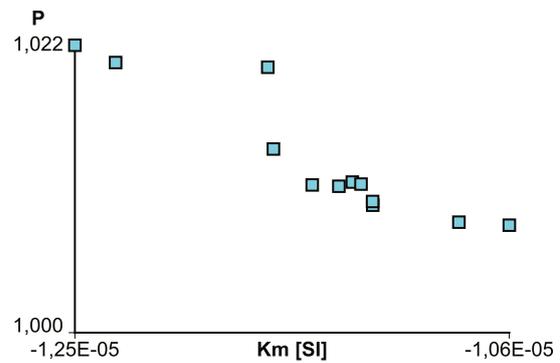


Abb. 10: Messwerte Block2w weiß. Oben links: Oben links: Magnetisches Gefüge: Stereoplot der Orientierung der AMS Hauptachsen in den einzelnen Probewürfeln. Oben rechts: Diagramm der mittleren Suszeptibilität ( $K_m$ ) aufgetragen gegen den Grad der Anisotropie ( $P=K_1/K_3$ ) in den einzelnen Probewürfeln. Unten links: Mittelwerte der Druckfestigkeit der Proben abhängig von der Orientierung des Probenkörpers, mit Angabe der Schwankungsbreite. Unten rechts: Vergleich der Mittelwerte des dynamischen und statischen E-Moduls abhängig von der Orientierung des Probenkörpers, mit Angabe der Schwankungsbreite.

deutliche Korrelation zwischen Grad der Anisotropie und Suszeptibilität, wobei anzunehmen ist, dass die geringen P-Werte bei den sehr schwachen Proben auf höhere Messfehler zurückzuführen sind.

Die Schieferungsfläche fällt steil Richtung „Südosten“ ein. Sie ist nur leicht und undeutlich vorhanden. Allgemein ist in Block2 die Schieferung verschieden stark ausgeprägt und zeigt ein wolkiges Erscheinungsbild. Daher ist auch die Streuung der Werte zu erklären.

Die magnetische Lineation zeigt sich ausgeprägter als die Schieferung und fällt Richtung „Nordosten“ flach ein. Die Werte des Linears sind mit denen von Block2b gebändert (Abb. 9) vergleichbar.

Der dynamische E-Modul ergibt für Würfel und Prisma sehr ähnliche Werte, wobei diese in Richtung 2 ii etwas niedriger sind. Deutlich höher ist der dynamische E-Modul in Richtung 3 iii. Der statische E-Modul ist ähnlich dem dynamischen, zeigt allerdings keinen großen Unterschied zwischen Richtung 1 i und 2 ii.

Bei der Druckfestigkeit ergeben sich ähnliche Werte für die Richtungen 2 ii und 3 iii, während in Richtung 1 i der niedrigste Wert gemessen wurde.

## Conclusio

Basierend auf den magnetischen Gefügeanalysen liegt der Unterschied zwischen Block1b und Block1w ausschließlich im Fehlen einer definierten magnetischen Foliation ( $K_2=K_3$ ). Das stimmt mit dem Fehlen der makroskopischen Bänderung in Block1w überein. Die magnetische Lineation unterscheidet sich in den beiden Teilen von Block1 hingegen nicht. Es ist anzunehmen, dass die magnetische Lineation durch die kristallographische Vorzugsorientierung der Kalzit-Kristalle dominiert wird, während die magnetische Foliation die Graphitbänderung nachzeichnet.

Die magnetischen Gefügeanalysen zeigen, dass das Gefüge, vor allem die Foliation, in Block2

nicht so deutlich ausgeprägt ist wie in Block1. Auch makroskopisch erscheint die Bänderung in Block2 eher wolkig. Die mittlere magnetische Foliation liegt in allen Probenkörpern dieses Blockes nicht horizontal, sondern ist deutlich geneigt. Die Unterschiede im Gefüge zwischen Block2b und 2w sind geringer als innerhalb von Block1. Letzterer zeigt im weißen Bereich überhaupt keine Foliation. Dieser Bereich wirkt auch makroskopisch reiner.

Wie anhand der Messergebnisse ersichtlich, werden die Materialeigenschaften teilweise vom Gefüge beeinflusst. Der dynamische E-Modul ist in allen Blockabschnitten senkrecht zur Schieferung (in Richtung 2 ii) am geringsten. Diese Ergebnisse sind auch beim statischen E-Modul zu beobachten. Bei den Würfeln zeigt Richtung3 iii im Gegensatz zu Richtung1 i höhere dynamische E-Module. Der Grund dafür könnte in der Ausrichtung des Linears liegen, welches in Richtung3 iii orientiert ist.

Bei der Druckfestigkeit ist zu beobachten, dass mit Ausnahme von Block1b gebändert die höchsten Werte in Richtung 2 ii gemessen werden. Für die Druckfestigkeiten in den beiden anderen Richtungen lassen sich allerdings keine eindeutigen Tendenzen ableiten. Das Linear scheint sich somit nicht auf die Druckfestigkeit auszuwirken. Die Druckfestigkeit liegt in Block2 insgesamt höher als in Block1. Das kann darauf zurückgeführt werden, dass laut AMS Analyse die Probenkörper in Block2 etwas schräg zur Orientierung der Hauptachsen des Gefüges geschnitten wurden. Die Druckrichtung war somit nie genau senkrecht oder genau parallel zur Foliation / Linear sondern immer etwas geneigt.

Abschließend kann noch hervorgehoben werden, dass der Unterschied für den dynamischen und statischen E-Modul zwischen reinweißen und gebänderten Blockabschnitten desselben Blockes gering ist, während die Druckfestigkeit speziell für Block1 größere Unterschiede aufweist. Ähnliche Tendenz ergibt sich auch aus dem Vergleich der E-Module und Druckfestigkeiten der Blöcke 1 und 2. Eine Ursache dafür scheint die in Block2 nicht planar sondern eher wolkig ausgebildete Bänderung zu sein.

## Literaturverzeichnis

- bwkETHZ, rmf&stm, (2002): Skript Werkstoffeigenschaften FS10.PDF, 72 Seiten, [http://www.ifb.ethz.ch/education/bachelor\\_werkstoffe](http://www.ifb.ethz.ch/education/bachelor_werkstoffe)
- De Wall H. (2005): Die Anisotropie der magnetischen Suszeptibilität – eine Methode zur Gefügeanalyse, Zeitschrift der deutschen geologischen Gesellschaft 155(2-4), S. 287-298
- Kabashi F.S.(2002): Untersuchungen der Gefügeanisotropie von Carrara Marmor und deren Einfluss auf die Verwitterung. Dissertation, Fakultät für Geowissenschaften der Ludwig-Maximilians-Universität München. 142 Seiten
- Mair V., Nocker C., Tropper P. (2007): Das Ortler-Campo Kristallin in Südtirol, Mitteilungen der Österreichischen Mineralogischen Gesellschaft 153, S. 219-240
- Martin S., Montresor L., Mair V., Pellegrini G.B., Avanzini M., Fellin G., Gambillara R., Tumiati S., Santuliana E., Monopoli B., Gaspari D., Sapigni M., Surian N., (2009): Erläuterungen zur geologischen Karte von Italien im Maßstab 1: 50.000 Blatt 025 RABBI, servizio geologico d'Italia, organo cartografico dello Stato
- Pomella, H., Flöss, D., Speckbacher, R., Tropper, P., & Fügenschuh, B. (2016): The western end of the Eoalpine High-Pressure Belt (Texel unit, South Tyrol/Italy). *Terra Nova*, 28(1), 60-69
- Soffel Chr. H. (1991): Paläomagnetismus und Archäomagnetismus. Springer Verlag Berlin Heidelberg. 275 Seiten
- Tarling, D., & Hrouda, F. (Eds.) (1993): Magnetic anisotropy of rocks. Springer Science & Business Media. 221 Seiten
- Tipler P.A.(1994): Physik, Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg-Berlin-Oxford, 1.522 Seiten
- Unterwurzacher M., (2007): Tiroler Marmorbaue und bedeutende Vorkommen, Veröffentlichungen des Tiroler Landesmuseums Ferdinandum, 87/2007, 205-220
- Unterwurzacher M. & Obojes U., (2012): White marble from Laas (Lasa), South Tyrol – its occurrence, use and petrographic-isotopical characterisation. *Austrian Journal of Earth Sciences*, Volume 105/3, 26-37