

H.

KTB Oberpfalz VB –

Erste Ergebnisse felsmechanischer Indexversuche
bis 1998 m

Th. Röckel
O. Natau

KTB-Report	89-2	H1 - H22	10 Abb.	Hannover 1988
------------	------	----------	---------	---------------

H. Tiefbohrung KTB Oberpfalz VB - erste Ergebnisse felsme-
chanischer Indexversuche bis 1998 m

Röckel, Th., * Natau, O.**)

Inhaltsverzeichnis		Seite
H.	Felsmechanik	
H.1	Allgemeines	H 3
H.2	Prüfkörperauswahl	H 2
H.3	Prüfkörpergeometrie	H 4
H.4.0	Prüfkörperherstellung	H 5
H.4.1	Prüfkörperherstellung für Punktlastfestig- keitsversuche	H 5
H.4.2	Prüfkörperherstellung zur Bestimmung der indirekten Zugfestigkeit	H 5
H.4.3	Prüfkörperherstellung für einaxiale Druck- festigkeitsversuche	H 5
H.5.0	Prüfmaschinenbeschreibung	H 6
H.5.1	Gerät zur Bestimmung der Punktlast- festigkeit	H 6
H.5.2	Prüfmaschine zur Bestimmung der indirekten Zugfestigkeit	H 6
H.5.3	Prüfmaschine zur Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit	H 6

H.6.0	Versuchsablauf	H 6
H.6.1	Punktlastfestigkeitsversuche	H 6
H.6.2	Indirekter Zugversuch (Brazilian Test)	H 7
H.6.3	Einaxiale Druckfestigkeitsversuche	H 8
H.7.0	Versuchsauswertung	H 8
H.7.1	Punktlastfestigkeitsversuche	H 9
H.7.2	Indirekter Zugfestigkeitsversuche	H 10
H.7.3	Einaxiale Druckfestigkeitsversuche	H 10
H.8.0	Versuchsergebnisse	H 10
H.8.1	Punktlastfestigkeitsversuche	H 10
H.8.1.1	Granat-Amphibolite	H 11
H.8.1.2	Metagabbros	H 11
H.8.1.3	Gneise	H 11
H.8.2	Indirekte Zugfestigkeitsversuche	H 12
H.8.2.1	Granat-Amphibolite	H 12
H.8.2.2	Metagabbros	H 15
H.8.2.3	Gneise	H 15
H.8.3	Einaxiale Druckfestigkeitsversuche	H 17
H.8.3.1	Granat-Amphibolite	H 17
H.8.3.2	Metagabbros	H 17
H.8.3.3	Meta-Ultramafitit	H 19
H.8.3.4	Gneise	H 19
H.9.0	Korrelation der Punktlastfestigkeiten und der indirekten Zugfestigkeit	H 21
H.10	Literatur	H 22

Anschriften der Verfasser*)

* KTB-Feldlabor, D-8486 Windischeschenbach

** o. Prof. Dr.-Ing. Otfried Natau
Lehrstuhl für Felsmechanik
Institut für Boden- und Felsmechanik
Universität (TH) Fridericiana Karlsruhe
7500 Karlsruhe 1

H.1 Allgemeines

Die Kenntnis von felsmechanischen Kennwerten ist für eine ganze Reihe von Problemstellungen von großer Bedeutung. Sie sind zur Lösung bohrtechnischer Probleme ebenso notwendig wie zur Beurteilung der Bohrlochstandsicherheit, sowie zur Bestimmung des Spannungszustandes in der Erdkruste. Sie erleichtern aber auch die Interpretation von mineralogisch-petrographischen und geophysikalischen Befunden.

Wegen der rasch wechselnden Lithologie und des unterschiedlichen Erhaltungszustands der Bohrkerne ist es nicht möglich, bohrbegleitend kontinuierliche Laborversuche unter Druck- und Temperaturbedingungen der oberen Erdkruste im Feldlabor durchzuführen. Im Feldlabor sollen bohrbegleitend einfache festigkeitsmechanische Index-Versuche durchgeführt werden. Da bis zum jetzigen Zeitpunkt im Feldlabor noch keine Prüfmaschine aufgestellt werden konnte, werden seit dem Herbst 1988 die festigkeitsmechanischen Untersuchungen am Lehrstuhl für Felsmechanik der Universität Karlsruhe durchgeführt.

Bislang wurden folgende Index-Versuche durchgeführt:

- Punktlastfestigkeitsversuche
- Indirekte Zugversuche (Brazilian-Test)
- Einaxiale Druckfestigkeitsversuche.

H.2 Prüfkörperauswahl

Erste Untersuchungen wurden für den Teufenbereich bis 2000 m durchgeführt, wobei versucht wurde, über lithologische Homogenbereiche ein einheitliches Untersuchungsrastrer zu legen. Zusätzlich wurden Prüfkörper bei Änderung der Lithologie gewonnen.

Aus einigen Bereichen liegen keine oder nur wenige Ergebnisse vor, weil eine Prüfkörpergewinnung nicht oder nur in stark eingeschränktem Umfang möglich war. Dies sind zum einen die Teufenabschnitte, in denen Richtbohrarbeiten stattfanden, zum anderen sind dies die ersten 480 m, in denen mit dem Rotary-Verfahren gebohrt wurde. Hier war der Kerngewinn und der Kernerhalt deutlich schlechter als in den Kernstrecken, in denen mit dem bergmännischen Seilkernverfahren mit schnell-drehender Diamantbohrkrone gebohrt wurde. Bei etwa 1650 m befindet sich eine Zone, die so stark alteriert ist bzw. so stark tektonisch beansprucht war, daß aus diesem Teufenbereich keine Prüfkörper gewonnen werden konnten.

H.3 Prüfkörpergeometrie

Um die Meßwerte sinnvoll miteinander vergleichen zu können, ist es wegen des Einflusses der Prüfkörpergeometrie auf das Untersuchungsergebnis notwendig, mit gleichen geometrischen Verhältnissen der Prüfkörper zu arbeiten. In der Vorbohrung wurden bislang häufig stark foliierte Gesteine durchteuft. Die Festigkeitsparameter sind bei diesen Gesteinen stark richtungsabhängig. Um diese Richtungsabhängigkeit zu erfassen, werden aus Bohrkernen orientiert Plugs von 50 mm Durchmesser gebohrt und untersucht (Abb. 1).

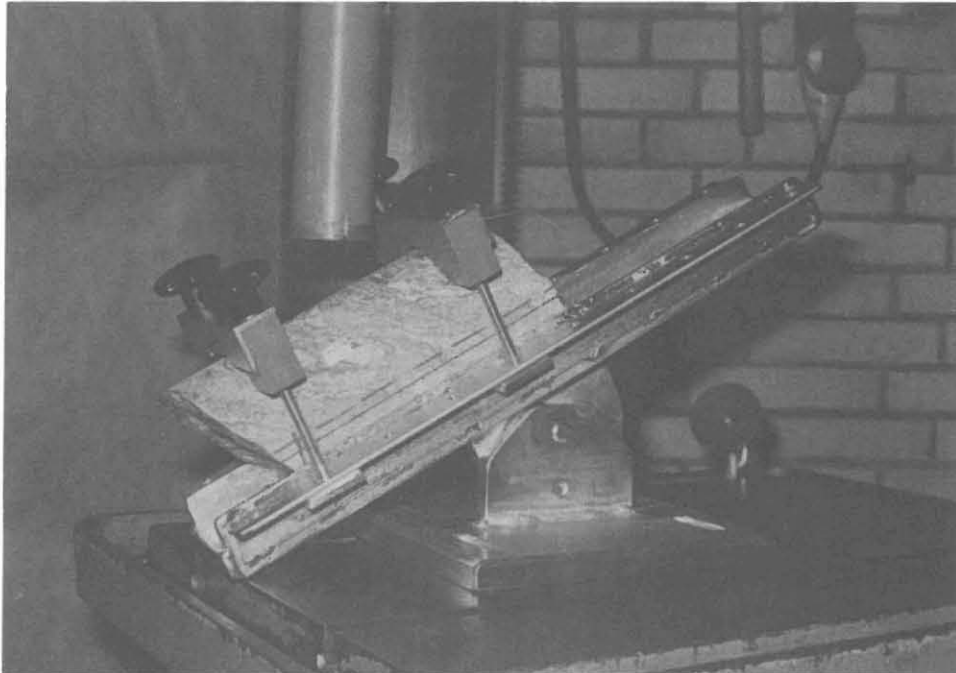


Abb.1 Halterung zum orientierten Kernen von Plugs

Der Durchmesser (D) der Kerne, aus denen orientierte Plugs gebohrt werden, beträgt 94 mm, so daß es bei mittelsteil bis steil einfallender Foliation nur möglich ist, relativ kurze Probenkörper von etwa 50 mm Höhe (H) herzustellen. Nach den Empfehlungen der Internationalen Gesellschaft für Felsmechanik (ISRM) soll das Höhen-/Durchmesser-Verhältnis (H/D-Verhältnis) bei einaxialen Druckversuchen nicht kleiner als 2:1 sein (ISRM 1979). Es ist aber wenig sinnvoll den Prüfkörperdurchmesser beliebig zu verkleinern, nur um ein H/D-Verhältnis $> 2:1$ zu erreichen, weil der Prüfkörperdurchmesser mindesten das 10-fache des größten Einzelkorndurchmessers betragen soll (ISRM 1979).

Beim Durchteufen von grobkristallinen oder mobilisatreichen Gesteinen können die Einzelkörner einige Zentimeter Durchmesser erreichen. Aus diesen Gründen scheint es sinnvoll

zu sein, mit einem H/D-Verhältnis von 1:1 und einem Prüfkörperdurchmesser und einer Prüfkörperhöhe von 94 mm für die Bohrkerne zu arbeiten. Für die Plugs betragen Höhe und Durchmesser je 50 mm und das H:D-Verhältnis ebenfalls 1:1.

Die Messwerte für diese kurzen gedrunghenen Prüfkörper müssen nach den ISRM Empfehlungen von 1979 korrigiert werden. Dies bedeutet, daß die Messwerte als Indexwerte zu betrachten sind, die untereinander aber gut miteinander verglichen werden können.

H.4.0 Prüfkörperherstellung

H.4.1 Prüfkörperherstellung für Punktlastfestigkeitsversuche

Bei Versuchen zur Ermittlung der Punktlastfestigkeit kann i. a. auf eine gesonderte Prüfkörperherstellung verzichtet werden, weil für den Punktlastversuch Bruchstücke von Kernmaterial ausreichen.

H.4.2 Prüfkörperherstellung zur Bestimmung der indirekten Zugfestigkeit (Brazilian-Test)

Die Zugfestigkeit an Gesteinsproben wird im indirekten Zugversuch (Brazilian-Test) an geraden kreiszylindrischen Prüfkörpern ermittelt, wobei die Probenhöhe mindestens einen halben, höchstens einen ganzen Durchmesser betragen soll. Üblicherweise wird das H/D-Verhältnis mit 0,5 gewählt, weil in diesem Fall die geringste Menge Kernmaterial zerstört wird. Die Endflächen werden rechtwinklig zur Kernachse gesägt. Eine Bearbeitung der Endflächen ist nicht nötig.

H.4.3 Prüfkörperherstellung für Einaxiale Druckversuche

Zu Beginn der Untersuchungen stand noch keine Vorrichtung zum orientierten Kernen von Plugs zur Verfügung. Diese wurde in der Zwischenzeit geplant, gebaut und erfolgreich getestet. Um einen raschen Überblick über die einaxialen Druckfestigkeiten der lithologischen Einheiten zu bekommen, wurden unkalotierte Kerne mit 94 mm - 100 mm Durchmesser geprüft. Die zylindrischen Körper wurden auf eine dem einfachen Durchmesser entsprechende Höhe abgesägt. Die Endflächen wurden planparallel und glatt geschliffen. Die Unebenheiten der geschliffenen Endflächen dürfen bei Gesteinen mit mittlerer Verformbarkeit nicht größer als 0,05 mm sein, bei gering verformbaren Gesteinen (Amphibolite, Metagabbros) nur 0,02 mm. Dies gilt auch für die orientiert gebohrten Plugs, die zur Untersuchung des Anisotropieeinflusses dienen.

H.5.0 Prüfmaschinenbeschreibung

H.5.1 Gerät zur Bestimmung der Punktlastfestigkeit

Das Versuchsgerät besteht aus einem steifen Rahmen mit der erforderlichen Belastungs- und Messeinrichtung. Zur Erzeugung der Prüfkraft dient ein hydraulischer Stempel mit geringer Reibung, so daß die Messung der Prüfkraft über das hydraulische System möglich ist. Der Druck wird mit einer hydraulischen Handpumpe aufgebracht. Die Kraftmessung erfolgt durch Manometerablesung. Die Manometer sind mit Schleppzeiger versehen, an denen die maximale Kraft abgelesen werden kann.

H.5.2 Prüfmaschine zur Bestimmung der indirekten Zugfestigkeit

Die Gesteinszugfestigkeit wird im indirekten Zugversuch (Brazilian-Test) ermittelt. Diese Versuche werden momentan am Lehrstuhl für Felsmechanik der Universität Karlsruhe durchgeführt. Verwendet wird eine 200-kN-Prüfmaschine der Güteklasse 1. Zur Aufbringung der Streifenlasten werden Stahlplatten mit kreiszylindrischen Belastungsflächen verwendet (Abb. 2). Die Kraft kann an einem Schleppzeiger abgelesen werden.

H.5.3 Prüfmaschine zur Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit

Die einaxialen Druckfestigkeitsversuche werden z. Zt. ebenfalls am Lehrstuhl für Felsmechanik in Karlsruhe durchgeführt. Verwendet wird eine servogeregelte, prozessrechnergesteuerte 5-MN-Prüfmaschine der Güteklasse 1. Die Prüfkörper werden axial zwischen zwei gehärteten Druckplatten belastet. Die obere Druckplatte ist kugelig gelagert, um geringe Abweichungen von der Planparallelität auszugleichen. Dies bewirkt eine endflächennormale Krafteinleitung in den Prüfkörper. Für das Feldlabor ist eine servogeregelte, prozessrechnergesteuerte 1-MN-Prüfmaschine vorgesehen.

H.6.0 Versuchsablauf

H.6.1 Punktlastfestigkeitsversuche

Der Prüfkörper wird in das Versuchsgerät eingespannt und der Lastpunktstand gemessen. Danach erfolgt die Belastung durch gleichmäßiges betätigen der hydraulischen Handpumpe, bis der Prüfkörper zu Bruch geht. Der Lastpunktstand und die am Schleppzeiger auf dem Manometer angezeigte Kraft wird protokolliert.

H.6.2 Indirekter Zugversuch (Brazilian-Test)

Die Bestimmung der Gesteinzugfestigkeit einer Gesteinsprobe erfolgt im indirekten Zugversuch, weil eine direkte Bestimmung äußerst schwierig und ungenau ist. Zylindrische Versuchskörper werden durch diametral wirkende Druckkräfte bis zum Bruch durch Aufspalten belastet (Abb 2).

Beim indirekten Zugversuch geht man davon aus, daß die Vertikalspannung σ_v eine Druckspannung, die Horizontalspannung über 70% des Prüfkörperdurchmessers aber eine gleichmäßig verteilte Zugspannung ist. Lediglich in den Krafteinleitungszonen ist σ_H eine Druckspannung. Die Anwendung des Spaltzugversuchs zur Bestimmung der Zugfestigkeit geht von der experimentell gewonnenen Erfahrung aus, daß eine Gesteinsprobe dann zu Bruch geht, wenn die Zugspannung den Wert der Gesteinsfestigkeit erreicht (GARTUNG 1985).

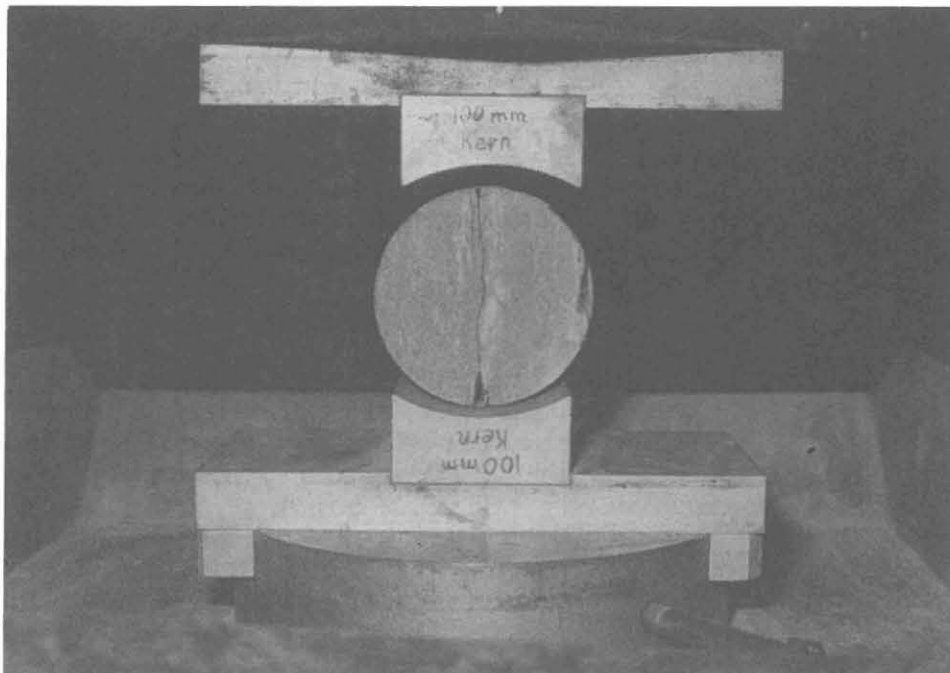


Abb. 2 Indirekter Zugversuch zur Bestimmung der Gesteinzugfestigkeit senkrecht zur Foliation. Die Krafteinleitung in die Gneisprobe (KS 393D1q/1375m) und der Bruch erfolgten parallel zur Foliation

H.6.3 Einaxiale Druckfestigkeitsversuche

Um die gewonnenen Messwerte besser interpretieren zu können, werden die Versuche unter konstanten Versuchsbedingungen durchgeführt. Nach dem Einbau der Probe in die Prüfmaschine wird sie mit einer konstanten Belastungsgeschwindigkeit von 2,0 MPa/min belastet. Die Längsdehnung des Prüfkörpers wird mit einem induktiven Wegaufnehmer auf 1/1000 mm bestimmt. Die Kraft wird servohydraulisch geregelt. Die Genauigkeit der Kraftmessung ist besser als 1%. Die Arbeitslinie eines Granat-Amphibolits aus etwa 1535 m ist in Abb. 3 dargestellt. Neben der Messung mit induktivem Wegaufnehmer können die Prüfkörper auch mit Dehnungsmeßstreifen versehen werden, wobei neben der Längsdehnung auch die Querdehnung bestimmt werden kann.

H.7.0 Versuchsauswertung

H.7.1 Punktlastfestigkeitsversuche

Der Festigkeitsindex I_s kennzeichnet die Festigkeit einer Gesteinsprobe, die unter einer konzentriert aufgebrauchten Kraft F zu Bruch geht. Wenn man den Abstand der Belastungspunkte mit a bezeichnet, wird der Festigkeitsindex definiert als

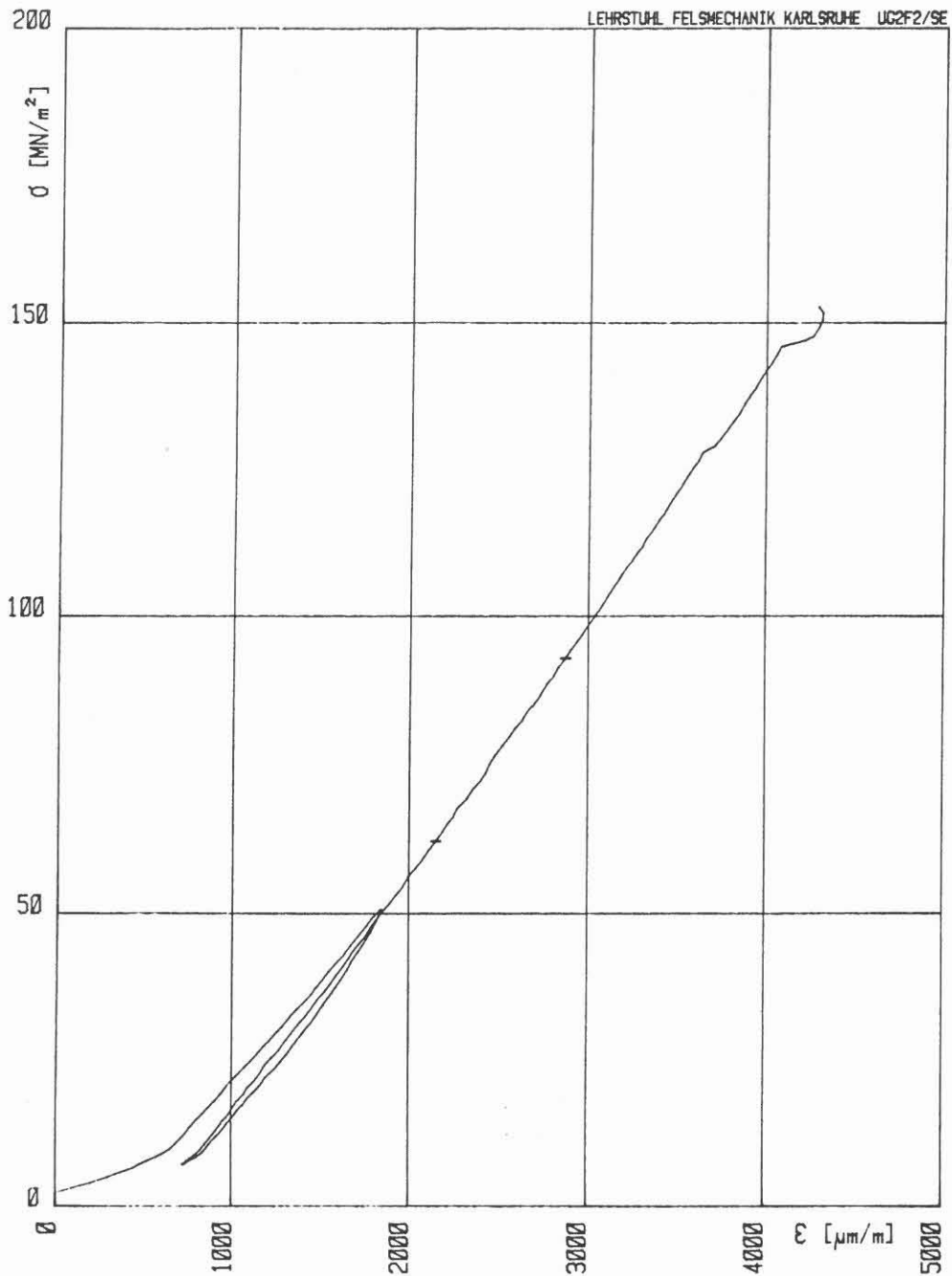
$$I_s = F/a^2.$$

Der gemessene Festigkeitsindex ist von den Prüfkörperabmessungen und von der Prüfkörperform abhängig. Wird zu Vergleichszwecken eine Korrektur der Messwerte bezogen auf die Standardabmessungen eines Prüfkörpers mit 50 mm Durchmesser vorgenommen, so wird dies durch die Angabe $(I_s)_{(50)}$ gekennzeichnet ($I_s)_{(50)}$ (ISRM 1985). Der Korrekturfaktor für den Prüfkörperdurchmesser ist:

$$F = (D/50)^{0,45},$$

wobei D dem Probendurchmesser entspricht (ISRM 1985).

Da zwischen den beim einaxialen Druckfestigkeitsversuch erhaltenen Festigkeitswerten und dem Festigkeitsindex des Punktlastversuchs ein statistisch belegbarer Zusammenhang besteht, kann vom Festigkeitsindex der Punktlastversuche auf die Größenordnung der einaxialen Druckfestigkeit geschlossen werden. In den ISRM-Empfehlungen von 1985 wird angegeben, daß die einaxiale Druckfestigkeit im Mittel das 20 bis 25-fache des $I_s)_{(50)}$ -wertes beträgt. Häufig wird ein Faktor von 22 angegeben. Jedoch kann in Versuchen an verschiedenen Gesteinen der Faktor zwischen 15 und 50 schwanken. Insbesondere bei anisotropen Gesteinen sind Fehler von 100 % möglich.



EINAXIALER DRUCKVERSUCH: KTB/VB/GK 321D1o 8.2.89

Belastungs-Geschwindigkeit: 2.0 MN/m²min

Zahl der Lastzyklen: 1 Lastwechsel-Pause: 2.0 min

$\sigma_{\text{max}} = 152.6 \text{ MN}/\text{m}^2$ $E_{40-60} = 42607 \text{ MN}/\text{m}^2$

Abmessungen der Probe: $H = 101.0 \text{ mm}$ $D = 93.8 \text{ mm}$ $H/D = 1.08$

Abb. 3 Arbeitslinie eines einaxialen Druckfestigkeitsversuchs einer Granat-Amphibolit Probe.

H.7.2 Indirekte Zugfestigkeitsversuche (Brazilian-Test)

Der Indirekte Zugversuch wird an geraden kreiszylindrischen Proben mit einem H/D-Verhältnis von $0,5 < H/D < 1$ durchgeführt. Die Gesteinszugfestigkeit errechnet sich nach der Formel

$$\sigma_{(z)} = 0,636 \times F / (D \times H),$$

wobei F die Kraft ist, die beim Bruch wirkt. D entspricht dem Prüfkörperdurchmesser und H der Prüfkörperhöhe (GARTUNG 1985).

H.7.3 Einaxiale Druckfestigkeitsversuche

Während des Versuchs wird kontinuierlich sowohl die Kraft, als auch die Längsdehnung der Probe registriert und nach dem Versuchsende als Spannungs-Dehnungskurve geplottet. Neben der einaxialen Druckfestigkeit $\sigma_{(D)}$ werden der E-Modul, die Probenhöhe und der Probendurchmesser sowie das H/D-Verhältnis geplottet (Abb.3).

Nach den ISRM-Empfehlungen soll das H/D-Verhältnis 2,0 bis 2,5 betragen, weil aufgrund des Einflusses der Endflächenreibung bei kürzeren Proben zu hohe Festigkeiten ermittelt werden. Da Prüfkörper mit einem H/D-Verhältnis 1:1 benutzt werden, müssen die Festigkeitswerte als Indexwerte verstanden werden. Laut Empfehlung der ISRM (1979) ist eine Korrektur der Werte notwendig. Sie erfolgt nach der Gleichung:

$$\sigma_{D(2)} = 8 \times \sigma_D / [7 + 2(H/D)],$$

wobei $\sigma_{D(2)}$ der korrigierte Wert ist und σ_D der gemessene (GARTUNG 1979). Bei einem H/D-Verhältnis von 1/1 müssen die Festigkeiten um 1/9 abgemindert werden.

H.8.0 Versuchsergebnisse

H.8.1 Punktlastfestigkeitsversuche

Bislang wurden nur einige Dutzend Punktlastfestigkeitsversuche durchgeführt. Es ergeben sich deutliche Hinweise auf das festigkeitsmechanische Verhalten einzelner lithologischer Einheiten. Für eine signifikante statistische Aussage ist die Datenmenge allerdings noch nicht ausreichend.

Bei den Punktlastfestigkeitsversuchen zeigt sich, daß kleine Kernbruchstücke größere Punktlastfestigkeiten als größere

Kernbruchstücke besitzen. Die Ursache liegt darin, daß die Gesteine im Allgemeinen von zahlreichen Klüften und Rissen durchzogen sind, und bei größeren Kernbruchstücken die Wahrscheinlichkeit eines Bruchs entlang einer Kluffläche oder entlang der Foliation größer ist. Hieraus ergibt sich, daß keine zu kleinen Kernbruchstücke geprüft werden sollten, weil sonst deutlich zu hohe Festigkeiten ermittelt würden. Die Größe der Prüfkörper lag meist zwischen 35 mm und 55 mm. Die Festigkeitswerte wurden auf einen Prüfkörperdurchmesser von 50 mm bezogen ($I_{s(50)}$).

H.8.1.1 Granat-Amphibolite

Die Punktlastfestigkeiten der Granat-Amphibolite variierten nicht nur mit der Teufe, sondern auch innerhalb eines Kernmarschs. Im Teufenbereich zwischen 387 m und 460 m streuen die $I_{s(50)}$ -Werte zwischen 3,0 und 12,2 MPa, der Mittelwert liegt bei 6,1 MPa. Bei den gering foliierten Gesteinen wurde zum Teil die Foliationsfläche zum Bruch genutzt. So erfolgte z. B. beim Kernstück 68F8a (ca. 460 m) der Bruch entlang eines Graphitharnis. Die graphitbelegte Kluft war vorher makroskopisch nicht zu erkennen. Die Punktlastfestigkeit betrug nur 4,0 MPa. In demselben Kernstück betrug die maximale Punktlastfestigkeit 12,2 MPa. Sie war die höchste im gesamten Teufenbereich ermittelte.

Zwischen 1242 m und 1473 m ergaben sich mit durchschnittlich 9,1 MPa etwas höhere Festigkeitswerte, der kleinste Wert lag bei 5,0 MPa und der höchste bei 12,6 MPa.

H.8.1.2 Metagabbros

Für die Metagabbros des Teufenabschnitts von 1257 m - 1373 m liegen bisher nur wenige Ergebnisse vor. Der Durchschnittswert ist mit 9,2 MPa der höchste für die untersuchten lithologischen Einheiten. Der Minimalwert beträgt 4,9 MPa, der Maximalwert 12,9 MPa. Die Werte sind denen der Granat-Amphibolite von 1242 m - 1473 m vergleichbar. Die hohen Festigkeiten sind zum einen auf die massige Ausbildung der Gesteine, zum anderen auf den geringen Alterationsgrad zurückzuführen.

H.8.1.3 Gneise

Sehr deutlich ist bei den Gneisen der Einfluß der Foliation auf die Punktlastfestigkeit. Parallel zur Foliation ist sie mit durchschnittlich 2,45 MPa wesentlich geringer als mit 6,75 MPa senkrecht zur Foliation. Die Minimalwerte betragen 0,5 und 1,7 MPa, die Maximalwerte 5,7 bzw. 16,4 MPa. Im Vergleich mit den Granat-Amphiboliten haben die Gneise parallel zur Foliation deutlich geringere Festigkeitswerte.

Senkrecht zur Foliation besitzen die Gneise deutlich höhere maximale Festigkeiten, die Durchschnittswerte sind ähnlich hoch.

Der Bruch beim Punktlastversuch, parallel zur Foliation, erfolgt meist auf Kluftflächen oder entlang der Foliation, wobei es bei graphitbelegten Klüften schon beim Einspannen der Probe zum Bruch kommen kann. Sehr geringe Festigkeiten sind auch bei Prüfkörpern zu beobachten, deren Klüfte mit Chlorit oder Biotit belegt sind. Häufig sind Harnische auf den Bruchflächen vorhanden. Höhere Festigkeiten besitzen Gneise mit Quarz-Feldspat-Mobilisaten sowie Gneise, bei denen der Granatgehalt deutlich in Erscheinung tritt. Für die erhöhten Festigkeitswerte ist wahrscheinlich die Verzahnung von größeren Granatkörnern verantwortlich.

H.8.2 Zugfestigkeiten (Brazilian-Test)

Die Zugfestigkeit wurde an unkalottierten Kernstücken aus der Vorbohrung ermittelt. In Tab. 1 sind die Zugfestigkeiten für den Teufenbereich bis 2000 m dargestellt.

H.8.2.1 Granat-Amphibolite

Die Granat-Amphibolite im Teufenbereich von 190 m bis 460 m besitzen eine durchschnittliche Zugfestigkeit von 6,2 MPa. Die Minimalwerte betragen 3,9 MPa und die Maximalwerte 9,6 MPa. Der Bruch in den massigen Amphiboliten erfolgt vom Inneren der Probe aus und verläuft in Richtung der Krafteinleitungszonen, so z. B. beim Kernstück 61C9b (Abb. 4.)

Bei den etwas stärker foliierten Granat-Amphiboliten, z.B. Kernstück 67F12f, kam es bei einer Belastung quer zur Foliation zum Bruch parallel zur Foliation (Abb. 5).

Versuche bei denen die Reißbildung von den Krafteinleitungsstellen aus erfolgt, dürfen streng genommen nicht gewertet werden. Der spröde Bruch ist in diesem Falle vor dem Erreichen der maximal möglichen Zugspannung eingetreten, weil örtlich im Spannungskonzentrationsbereich die Bruchfestigkeit überschritten wurde. Bei sehr spröden und stark foliierten Gesteinen ist dies oft nicht zu vermeiden. Die ermittelte Zugfestigkeit ist als untere Grenze zu betrachten.

Die Granat-Amphibolite im Teufenbereich von 1242 m bis 1473 m besitzen mit Durchschnittswerten von 11,9 MPa relativ hohe Zugfestigkeiten. Die Streubreite der Minimal- und der Maximalwerte ist mit 9,4 MPa und 12,9 MPa relativ gering. Die Foliation spielt hier keine dominierende Rolle.

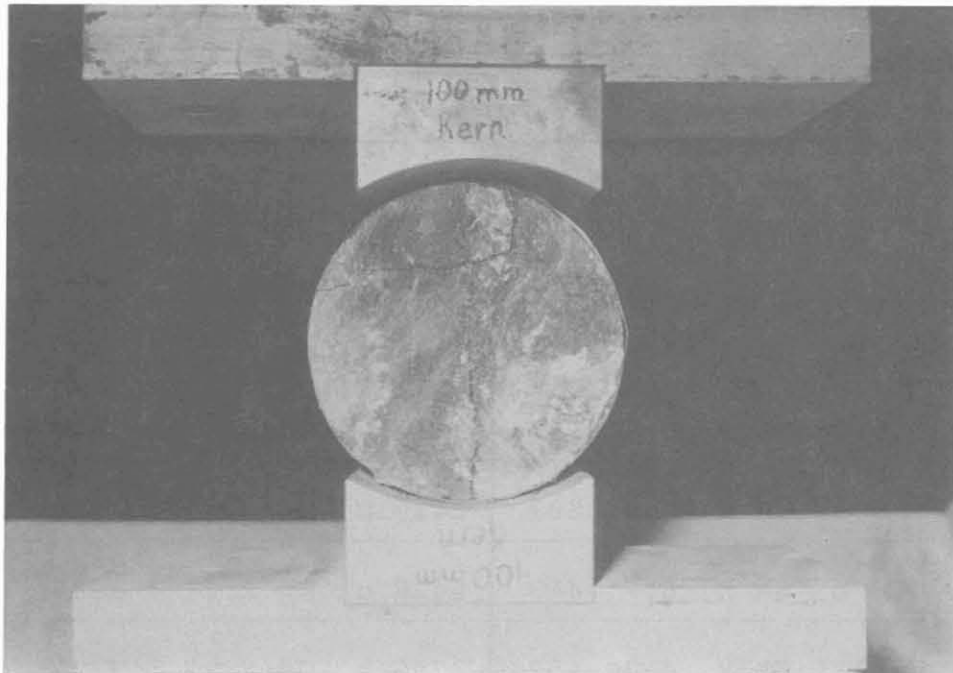


Abb. 4 Indirekter Zugversuch an einer massigen Granat-Amphibolitprobe (Ks61C9b). Der Bruch erfolgte parallel zur Belastungsrichtung.

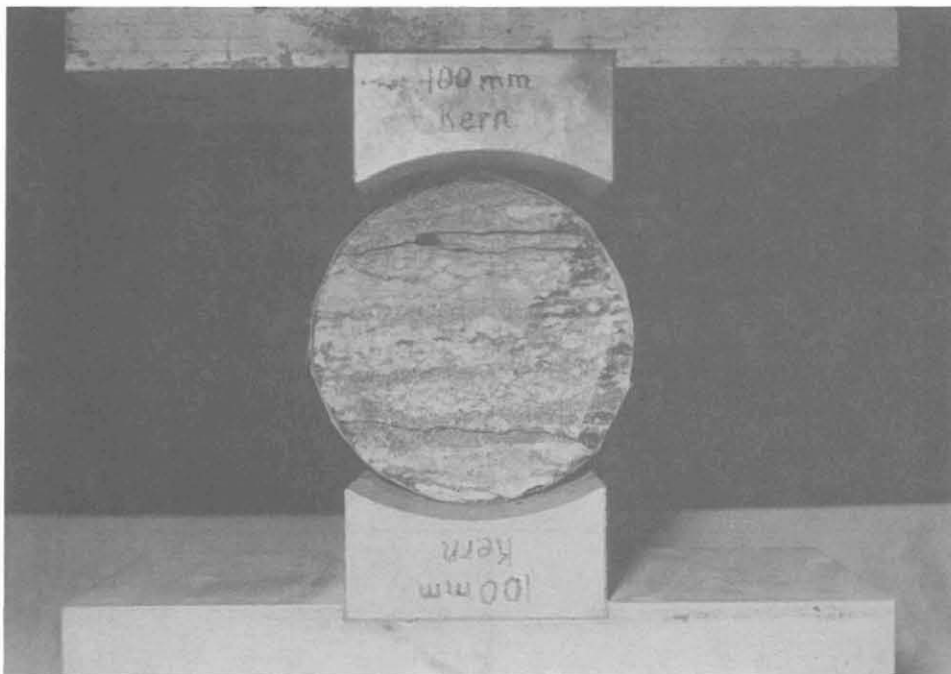


Abb. 5 Indirekter Zugversuch in foliierten Granat-Amphiboliten. Der Bruch erfolgte senkrecht zur Krafteinleitungsrichtung (Ks 67F12f/452 m). Ein solcher Versuch kann nicht gewertet werden.

Zugfestigkeiten (Brazil-Test) für den Teufenbereich bis 1998 m

KS	L	F	σ_Z	T	KS	L	F	σ_Z	T
26G1a	GA	x	3,9	191	233A1b	Gn	p	14,9	940
56D22a	GA	x	5,9	387	233A1b	Gn	s	7,1	940
56D22a	GA	x	9,6	387	241B1h	Gn	p	19,1	962
61C9b	GA	x	6,7	413	262H7q	Mg	x	11,4	1257
67F12f	GA	x	4,7	452	275G1q	Ga	x	12,5	1317
67F12f	GA	x	4,0	452	275G1q	GA	x	12,9	1317
67F12f	GA	x	8,8	452	275G1q	GA	x	9,4	1317
94C1v	Gn	p	5,1	538	283H1q	GA	x	4,6	1317
94C1v	Gn	s	1,2	538	283H1q	GA	x	5,9	1356
107C3aa	Gn	p	7,7	575	283H1q	GA	x	5,4	1356
161C1r	Gn	s	3,4	780	284D1g	GA	x	11,9	1360
214H1r	Gn	p	3,0	904	286E1v	Mg	x	10,0	1373
214H1r	Gn	s	2,3	904	326B1d	Mg	x	10,6	1559
229B1d	Gn	p	7,4	934	391D1q	Gn	s	3,7	1765
232A1c	Gn	s	3,0	938	405C1m	Gn	s	8,3	1804

KS: Kernstück L: Lithologie F: Foliation
 σ_Z : indirekte Zugfestigkeit (MPa) T: Teufe [m]
s/p: senkrecht/parallel zur Fol. x: massig
GA: Granat-Amphibolit Gn: Gneis Mg: Metagabbro
Tab. 1

H.8.2.2 Metagabbros

Die Zugfestigkeiten der Metagabbros im Teufenbereich von 1257 m bis 1559 m sind mit 10,0 MPa, 10,6 MPa und 11,4 MPa recht hoch. Die Werte liegen relativ eng beieinander. Dies ist zum einen auf ihre massige, homogene Ausbildung und zum anderen auf eine geringe Alteration an diesem Kernmaterial zurückzuführen.

H.8.2.3 Gneise

Die Zugfestigkeit der Gneise wird stark beeinflusst von der Richtung der Krafteinleitung zur Foliation. Bei einer Krafteinleitung quer zur Foliation besitzen die Gneise deutlich höhere Zugfestigkeiten als bei Krafteinleitung parallel zur Foliation. Parallel zur Foliation erfolgt der Bruch entlang von Klüften und Lagen, die mit Graphit, Chlorit, Biotit oder Laumontit belegt sein können (Abb. 2).

Die Zugfestigkeiten der Gneise senkrecht zur Foliation (Krafteinleitung parallel zur Foliation) streuen zwischen 1,2 MPa (538 m) und 7,1 MPa (940 m). Der Mittelwert liegt bei 3,45 MPa

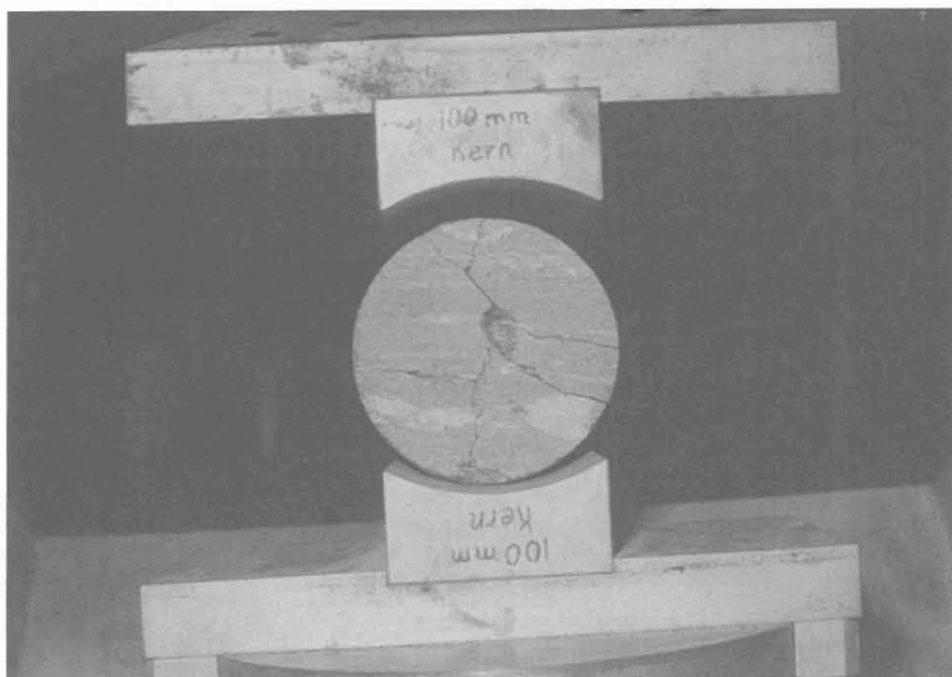


Abb. 6 Indirekter Zugversuch an einer Gneisprobe (Ks 94V1v 452 m) parallel zur Foliation. Die Krafteinleitung und der Bruch erfolgten senkrecht zur Foliation.

Bei einer Belastung quer zur Foliation erfolgt der Bruch ebenfalls quer zur Foliation (Abb. 6), wobei allerdings vorgegebene Inhomogenitäten mitbenutzt werden. Diese machen das Bruchbild etwas komplizierter. Die Zugfestigkeiten sind parallel zur Foliation im Allgemeinen viel größer als senkrecht zur Foliation. Der Minimalwert beträgt 3,0 MPa, der Maximalwert 19,1 MPa. Der Durchschnittswert beträgt 9,35 MPa. Die Werte streuen innerhalb weniger Kernmärsche ganz erheblich. Hierin kommt die erhebliche Bedeutung des Kluftsystems und der Foliation zum Ausdruck.

Die höchsten gemessenen Zugfestigkeiten besitzen die Granat-Sillimanit-Biotit-Gneise mit 14,9 MPa bzw. 19,1 MPa im Teufenbereich von 940 m bis 962 m. Dies ist hier wahrscheinlich auf den hohen Granatgehalt zurückzuführen.

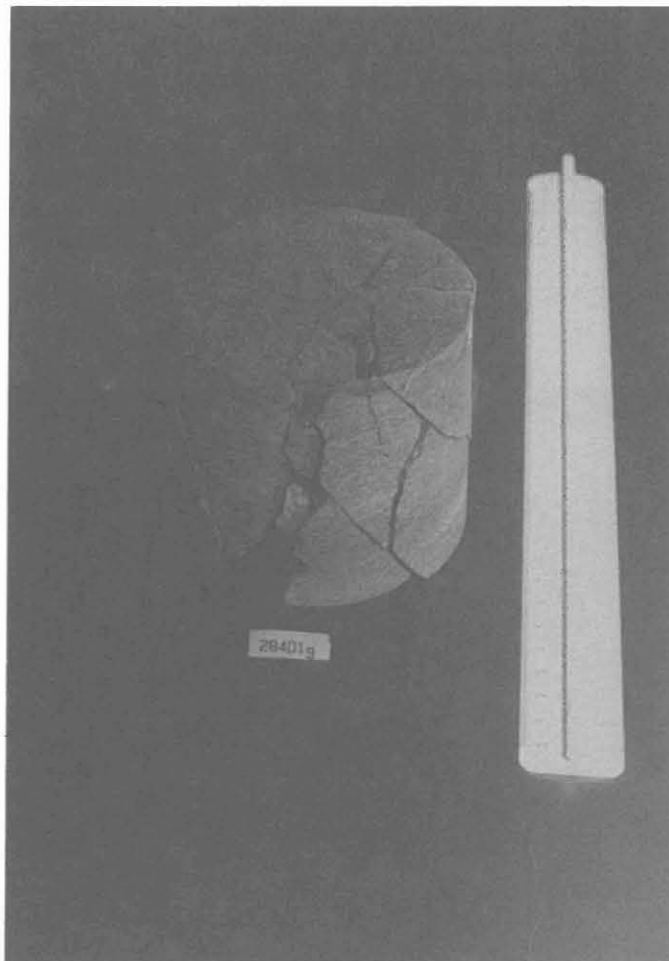


Abb. 7 Axialer Trennbruch bei einaxialem Druckversuch in massigen Granat-Amphiboliten

H.8.3 Einaxiale Druckfestigkeiten

H.8.3.1 Granat-Amphibolite

Im Teufenberich zwischen 191 m und 452 m betragen die einaxialen Druckfestigkeiten durchschnittlich 71,3 MPa. Die Minimalwerte betragen 36,9 MPa und die Maximalwerte 117,8 MPa. Im Teufenbereich zwischen 1242 m und 1473 m liegen die Durchschnittswerte bei 97,6 MPa. Die Minimalwerte betragen 39,4 MPa und die Maximalwerte 136,5 MPa. Die geringeren Festigkeiten zwischen 191 m und 452 m liegen zum einen an der stärkeren Alteration und zum anderen an der deutlicheren Foliation der Gesteine.

Die Foliation macht sich bei starker Ausprägung im einaxialen Druckversuch im Bruchverhalten bemerkbar, denn es kommt häufig zu einem Bruch entlang der Foliation (z.B. Kernstück 67F12f). Bei massigen Gesteinen kommt es eher zu einem axialen Trennbruch wie z. B bei Kernstück 284D1g (Abb.7). Über große Bereiche besitzen die Granat-Amphibolite hohe Druckfestigkeiten. Allerdings kommt es bei der Präparation der Prüfkörper immer wieder vor, daß der Prüfkörper beim Sägen zu Bruch geht, so z.B. Kernstück 63B11 (425 m), bei dem die Bruchfläche aus einem Graphitharnisch bestand. Zu Kernzerfallserscheinungen beim Sägen kommt es nicht nur entlang von graphitbelegten Klüften, sondern auch entlang von Klüften, die mit Zeolithen (Laumontit) belegt sind, so z.B. Kernstück 275G1q. Die Festigkeiten in einem lithologischen Abschnitt können sich rasch ändern. Sehr deutlich zeigt sich dies bei Kernstück 58G2s, das eine einaxiale Druckfestigkeit von 78,7 MPa besaß. Ein Teilstück dieses Kernstücks zerbrach allerdings bereits beim Sägen entlang eines Graphitharnischs.

Neben den einaxialen Druckfestigkeiten wurden die E-Moduli der Gesteine standardmäßig mitbestimmt. Sie lagen bei den Granat-Amphiboliten zwischen 28.900 MPa und 66.000 MPa. Die Durchschnittswerte lagen bei 42.000 MPa. In Tab. 2 sind die einaxialen Druckfestigkeiten sowie die E-Moduli für den Teufenbereich bis 2000 m dargestellt.

8.3.2 Metagabbros

Die Metagabbros aus dem Teufenbereich von 1257 m bis 1535 m zeichnen sich i.a. durch hohe einaxiale Druckfestigkeiten und hohe E-Moduli aus. Kernstück 286E1v (1373 m) besaß mit 165,8 MPa die höchste gemessene Druckfestigkeit für den Teufenabschnitt bis 2000 m. Die durchschnittliche einaxiale Druckfestigkeit lag bei 114,2 MPa. Aber auch in den Metagabbros gibt es Bereiche mit geringen Festigkeiten. So ergab sich bei Kernstück 280A1b nur eine Druckfestigkeit von 9,0 MPa. Hier erfolgte der Bruch entlang einer Kluft.

Einaxiale Druckfestigkeiten für den Teufenbereich bis 1998 m [Index-Werte für H/D=1:1]

KS	L	F	σ_D	E	KS	L	F	σ_D	E
26G1a	GA	x	36,5	31	229B1d	Gn	60	4,1	-
56D22a	GA	x	117,8	47	233A1b	Gn	65	61,9	74
58G2s	GA	x	78,7	29	241B1h	Gn	70	116,1	50
61C9b	GA	x	53,5	66	245D3a	Gn	60	12,7	-
67C10a	GA	x	76,8	29	257F11e	GA	x	136,5	63
67F12f	GA	x	64,2	39	262H7q	Mg	x	129,2	150
91B1f	Gn	70	28,8	12	280A1b	Mg	x	9,0	-
106D2an	Gn	60	9,7	14	284D1g	GA	x	39,4	35
120A1c	Gn	60	24,0	29	286E1v	Mg	x	165,8	62
149B4g	Gn	70	4,0	8	294C1v	MU	x	3,2	-
161C1r	Gn	50	28,8	24	298A1b	GA	x	130,0	44
170C4ad	Gn	45	10,9	8	307D1f	GA	x	84,5	45
173B1y	Gn	50	9,4	13	321D1o	GA	x	152,6	43
181C1i	Gn	60	5,2	3	385B2d	Gn	70	8,7	4
188B3f	Gn	50	10,3	8	391D1q	Gn	80	75,4	38
214H1r	Gn	40	13,4	5	405C1m	Gn	80	37,9	21

KS: Kernstück F: Foliation in Grad L: Lithologie

σ_D : Einaxiale Druckfestigkeit [MPa]

E: E-Modul [GPa]

GA: Granat-Amphibolit Gn: Gneis Mg: Metagabbro

MU: Meta-Ultramafitit

Tab. 2

H.8.3.3 Meta-Ultramafitit

Es wurde bislang nur ein Meta-Ultramafitit geprüft. Für diesen wurde auf Grund seiner massigen, dichten Ausbildung eine hohe Druckfestigkeit erwartet. Der Bruch der Probe trat aber bereits bei einer Belastung von 3,2 MPa entlang eines Spiegelharnisches auf.

H.8.3.4 Gneise

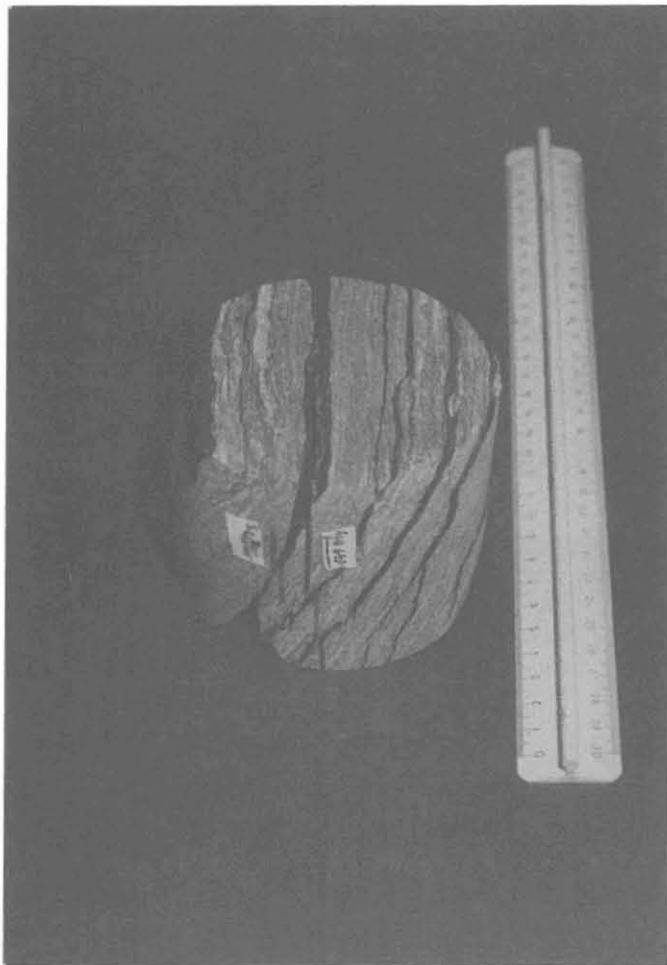


Abb. 8 Scherbruch bei einaxialem Druckversuch entlang der Foliation des Gneises (KS 149B4g).

In die Gneisen, die bei einer Teufe von etwa 450 beginnen, sind zwischen 1160 m und 1610 m Granat-Amphibolite und Metagabbros zwischengelagert. Die Gneise fallen i.a. steil ein, meist mit $60^\circ - 80^\circ$. Die einaxialen Druckfestigkeiten streuen erheblich. Während die einaxialen Druckfestigkeiten der Gneise zwischen 530 m und 934 m durchschnittlich 13,5 MPa

betragen, und 30 MPa nicht überschreiten, besitzen die Gneise bei 940 m und 962 m mit 61,9 MPa bzw. 116,1 MPa recht hohe Werte. Die entsprechenden E-Moduli unterscheiden sich mit 12.100 MPa bzw. 61.600 MPa ebenfalls sehr stark. Da die Foliation der Gesteine ähnliche Fallwinkel aufweist, ist die Ursache vermutlich auf den hohen Granatgehalt im Bereich von 940 m bis 962 m zurückzuführen. Das Versagen der Gneise erfolgt als Scherbruch entlang der Foliation (Abb.8).

Die Gneise mit steilstehender Foliation zwischen 1765 m und 1804 m besitzen mit 75,4 MPa bzw. 37,9 MPa relativ hohe Werte. Die maximale einaxiale Druckfestigkeit bei 1740 m betrug jedoch nur 8,7 MPa. Hier war das Gestein stark alteriert.

Im Teufenbereich von 1640 m war der Kernerhalt so schlecht, daß keine Prüfkörper gewonnen werden konnten. Bei der Präparation der Prüfkörper zeigte sich, daß bei den Gneisen etwa ein Drittel bis zur Hälfte der Bohrkerne beim Sägen mit der Diamantsäge zerfielen.

So kam es beim Versuch der Prüfkörperherstellung aus dem Kernstück 96B1j zum Zerfall des gesamten Kernstücks entlang verschiedener Klüfte. Meist erfolgte der Bruch entlang von Graphitharnischen, aber auch entlang von Klüften, die mit Chlorit und Biotit belegt waren (Abb.9)

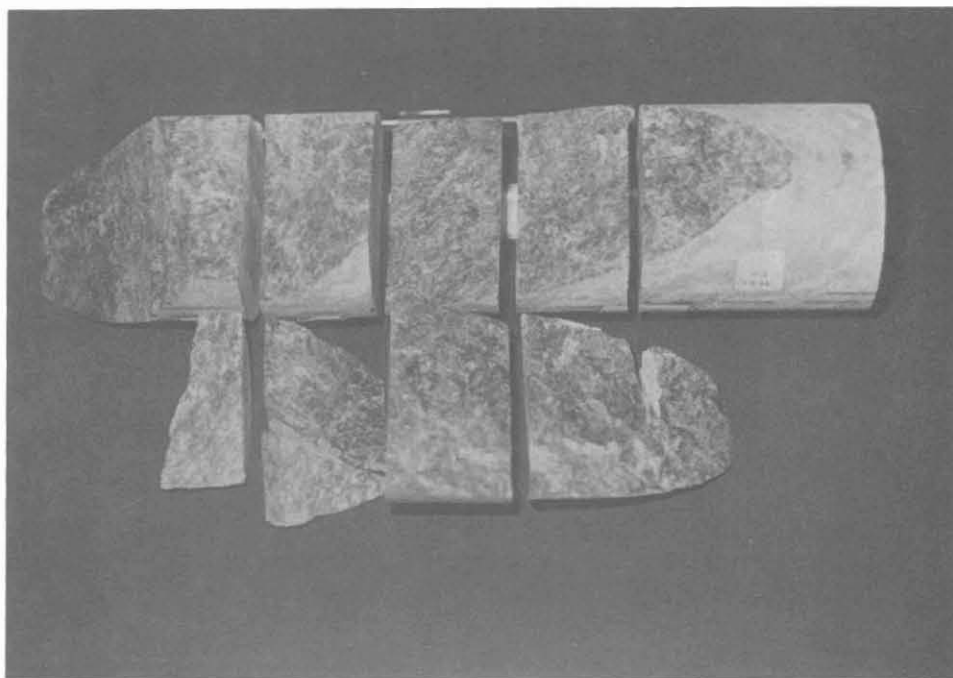


Abb. 9 Weitgehender Kernzerfall beim Präparieren der Prüfkörper entlang von Chlorit- und Graphitklüften (KS 96B1j).

H.9.0 Korrelation der Punktlastfestigkeiten und der indirekten Zugfestigkeiten.

Bei der Durchführung der Punktlastversuche und der indirekten Zugversuche zeigte sich eine starke Abhängigkeit von der Foliationsrichtung.

Insgesamt zeigte sich, daß in den Gneisen bei Belastung senkrecht zur Foliation die Punktlastfestigkeiten ($Is_{(50)}$) deutlich größer waren als bei entsprechenden Versuchen parallel zur Foliation. In den massigen Granat-Amphiboliten und Metagabbros erreichten die Punktlastfestigkeiten annähernd die Werte der Zugfestigkeiten.

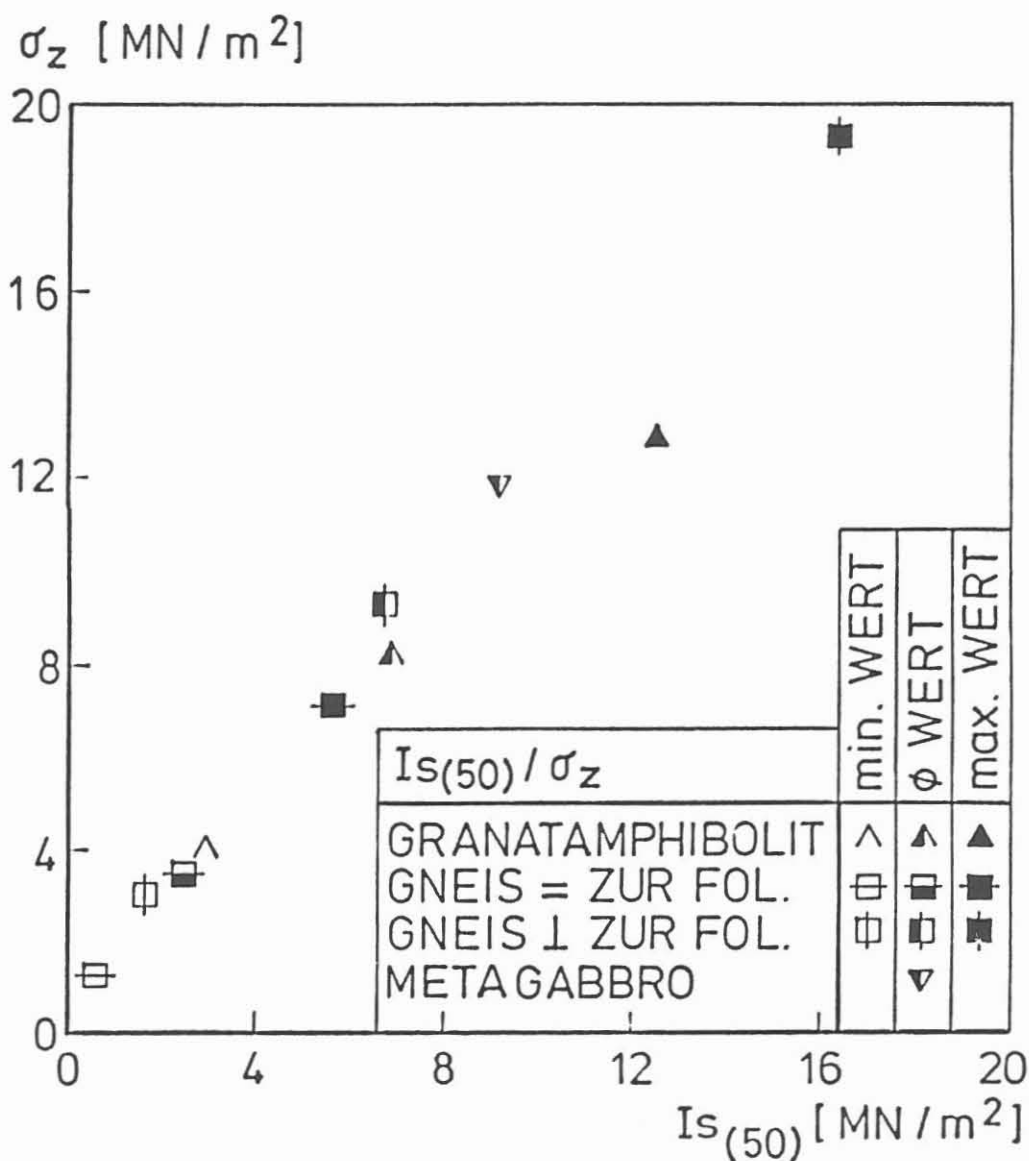


Abb. 10 Korrelation der Punktlastfestigkeiten ($Is_{(50)}$) und der Indirekten Zugfestigkeiten.

Theoretisch war die zu erwarten, da der Punktlasttest eine Form des "indirekten Zugversuchs" ist (ISRM 1985). Is⁽⁵⁰⁾ sollte annähernd 0,8 mal der indirekten Zugfestigkeit entsprechen. Abb.10 zeigt, daß dieser Zusammenhang tatsächlich zu existieren scheint. Dies konnte für die stark foliierten Gneise nicht erwartet werden. Die Datenmenge, auf der das Ergebnis beruht, ist bislang noch nicht ausreichend, um diesen Zusammenhang statistisch abzusichern. Wenn sich dieser Trend fortsetzt, kann man erwarten, daß bei zunehmenden Kernzerfall in größeren Tiefen, wenn nur noch kleine Kernbruchstücke zur Verfügung stehen, dennoch Aussagen über festigkeitsmechanische Parameter möglich sein werden.

H. 10 Literatur:

GARTUNG, E.(1979): Einaxiale Druckversuche an Gesteinproben. Die Bautechnik 56(7), 217-220

GARTUNG, E.(1985): Indirekter Zugversuch an Gesteinsproben - Spaltzugversuch. Die Bautechnik 62(6), 197-199

ISRM (1979): Suggested Methods for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials. Comm. Stand. Lab.&Field Tests, Int.J.Rock Mech.Min. Sci&Geomech.Abstr., 16, 135-140

ISRM (1985): Suggested Methods for Determining Point Load Strength. Comm. Test. Meth., Int.J.Rock Mech. Min. Sci&Geomech. Abstr., 22(2), 51-60