BEITRÄGE ZUR GEOLOGIE DER SCHWEIZ
GEOTECHNISCHE SERIE
herausgegeben von der
Schweizerischen Geotechnischen Kommission
(Organ der Schweizerischen Akademie der Naturwissenschaften)

MATERIAUX POUR LA GEOLOGIE DE LA SUISSE
SERIE GEOTECHNIQUE
publiés par la
Commission Géotechnique Suisse
(Organe de l'Académie Suisse des Sciences Naturelles)

Lieferung 87

GEOMECHANISCHE EIGENSCHAFTEN VON SERPENTINITMASSEN

M. Gharavizadeh

1993

Verkauf durch: Schweizerische Geotechnische Kommission, ETH-Zentrum, 8092 Zürich

Dissertationsschrift, Diss. ETH Nr. 9859
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 1992
Referent: Prof. Dr. C. Schindler
Korreferenten: Prof. Dr. K. Kovari, Prof. Dr. Tj. Peters

Redaktion und Satz: Schweizerische Geotechnische Kommission
Lithos und Druck: Vontobel Druck AG, Wetzikon
Gedruckt auf chlorfrei gebleichtem Papier

ISBN 3-907997 20 4

VORWORT DER SCHWEIZERISCHEN GEOTECHNISCHEN KOMMISSION

Die vorliegende Dissertation von M. Gharavizadeh über die geomechanischen Eigenschaften von Serpentinitmassen hat gerade im Hinblick auf die in der nahen Zukunft zu realisierenden Tunnelbau-Vorhaben grosse Bedeutung, verursachen doch solche Gesteinsarten oft erhebliche geotechnische Probleme. Zahlreiche Sackungen und Bergstürze in Serpentiniten demonstrieren, dass diese Gesteine auch in Bezug auf die Hangstabilität kritische Eigenschaften aufweisen. Dank ihrer weiten Verbreitung waren Serpentinite Ziel zahlreicher geologischer, petrographischer oder geophysikalischer Untersuchungen, Informationen über deren geotechnisches Verhalten wurden jedoch bisher nur vereinzelt publiziert. Die vorliegende Studie befasst sich mit den südpenninischen Ophiolithen in Graubünden. Infolge unterschiedlicher Bedingungen der alpinen Regionalmetamorphose und bedingt durch den komplizierten tektonischen Aufbau weisen diese Gesteine eine Vielzahl der charakteristischen Erscheinungsformen von Serpentinitmassen auf. Mit petrographischen Untersuchungen sowie mit fels- und bodenmechanischen Laborversuchen werden die verschiedenen Varietäten charakterisiert. Obwohl infolge grosser Inhomogenität der Serpentinite die Festigkeitswerte stark streuen, lässt sich zeigen, dass sie allgemein mit steigendem Metamorphosegrad zunehmen. In tektonisch zerrütteten Serpentiniten vermindern Bruchflächen die Festigkeit stark, die geringsten Werte weisen Rutschharnische auf. Dagegen wirken Aderbildungen heilend, insbesondere haben massige Adern eine Erhöhung der Festigkeit zur Folge. Aus ingenieurgeologischer Sicht ist daher zu beachten, dass das Verhalten des Gebirges bei tektonisch stark beanspruchten Serpentiniten nicht von der hohen Festigkeit des Handstücks, sondern von den geotechnischen Eigenschaften von Rutschharnischen und Bruchflächen bestimmt wird.

Die Schweizerische Geotechnische Kommission freut sich über die Möglichkeit, diese wertvolle Arbeit in ihrer Reihe "Beiträge zur Geologie der Schweiz, geotechnische Serie" publizieren zu können. Die Kommission dankt dem Autor für die sorgfältige Mitarbeit bei der Drucklegung dieses Werkes.

Für den Inhalt von Text und Figuren ist der Autor allein verantwortlich.

Zürich, Juli 1993

Der Präsident der Schweizerischen Geotechnischen Kommission

C . Schindler

VORWORT DES VERFASSERS

Auf Anregung von Prof. Dr. C. Schindler und Prof. Dr. K. Kovari begann ich 1987 mit den Vorbreitungen zur vorliegenden Arbeit. Die Feldarbeiten in der Schweiz und in Norditalien wurden während der Sommermonate 1987-1990 durchgeführt. Die Laboruntersuchungen erfolgten in diesen und den folgenden Jahren am Lehrstuhl für Ingenieurgeologie des Geologischen Instituts und am Institut für Geotechnik (IGT), beide an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich (ETHZ). Die Arbeit wurde finanziell im Rahmen des ETH-Forschungsprojektes „Untersuchung von Locker- und Festgesteinen mit problematischen geotechnischen Eigenschaften auf kritische Parameter" unterstützt.

Mein besonderer Dank gebührt dem Referenten Prof. Dr. C. Schindler für seine ermutigende Begeisterung zum Thema, für zahlreiche Diskussionsbeiträge und nicht zuletzt für all die Verbesserungsvorschläge beim intensiven Studium der ersten Fassung des vorliegenden Textes. Für die Übernahme des Korreferates möchte ich an dieser Stelle ganz herzlich Herrn Prof. Dr. K. Kovari danken. Von seiner Erfahrung und jener seiner Mitarbeiter am IGT, den Herren J. Mandilaris, J. Köppel und A. Tisa, durfte ich beim Durchführen der felsmechanischen Untersuchungen profitieren. Prof. Dr. Tj. Peters danke ich ebenfalls für die Übernahme des Korreferates und für die kritische Durchsicht des Manuskriptes.

Prof. Dr. H. Lang gab seine Einwilligung zur Durchführung der bodenmechanischen Versuche am IGT. Seine Mitarbeiter, die Herren D. Bystricky, W. Berger und M. Scherrer, waren mir bei den Versuchen behilflich. Den Herren Dr. F. Bucher und W. Degen möchte ich für ihre Unterstützung bei den bodenmechanischen Untersuchungen und ihre Diskussionsbereitschaft danken. Die Herren Dr. R. Kündig und Dr. A. Peretti halfen mir durch vielfältige Beratung und Unterstützung bei den petrographischen Untersuchungen. Mein besonderer Dank gilt in diesem Zusammenhang auch Herrn Dr. G. Kar vom Tonmineralogischen Institut (IGT) für seine Unterstützung bei den Diffraktometeranalysen.

Anregungen aller Art kamen auch von meinen Kollegen und Freunden am Lehrstuhl für Ingenieurgeologie, insbesondere von Herrn Dr. Ch. Schlüchter, durch interessante Feldbegehungen und gute Ratschläge sowie von Herrn V. Yavuz durch seinen unermüdlichen Einsatz im Feld und im Felslabor. Herrn Dr. B. Oddsson danke ich für konstruktive Ratschläge und interessante Diskussionen. Meine sehr guten Freunde Herr D. Maha und Dr. M. Abbassi halfen mir bei Feldbegehungen und bei der Probenentnahme. Herrn Dr. S. Mohasseb vom Institut für Bauplanung und Baubetrieb (IBETH) möchte ich für seine wertvolle Computerunterstützung herzlich danken. Dies gilt auch für meinen sehr guten Freund Dr. R. Gieré für seine ermutigenden Ratschläge und seine kritische Durchsicht des Manuskriptes.

Den Ingenieuren des Ingenieurbüros für bauliche Anlagen der Stadt Zürich (IBA), vor allem Herrn R. Bischof, möchte ich für ihr reges Interesse an dieser Arbeit und für die Abgabe von Bohrkernen danken.

Meiner Frau und all denjenigen, die durch ihre Mitarbeit, ihre Diskussionsbereitschaft und ihre Anregungen zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, gehört mein herzlicher Dank. Meinen Eltern, die mir über längere Zeit das Studium ermöglichten, möchte ich diese Arbeit widmen.

INHALTSVERZEICHNIS

VORWORT DER SCHWEIZERISCHEN GEOTECHNISCHEN KOMMISSION III

ZUSAMMENFASSUNG VII

ABSTRACT VIII

RÉSUMÉ IX

ABKÜRZUNGEN X

1 EINLEITUNG 1
1.1 Die Begriffe „Serpentin", „Serpentinit" und „Ophiolith" 1
1.2 Serpentinmineralien 1
1.3 Untersuchungsgebiet 2
1.4 Makroskopische Einteilung der ultramafischen Gesteine 2
1.5 Problemstellung 3
1.6 Vorgehen 3

2 GEOLOGIE 5
2.1 Historisches 5
2.2 Alter der Ophiolithe 5
2.3 Lagerungsverhältnisse der Serpentinitmassen 5
2.4 Metamorphose 6

3 TEKTONIK UND STRUKTUREN 7
3.1 Allgemein 7
3.2 Gefüge 7
3.3 Bruchflächen und Rutschharnische 9
3.4 Aderbildung 10

4 PETROGRAPHISCHER TEIL 13
4.1 Allgemein 13
4.2 Makroskopische und mikroskopische Beschreibung der Gesteinsproben 13
4.2.1 Reine Serpentinite 13
4.2.2 Pyroxenhaltige Serpentinite 14
4.2.3 Feinkörnige Peridotite 15
4.2.4 Ophicalcite 15
4.2.5 Ophidolomite 15
4.2.6 Karbonatführende Serpentinite 15
4.2.7 Vertalkte Serpentinite 15
4.2.8 Malenco-Serpentinite 15
4.2.9 Serpentinit mit sehr feinen Talkadern 16
4.3 Dichte, Porosität 18
4.4 Resultate 19

5 BODENMECHANISCHE UNTERSUCHUNGEN 23
5.1 Allgemeines 23
5.2 Probenentnahme 23
5.3 Probenvorbereitung 24
5.4 Methodik 25
5.5 Ergebnisse 25

6 FELSMECHANISCHE UNTERSUCHUNGEN 27
6.1 Allgemeines 27
6.1.1 Probenvorbereitung 27
6.1.2 Versuchsvorrichtung 27
6.2 Einaxialer Druckversuch 27
6.2.1 Methodik 27
6.2.2 Ergebnisse 28
6.3 Triaxialer Druckversuch 30
6.3.1 Allgemeines 30
6.3.2 Methodik 30
6.3.3 Ergebnisse 33
6.4 Direkter Scherversuch 36
6.4.1 Allgemeines 36
6.4.2 Methodik 37
6.4.3 Ergebnisse 38
6.4.4 Serpentinadern 41
6.4.5 Rutschharnische und Bruchflächen 41

7 INTERPRETATION DER ERMITTELTEN RESULTATE UND IHRE ANWENDUNG AUF DIE FELSMASSE 43
7.1 Intakte Serpentinite 43
7.1.1 Serpentinitgefüge 43
7.1.2 Mineralogie 43
7.1.3 Serpentinisierung 43
7.1.4 Bruchart nach Druckversuchen 44
7.2 Serpentinitmassen durchsetzt mit Diskontinuitätsflächen 44
7.2.1 Bruchflächen und Rutschharnische 44
7.3 Serpentinitmassen durchsetzt mit Adern 48
7.3.1 Stick-Slip Effekt 48

8 SCHLUSSFOLGERUNG 49

LITERATURVERZEICHNIS 51

ANHANG 53
Anhang A: Koordinaten der Gesteinsproben 53
Anhang B: Resultate der triaxialen Druckversuche 54
Anhang C: Resultalte der direkten Scherversuche 66

FIGUREN- UND TABELLENVERZEICHNIS

Figurenverzeichnis

Fig. 1.1: Serpentinmineralien und ihr kristallographischer Aufbau 1
Fig. 1.2: Schematisch-tektonische Karte der Südost-Schweiz 2
Fig. 3.1: Feinkörnige Peridotite mit Tektonit-Gefüge 8
Fig. 3.2: Maschenstruktur mit Rutil-Nädelchen 8
Fig. 3.3: Bastit: Pseudomorphosen nach Pyroxen 8
Fig. 3.4: Bänderstruktur 8
Fig. 3.5: Durchdringungsgefüge 8
Fig. 3.6: Unregelmässige Geometrie 9
Fig. 3.7: Unregelmässiges Netz von Brüchen im makro- und mikroskopischen Bereich 10
Fig. 3.8: Ader aus Slip-fibre und Cross-fibre 11
Fig. 3.9: Cross-fibre und Slip-fibre 12
Fig. 3.10: Slip-fibre aus Chrysotil 12
Fig. 3.11: Slip-fibre aus Chrysotil- und Calcit-Fasern 12
Fig. 3.12: Feine Talkader 12
Fig. 4.1: Crossfibre-Ader aus Antigorit und Chrysotil 14
Fig. 4.2: Stark kataklastisch deformierter Serpentinit 14
Fig. 4.3: Vergleich zwischen Gesamtporosität n und Trockenraumgewicht γ_d. 20
Fig. 4.4: Probe 73To-2-1e nach Behandlung mit der Farbmethode. 20
Fig. 4.5: Beziehung zwischen Risslänge und Gesamtporosität. 21
Fig. 5.1: Stark kataklastisch deformierte Scherzone 23
Fig. 5.2: Kornverteilung im natürlichen Zustand im Feld und nach dem Scherversuch 24
Fig. 5.3: Typischer Verlauf eines Ringscherversuchs 25
Fig. 6.1: Einaxialer Druckversuch. Spannungs-/Dehnungsdiagramme eines reinen Serpentinites 28
Fig. 6.2: Elastizitätsmodul / einaxiale Druckfestigkeit 29
Fig. 6.3: Schematische Darstellung verschiedenartiger Prüfkörper beim triaxialen Druckversuch 30
Fig. 6.4: Diagramm eines Triaxialversuches mit kontinuierlichen Bruchzuständen 30
Fig. 6.5: Festigkeitsparameter bei der Mohr-Coulomb'schen Bruchbedingung und Grenzkurve der Festigkeit 31
Fig. 6.6: Triaxiale Druckversuche mit kontinuierlichen Bruchzuständen 32
Fig. 6.7: Triaxiale Druckversuche mit kontinuierlichen Bruchzuständen 33
Fig. 6.8: Variationsbreite der Restfestigkeitsparameter c_r und φ_r 34
Fig. 6.9: Variationsbreite der Restfestigkeitsparameter c_r und φ_r 35
Fig. 6.10: Systematik der Diskontinuitätsflächen 36
Fig. 6.11: Profile für Rauhigkeit und Unebenheit 36
Fig. 6.12: Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen von Spiegelharnischen und Rutschharnischen 36
Fig. 6.13: Diagramme eines Scherversuchs (Höchst- und die Restscherfestigkeit) 37
Fig. 6.14: Diagramme eines Scherversuchs (nur Restscherfestigkeit) 37
Fig. 6.15: Scherversuch mit kontinuierlichen Bruchzuständen 38
Fig. 6.16: Scherversuch mit kontinuierlichen Bruchzuständen 39
Fig. 6.17: Bruchkörper mit Serpentinader vor und nach dem Bruch 40
Fig. 7.1: Bruchbilder nach triaxialem Druckversuch 45
Fig. 7.2: Vergleich der Resultate von triaxialen Druckversuchen und direkten Scherversuchen im Mohr'schen Diagramm 45
Fig. 7.3: Typische Bruchflächen intakter Serpentinite 46
Fig. 7.4: Übertragung der Resultate von traxialen Druckversuchen auf ein τ-σ-Diagramm am Beispiel der vertalkten Serpentinite 47
Fig. 7.5: Triaxialer Druckversuch mit Stick-Slip Effekt 48
Fig. 8.1: Einfluss der tektonischen Entfestigung auf die Serpentinitmassen. 49

Tabellenverzeichnis

Tab. 4.1: Mineralog. Zusammensetzung der Proben 16
Tab. 4.2: Der Anteil von verschiedenen Serpentinstrukturen, Nichtserpentinmineralien und Erz 17
Tab. 4.3: Grösster Korndurchmesser der Gemengteile 18
Tab. 4.4: Extrem- und Mittelwerte von γ_d, γ_s und n der verschiedenen Serpentinitarten. 19
Tab. 5.1: Reibungswinkel für Höchstfestigkeit (φ_p) und Restfestigkeit (φ_r) 26
Tab. 6.1: Grenzwerte: einaxiale Druckfestigkeit σ_d, Elastizitätsmodul E, Poissonzahl ν und Bruchdehnung ε^p. 29
Tab. 6.2: Wertebereich der ermittelten Reibungswinkel φ_r und φ_p 32

ZUSAMMENFASSUNG

Die Serpentinitmassen stellen als stark tektonisch entfestigte Gesteine oft grosse geotechnische Probleme. Diese Gesteine, deren geologischer Ursprung lange Zeit unbekannt war, sind Objekte vieler geologischer, petrographischer und neuerdings geophysikalischer Untersuchungen. Trotz der grossen Verbreitung von Serpentinitmassen in der Schweiz findet man nur wenige geotechnische Daten über diese Gesteine. Für die folgenden Untersuchungen wurden die südpenninischen Ophiolithzonen in Graubünden, im Südosten der Schweiz, ausgewählt. Diese eignen sich für die Studie besonders, da aufgrund der alpinen Regionalmetamorphose und des tektonischen Aufbaus alle typischen Erscheinungsformen der Serpentinitmassen auftreten. Ihr geologischer Aufbau und ihre tektonische Deformation werden untersucht. In dieser Arbeit werden die tektonischen Entfestigungserscheinungen der Serpentinite modellhaft erfasst.

Eine Auswahl typischer, intakter Serpentinitgesteine wurde petrographisch und felsmechanisch charakterisiert. Die felsmechanischen Laborversuche umfassen einaxiale Druckversuche und Triaxialversuche mit kontinuierlichen Bruchzuständen. Die intakten Serpentinite verhalten sich sehr spröd und sie zeigen mittlere bis sehr hohe Festigkeiten im Sinne von Bieniawski (1967). Die Resultate der triaxialen Druckversuche zeigen eine grosse Streuung, welche auf den inhomogenen petrographischen Aufbau der Serpentinite und die daraus resultierende Bruchart zurückgeführt wird. Allgemein ist bei steigendem Grad der Metamorphose eine zunehmende Festigkeit zu beobachten.

Die Schwächezonen, wie z.B. Rutschharnische und Aderbildungen, welche die meisten Serpentinitmassen durchsetzen, werden geologisch und felsmechanisch untersucht. Ihre Scherfestigkeit wird ermittelt und ihr Einfluss auf die Felsmassen studiert. Dazu werden Resultate von Triaxialversuchen und direkten Scherversuchen vorgestellt. Die Aderbildung wirkt im allgemeinen heilend auf die Serpentinite. Insbesondere die massigeren Adern verleihen den tektonisch entfestigten Serpentiniten eine grössere Festigkeit als die parallelfaserigen Adern. Im Gegensatz zur Aderbildung wirken die verschiedenartigen Bruchflächen schwächend auf die intakten Serpentinite. Ihr Einfluss wird detailliert diskutiert. Die niedrigsten Scherparameter in den Serpentinitmassen wurden auf ebenen Rutschharnischen mit einem Reibungswinkel zwischen 21° und 26° für die Restfestigkeit gemessen. Da die Serpentinitmassen im Gebirge eine Schwächezone darstellen und deshalb bei tektonischen Bewegungen als mögliche Verschiebungshorizonte funktionieren, kann den von uns ermittelten Scherparametern auf Rutschharnischen geologisch eine grosse Bedeutung beigemessen werden.

Die Festigkeitsparameter einiger typischer, stark kataklastisch deformierter Serpentinitgesteine werden mit felsmechanischen und bodenmechanischen Methoden untersucht. Die Art und die Häufigkeit der Bruchflächen spielen eine sehr grosse Rolle. Der massgebende Faktor bei der Beurteilung der Felsmassen ist der Grad der spröden Deformation.

ABSTRACT

Serpentinite bodies commonly exhibit a reduced strength due to tectonic stress/strain, and thus, pose relatively serious geotechnical problems. These rocks have been the focus of numerous geological, petrographic and, more recently, geophysical investigations. Although serpentinites are widespread in Switzerland, only few geotechnical data exist. The south-penninic ophiolite bodies in the Grisons (southeastern Switzerland) were chosen for this study. In this region the serpentinites exhibit typical properties and a variety of appearances resulting from the Alpine regional metamorphism and the tectonic evolution. The present study is centered on the geology and the deformation of the serpentinites, and a model is presented for their tectonically-induced loss in strength.

A selection of typical, intact serpentinites is characterized by petrographic and rock-mechanical observations. The latter result from laboratory experiments by means of uniaxial and continuous failure state triaxial tests. Intact serpentinites exhibit a very brittle behaviour and have, conforming with BIENAWSKI (1967), average to high strength. The results from the triaxial tests show a large scattering, which is due to the mineralogical inhomogeneity and the concomitant difference in fracturing. In general, the strength of the serpentinites increases with increasing metamorphic grade.

Similarly, weak zones (e.g. slickensided or veins), which cross-cut most of the serpentinite bodies, were studied with respect to rock-mechanical properties. In particular, the weak zones were investigated in order to determine shear strength and its influence on the whole serpentinite body. The results from triaxial and direct shear tests show that vein formation generally strengthens the tectonically weakened serpentenites. Massive veins provide a greater strength to the serpentinites than fibrous veins. In contrast, fracture planes reduce the strength of intact serpentinites. The lowest shear parameters were found on plane slickensided with friction angles between 21° and 26° for the residual strength. Since the serpentinite bodies represent a weak zone within the studied area, the shear parameters determined for the slickensided in this study may be of significant importance for the understanding of the tectonic evolution.

Finally, the strength parameters were determined on a selection of typical, cataclastically deformed serpentinites. It was found that spatial orientation and frequency of the fracture has a significant influence on the strength. The amount of brittle deformation is of primary importance in judging the geotechnical properties of the studied serpentinite bodies.

RÉSUMÉ

Les masses de serpentine posent souvent, par leur absence de cohésion due à une forte fracturation, de gros problèmes géotechniques. Ces roches, dont l'origine géologique a été longtemps méconnue, ont fait l'objet de nombreuses études géologiques, pétrographiques et, plus récemment, géophysiques. Malgré la forte distribution des masses de serpentine en Suisse, il n'existe que peu de données géotechniques sur ces roches. Pour les recherches suivantes, le choix a porté sur les zones d'ophiolites penniques des Grisons, dans le sud-est de la Suisse. Ces zones se prêtent particulièrement bien à cette étude car le métamorphisme régional alpin et la tectonique ont fait apparaître toutes les caractéristiques propres aux masses de serpentine. Leurs structures géologiques et leurs déformations tectoniques ont été étudiées. Dans ce travail, les manifestations de décohésion des serpentines sont décrites à l'aide d'un modèle.

Les caractéristiques pétrographiques et géotechniques d'une sélection de roches ophiolitiques typiques et intactes ont tout d'abord été déterminées. Les essais de mécanique des roches en laboratoire comprennent des mesures sous pression uni-axiales et tri-axiales avec enregistrement continu des fissurations. Les serpentines intactes ont un comportement très cassant et possèdent des résistances moyennes à très hautes dans le sens de Bieniawski (1967). Les résultats des essais tri-axiaux montrent une grande dispersion due au manque d'homogénéité des serpentines et au genre de fissuration en résultant. En général, une augmentation de résistance en fonction de l'élévation du degré de métamorphisme peut être observée.

Les zones de faible cohésion, comme par exemple les surfaces de glissement et les veines, présentes dans la plupart des masses de serpentine, ont été étudiées du point de vue géologique et de la mécanique des roches. Leur résistance au cisaillement ainsi que leur influence sur les masses rocheuses ont été déterminées. En plus, les résultats des essais tri-axiaux et les essais directs de résistance au cisaillement sont présentés. En général, la formation de veines a un effet salutaire sur les serpentines. Les veines plus massives confèrent en particulier une plus grande résistance aux serpentines affaiblies tectoniquement que les veines fibreuses parallèles. Contrairement aux systèmes de veines, les différentes surfaces de cassures affaiblissent les serpentines intactes. Leur influence est discutée en détail. Les paramètres de cisaillement les plus bas ont été mesurés sur des surfaces de glissement plats avec un angle de friction entre 21° et 26° pour la résistance restante. Comme les masses de serpentines représentent une zone de faible cohésion dans les massifs montagneux et peuvent de ce fait constituer des horizons possibles de déplacement en cas de mouvement tectonique, une signification géologique importante peut être attribuée aux paramètres de cisaillement obtenus dans cette étude.

Les paramètres de résistance de quelques roches de serpentine typiques fortement cataclastiques ont été examinés à l'aide de méthodes de mécanique des roches et des sols. La sorte et la fréquence des surfaces de cassure jouent un très grand rôle. Le critère déterminant pour le jugement des masses rocheuses est le degré de la déformation cassante.

ABKÜRZUNGEN

Mineralien

ANT	Antigorit
AMP	Amphibol
BRU	Brucit
CC	Kalzit
CHR	Chrysotil
CHL	Chlorit
CPX	Klinopyroxen
DO	Dolomit
HAE	Hämatit
LIZ	Lizardit
OLI	Olivin
OPX	Orthopyroxen
SP	Spinell
TAL	Talk
TIT	Titanklinohumit

Lokalitäten

En	Sils
Fu	Furtschellas
Ma	Marmorera
Mu	Mühlen
Se	Septimerpass
Su	Alp Flix
To	Totalp

HGT	Hauptgemengteile
NGT	Nebengemengteile

1 EINLEITUNG

1.1 Die Begriffe „Serpentin", „Serpentinit" und „Ophiolith"

Die obigen Begriffe sorgen für eine grosse Verwirrung in der Literatur, weshalb eine nähere Definition wünschenswert erscheint. Der Begriff „Serpentin" wird hier ausschliesslich als mineralogische Bezeichnung für die Mg-Silikate (Chrysotil, Lizardit und Antigorit) mit der allgemeinen Formel $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$ verstanden. Der Ursprung dieses Begriffes wird ausführlich bei FAUST & FAHEY (1962) diskutiert.

„Serpentinit" ist die Bezeichnung für Gesteine, die hauptsächlich aus Serpentin-Mineralien bestehen. Serpentinite sind metamorphe Umwandlungsprodukte von ultramafischen Gesteinen. In diesem Zusammenhang verstehen wir unter ultramafischen Gesteinen, diejenigen Gesteine im Sinne von WYLLIE (1967), die nur in den alpinotypen Peridotit-Serpentinit-Vergesellschaftungen (Ophiolithe) vorkommen.

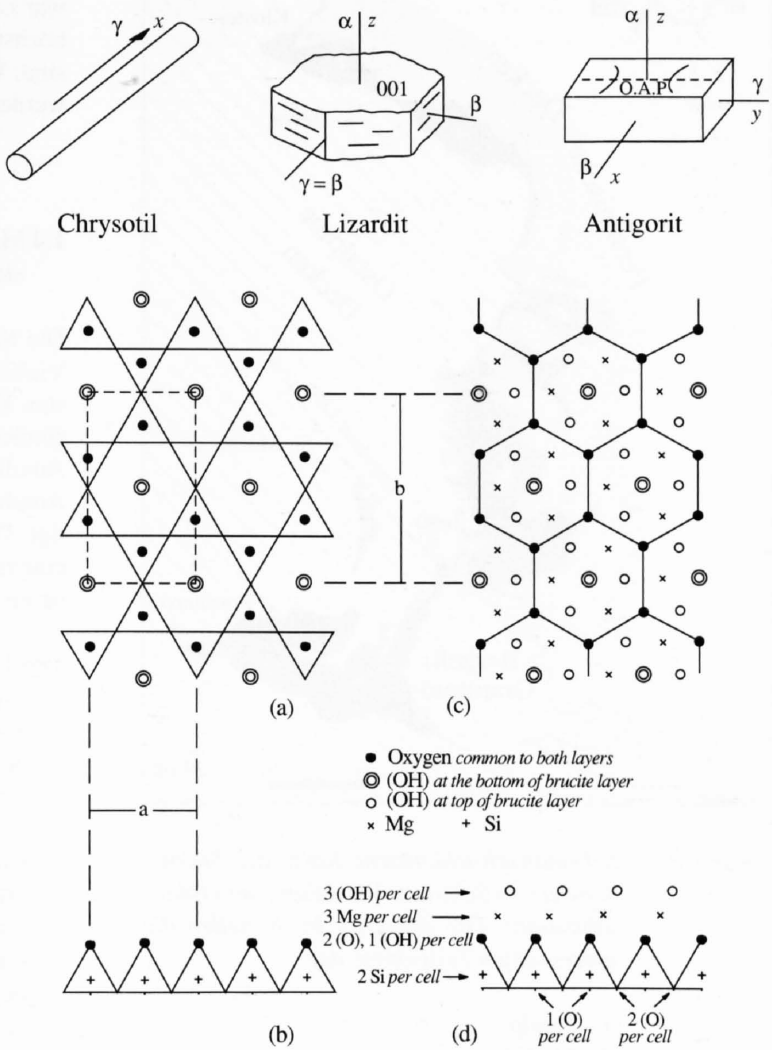
Der Begriff „Ophiolith" wurde ursprünglich von BRONGNIART (1827) für die Serpentinite eingeführt. STEINMANN (1927) gebrauchte ihn für ganz bestimmte Gesteinsvergesellschaftungen, die später als „Steinmann Trinität" bekannt wurden. Die Bezeichnung Ophiolith, wie sie von den Teilnehmern der GEOLOGICAL SOCIETY OF AMERICA PENROSE CONFERENCE (1972) eingeführt wurde, bezieht sich auf eine bestimmte Vergesellschaftung mafischer und ultramafischer Gesteine und die dazugehörigen typischen Sedimentgesteine.

1.2 Serpentinmineralien

Serpentinmineralien sind Magnesiumsilikate mit der allgemeinen Formel $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$ und gehören zu den trioktaedrischen Schichtsilikaten. WHITTACKER & ZUSSMANN (1956) unterscheiden 3 Haupttypen (Fig. 1.1):

- -Chrysotil
- -Lizardit
- -Antigorit

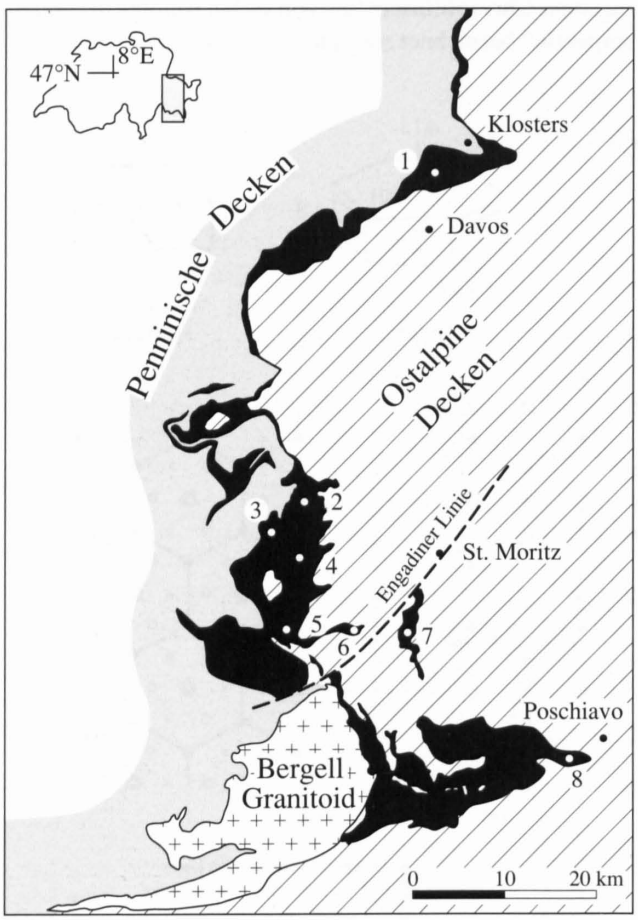
Chrysotil zeigt einen faserigen Habitus und besitzt gekrümmte Schichten (meistens um die X-Achse), die entweder aufgerollt sind oder einen hohlen Zylinder um die x-Achse bilden. Beim Chrysotil können hauptsächlich die beiden Polytypen Klino-Chrysotil und Ortho-Chrysotil unterschieden werden. Die Öffnungen sind sehr oft mit parallelen Chrysotilfasern ausgefüllt. Allgemein kann man Chrysotil den tektonisch stressärmeren Regionen zuteilen. Auf den Rutschharnischen findet man meistens Chrysotilfasern, die von vielen Autoren als „Edelserpentin" bezeichnet werden.



Figur 1.1 *Serpentinmineralien und ihr kristallographischer Aufbau:*
a) Tetraederschicht in der Aufsicht
b) Tetraederschicht im Querschnitt
c) Trioktaederschicht in der Aufsicht
d) Trioktaederschicht im Querschnitt
(Zussmann, 1954; Deer et al., 1980, leicht modifiziert)

Man bezeichnet mit Lizardit ein äusserst feinkörniges, feinblättriges Einerschichten-Serpentinmineral. Lizardit besitzt eine orthohexagonale Kristallstruktur. Wegen der einfachen Struktur vermuten WICKS & WHITTACKER (1977), dass die Bildung der Lizardite in den Anfangsphasen der Serpentinisierung einsetzt, was vor allem zur Bildung von Bastiten (Serpentinpseudomorphosen nach Pyroxen oder Amphibol) führt.

Antigorit zeigt einen blättrigen Habitus und besitzt, aufgrund der gewellten Schichtstruktur, eine grössere Elementarzelle als die anderen Serpentinmineralien (DEER et al., 1980). Antigorit ist ein typisches Mineral für Regionen mit erhöhten Drücken.



Figur 1.2 *Schematisch-tektonische Karte der Südost-Schweiz. In Schwarz: Verteilung der Ophiolithmassen. Die Zahlen 1 bis 8 stellen die untersuchten Teilgebiete dar:*

(1) Totalp
(2) Alp Flix
(3) Mühlen - Val Bercla
(4) Marmorera
(5) Septimer-Pass
(6) Sils
(7) Furtschellas
(8) Malenco-Körper

1.3 Untersuchungsgebiet

Das Arbeitsgebiet umfasst die südpenninischen Ophiolithzonen im Kanton Graubünden (Fig. 1.2).

Im Totalp-Serpentinit bei Davos werden die Serpentinite max. 500 m, die Ophicalcite ca. 300 m mächtig (PETERS, 1963). Im südlicheren Platta-Gebiet erreichen die Serpentinitmassen eine Mächtigkeit von rund 150-200 m (DIETRICH, 1969). Der grösste Serpentinitkörper ist der Malencoserpentinit, welcher in den hochpenninischen Decken tektonisch tiefer liegt als die übrigen Vorkommen und deshalb keinen direkten Zusammenhang zu den restlichen Ophiolithen erkennen lässt.

Bei den oben erwähnten Mächtigkeiten der verschiedenen Serpentinitmassen handelt es sich nicht um die ursprüngliche Mächtigkeit der ultramafischen Gesteinskörper, sondern eher um stark verscherte und ineinander verschuppte Serpentinite. Die Auswahl dieses Untersuchungsgebietes war zweckmässig, weil hier die Serpentinitmassen in ihrer höchsten Vielfältigkeit aufgeschlossen und zugänglich sind. Wegen der speziellen Lage der Malencoserpentinite werden diese in der Arbeit separat behandelt.

1.4 Makroskopische Einteilung der ultramafischen Gesteine

Die Serpentinite zeigen eine sehr grosse petrographische Vielfalt. Wir haben uns bei dieser Arbeit nur auf die typischsten Formen der Serpentinite konzentriert, welche in irgendeiner Weise mit Serpentin-Mineralien zu tun haben. Aus diesem Grund wurden ultramafische Gesteine, wie z.B. Amphibolit-Felse oder Pyroxenit-Felse, nicht berücksichtigt. Die folgende Einteilung der Serpentinite ermöglicht eine rasche petrographische Unterscheidung dieser Gesteine im Feld.

Typ 1: Reine Serpentinite

Eigentliche, sehr dichte Serpentinite, die nur noch aus Serpentinmineralien und ausgeschiedenen opaken Mineralien bestehen. Sie sind entweder durchwegs (schwarz-) grün oder schwarz. Rutschharnische mit grünschwarz glänzenden Verschiebungsflächen sind häufig und zerschneiden das Gestein in unterschiedlich grosse Blöcke. DIETRICH (1969) unterscheidet bei diesem Serpentinittyp im Gebiet des Oberhalbsteins zwischen Chrysotil-Lizardit-Serpentinit und Antigorit-Serpentinit. Da makroskopisch keine Unterschiede erkennbar sind, werden diese Gesteinsnamen nur in speziellen Fällen benutzt.

Typ 2: Pyroxenhaltige Serpentinite

PETERS (1963) beschreibt diesen Typ von Serpentiniten im Totalp-Gebiet bei Davos als Augit-Serpentin. Im frischen Bruch sind diese Gesteine dunkelgrünschwarz und enthalten Einsprenglinge von flaschengrünem Au-

git, bronzefarbigem Enstatit sowie goldgelbem, blättrigem Lizardit (Bastit). Diese Gesteine wittern rostfarben an und erhalten eine sehr rauhe Oberfläche, da die Pyroxen-Einsprenglinge herauswittern. Im Totalp-Gebiet sind dies die einzigen Serpentinite mit reliktisch gut erhaltenem Olivin und Orthopyroxen. Dieser Gesteinstyp ist sehr hart und besitzt ein massiges Gefüge. Viele hell- bis dunkelgrüne, massige oder faserige, mm-dicke Äderchen durchziehen das Gestein. Die Rutschharnische auf den zahlreichen Bruchflächen sind ebenfalls fast immer mit faserigem Edelserpentin überzogen.

Typ 3: Feinkörnige Peridotite

Der feinkörnige Peridotit tritt nur im Totalp-Gebiet bei Davos auf. Diese zum Teil serpentinisierten Peridotite sind an der typischen ockergelben Verwitterungsfarbe zu erkennen. Sie sind zum grössten Teil stark mit Serpentinitadern durchsetzt.

Typ 4: Ophikarbonate

Ophicalcite und Ophidolomite mit makroskopisch gut sichtbaren Calcit- und Dolomit-Adern zeigen normalerweise eine brekzienartige Ausbildung mit einer Matrix von Calcit oder Serpentinit. Die benachbarten Serpentinite sind stark mit Karbonatadern durchzogen. Die Ophikarbonate sind sehr oft in randlichen und tektonisch beanspruchten Zonen anzutreffen. Ihre Bildung erfolgt zum grössten Teil durch eine mechanische Vermischung und Verknetung der Peridotite mit den Sedimenten (PETERS, 1963).

Typ 5: Karbonatführende Serpentinite

Diese Serpentinite von deutlich heller Farbe und geringer Widerstandskraft gegen die Verwitterung weisen dispers im Gefüge verteilte Karbonate auf, die an den verwitterten Oberflächen Vertiefungen hinterlassen. Diese Gesteine sind vielfach mit einem Netzwerk von feinen Calcitadern durchzogen. Man findet sie sehr oft am Rande von Ophikarbonaten, zu denen fliessende Übergänge auftreten.

Typ 6: Vertalkte Serpentinite

Stark vertalkte Serpentinite und Talkschiefer weisen eine hell graugrüne Farbe und eine seifige Oberfläche auf und sind deshalb einfach zu erkennen. Diese Gesteine haben sich am Rande von Diabasintrusionen gebildet. Bei den Talkschiefern ist der Übergang vom Serpentinitmaterial in Diabas sprunghaft oder fliessend. Schieferung und Verfältelung können das Gestein begleiten. Talkbildung bei diesen Gesteinen führen ROST (1960b) und KÜNDIG (1982) auf Si-Zufuhr aus den Diabasintrusionen zurück.

Typ 7: Malenco-Serpentinite

Malenco-Serpentinite (von Selva bei Poschiavo) sind deutlich höher metamorph und werden an ihrer graugrünen Farbe und an ihren grobkörnigen Mineralverwachsungen sofort erkannt. In den meisten Fällen zeigen sie eine Schieferung und/oder eine feine Verfältelung.

1.5 Problemstellung

Die Serpentinitmassen mit ihren speziellen und vielfältigen Erscheinungsformen stellen uns neue und ingenieurgeologisch interessante Probleme. Diese Gesteine, die im ungestörten Zustand sehr grosse Festigkeiten aufweisen können, wurden im Laufe ihrer Bildungsgeschichte mehrmals metamorphosiert und tektonisch deformiert. Sie weisen in ihrer heutigen Lage eine sehr komplizierte Geometrie auf und variieren stark in ihrer Konsistenz von intaktem bis hin zu vollständig zermahlenem Gestein. Die Gesteinsmassen sind von unterschiedlichen Diskontinuitätsflächen (z.B. Klüfte, Adern) durchsetzt. Im wesentlichen bestimmen folgende drei Komponenten das Erscheinungsbild der Serpentinitmassen:

1. Intakter Fels
2. Diskontinuitätsflächen
3. Stark kataklastisch deformierte Scherhorizonte

Bei der Beobachtung der Gesteinsmassen tauchen folgende ingenieurgeologisch relevante Fragestellungen auf:

1. Wie haben sich Metamorphose und Tektonik auf die felsmechanischen Eigenschaften dieser Gesteine ausgewirkt?
2. Inwiefern kann man die einzelnen beobachtbaren Erscheinungen in Serpentiniten getrennt voneinander qualitativ oder quantitativ erfassen?
3. Wie erklärt sich die unregelmässige Kluftbildung in den Serpentiniten? Ist diese typisch für eine bestimmte Serpentinitart mit einem speziellen Gefüge oder gilt das für alle Serpentinittypen?
4. Wie naturgetreu sind die Serpentinite geotechnisch im Labor zu beurteilen?
5. Welchen Einfluss hat die Serpentinisierung auf felsmechanische Eigenschaften der Serpentinite? Kann man im allgemeinen behaupten, dass zunehmende Serpentinisierung eine abnehmende Festigkeit bewirkt?
6. Welche Laborversuche sind zur Klärung der unterschiedlichen Phänomene in den Serpentiniten geeignet?

Diese Arbeit ist eine ingenieurgeologische Arbeit. Einerseits werden geologische Aspekte der Serpentinitmassen untersucht, andererseits technische Parameter einzelner beobachtbarer geologischer Phänomene praxisbezogen bestimmt.

1.6 Vorgehen

Um ein geologisches Gesamtbild der Serpentinitmassen im Feld zu gewinnen, wurden alle Serpentinit-Regionen in Graubünden und im Malenco-Gebiet untersucht. Neben eigenen Feldbeobachtungen hat eine grosse Fülle von Publikationen zu einem besseren Verständnis der geologischen Verhältnisse der Serpentinite im Untersuchungsgebiet beigetragen.

Für die geotechnische Beurteilung der Serpentinite mussten die gebräuchlichsten technischen Prüfungen herangezogen werden. In erster Linie mussten die geeignetsten Laborversuche für verschiedene Gesteine und Phänomene in den Gesteinsmassen bestimmt werden. Die verschiedenen Versuchsarten und ihre Randbedingungen, sowie die zu untersuchenden Gesteinsarten mussten zu einem logischen Versuchsprogramm zusammengestellt werden.

Die Versuchsarten waren so zu wählen, dass die geotechnischen Parameter von intaktem Gestein und von Schwächezonen (Diskontinuitätsflächen und Kataklase in den Scherhorizonten) miteinander verglichen werden konnten.

Für die Bestimmung der Deformations- und Festigkeitsparameter wurden verschiedene fels- und bodenmechanische Versuchsmethoden herangezogen. Die Versuchsbedingungen wurden so gewählt, dass die Ergebnisse miteinander verglichen werden konnten.

Die Probenentnahme wurde in ingenieurgeologisch interessanten Aufschlüssen, vor allem in Schwächezonen, durchgeführt. Die grosse Vielfalt der Serpentinitarten und der darin vorkommenden Diskontinuitätsflächen haben uns gezwungen, einen sehr grossen Aufwand bei der Probenentnahme zu betreiben. Um den Einfluss felsmechanisch bedeutender Komponenten zu bestimmen, wurden Proben so ausgewählt, dass jeder Faktor einzeln untersucht werden konnte. Dies wurde durch gezielte Probenentnahme an unterschiedlichen Stellen erreicht; z.B. mussten Proben ohne jegliche Klüfte oder Adern getrennt von Proben mit Klüften oder Adern behandelt werden.

Die Proben wurden nach eingehenden petrographischen Untersuchungen für verschiedene Laborversuche ausgewählt.

2 GEOLOGIE

2.1 Historisches

Ophiolithe im Südosten der Schweiz (Kt. Graubünden) werden als Reste der mesozoischen Zentraltethys gedeutet, welche früher als „géosynclinal piémontais" definiert wurde (HAUG, 1909).

STEINMANN (1905, 1925) betrachtet Radiolaritschiefer (Radiolarian cherts) im Hangenden der Serpentinite/Peridotite als Sedimente, die sich in abyssalen Bereichen der mesozoischen Tethys gebildet haben. Diese Fazies kann im ganzen Alpenraum und bis in den ligurischen Apennin verfolgt werden.

Bevor das Konzept der Plattentektonik entwickelt war, wurden die Ophiolithe als präorogene Intrusiva oder Extrusiva betrachtet, die sich bevorzugt entlang Bruchzonen der piemontesischen Geosynklinale gebildet haben (ARGAND, 1916).

DE ROEVER (1956) stellte den Intrusiva- oder Extrusiva-Charakter von Teilen der Ophiolith-Serien in Frage. Er interpretierte alpine Peridotite als tektonisch verfrachtete Teile, welche ursprünglich aus grösseren Tiefen stammen. So konnte er das Fehlen einer Kontaktmetamorphose um die Peridotitlinsen erklären.

Später, als man das globale Gerüst der lithosphärischen Platten erkannt hatte, wurden die alpinen Ophiolithe als Beispiel für einen mittelozeanischen Rücken interpretiert, der von Transformbruch-Systemen durchschnitten ist (LAUBSCHER, 1969; DIETRICH, 1976). Hinweise auf Transformbruch-Domänen in den Ophiolithen der Westalpen liefert LEMOINE (1980).

Die mehr oder weniger rodingitisierten Dike-Schwärme in den Serpentiniten, sowie das Auftreten von brekzienartigen Ophicalciten (monogene Brekzien von Serpentin- und Karbonatmaterial) belegen eine Herkunft der Serpentinite aus höheren Niveaus der ozeanischen Kruste, d.h. das ultramafische Mantelmaterial gelangte wahrscheinlich in Bereichen „transformer Brüche" durch Aufpressung oder vertikale Bewegungen in höhere Krustenniveaus, z.T. auch bis an die Ozeanböden (DIETRICH, 1976).

Oberjurassische und unterkretazische pelagische Sedimente bedecken verschiedene lithologische Einheiten der Ophiolithe. Dies wird als ein Indiz für die Zerstückelung der ozeanischen Kruste in diesem Bereich der Tethys angesehen. Ozeanische tektonische Prozesse führten zur Platznahme der Serpentinite und der basaltischen Extrusionen (WEISSERT & BERNOULLI, 1985).

2.2 Alter der Ophiolithe

Das Alter der Ophiolithe ist schwer bestimmbar. Die ultramafischen Massen sind tektonisch verstellt, und ihr Aufschlussbereich gibt uns kein eindeutiges Alter der Platznahme an. Nur die Stratigraphie der pelagischen Sedimente gibt uns folgende Anhaltspunkte:

GEES (1955) vermutet aufgrund von Peridotitmaterial, welches als Detritus in Radiolariten und in assoziierten Tonschiefern vorkommt, dass die Peridotite annähernd gleichzeitig mit der Bildung des Radiolarits (Jura, Obertithon) oder früher an die Oberfläche gebracht wurden. Als Peridotitalter wird deshalb mittlerer bis später Malm angenommen und die Platznahme der Peridotite wird mit der jungkimmerischen Gebirgsbildung korreliert.

In diesem Zusammenhang hält DIETRICH (1969), aufgrund der stratigraphischen Untersuchungen im Platta-Gebiet, ein Zeitintervall für das Eindringen (eventl. bis Oberfläche) der ultramafischen Massen zwischen Mittel- oder Spätjura für möglich. Frühe Kreide kann jedoch nicht ausgeschlossen werden.

2.3 Lagerungsverhältnisse der Serpentinitmassen

Im Untersuchungsgebiet wurde über die Lagerungsverhältnisse der ophiolithischen Gesteinsserien ausführlich von PETERS (1963), DIETRICH (1969) und KÜNDIG (1982) berichtet. Wir verzichten hier deshalb auf eine detaillierte Beschreibung und verweisen nur auf die wichtigsten Kontakte der Serpentinite mit den anderen Gesteinen.

Innerhalb der Ophiolithdecken herrscht eine intensive Schuppentektonik vor, wobei die ehemaligen Abscherhorizonte meist an die eigentlichen Serpentinite und Ophicalcite gebunden sind. Primäre, nicht tektonisierte Kontakte findet man nie zwischen Serpentiniten und Vulkaniten (Pillowlaven, Hyaloklastite). Primäre Kontakte erkennt man hingegen zwischen Serpentiniten und massiven Diabasgängen. An der Kontaktstelle ist entweder eine scharfe Grenze oder

ein allmählicher Übergang zu beobachten. Vertalkung, Chloritisierung, Vererzung und Verschieferung begleiten die Serpentinite an den Kontakten.

Ausserhalb der Ophiolithdecken bilden die Serpentinite nur Kontaktzonen tektonischer Natur mit den Nebengesteinen. Diese Zonen, bis zu einigen Metern mächtig, sind durch stark kataklastische Deformation der Serpentinite gekennzeichnet. Durch tektonische Vermischung mit dem Nebengestein kommt es oft zu metasomatischen Reaktionen zwischen den Serpentiniten und dem Nebengesteinen (Mineralneubildung).

2.4 Metamorphose

Während in den nördlichen Bereichen (Davos und Arosa) und in den höchsten Schuppen der Platta-Decke alle ophiolithischen Gesteine nahezu undeformiert vorliegen, tritt gegen Süden eine kontinuierliche Deformation und Rekristallisation auf (Dietrich, 1976).

Im Totalp-Serpentinit bei Davos werden grosse Teile der Serpentinite von der alpinen Metamorphose nicht berührt. Nur die eigentlichen Serpentinite in den stark tektonisch beanspruchten Zonen und Edelserpentine auf Rutschharnischen sowie Kluftminerale werden als alpin metamorphe Produkte angesehen (Peters, 1963).

Innerhalb der Platta-Decke im Oberhalbstein können wir vom Hangenden zum Liegenden sowie von Norden gegen Süden/Südosten eine fortschreitende regionale Metamorphose von der schwach metamorphen Pumpellyit-Zone bis in den Grünschiefer-Faziesbereich beobachten (Dietrich, 1969). Die Grenze zwischen diesen Faziesbereichen liegt etwa auf der Linie Forcellina-Pass - Julier-Pass. Südlich dieser Linie tritt Antigorit als gesteinsbildendes Mineral auf.

Im Malencokörper kann auch von Osten gegen Westen eine zunehmende Regionalmetamorphose von der Grünschiefer-Fazies bis in die tiefere Amphibolit-Fazies beobachtet werden, die im westlichen Teil von der durch die Bergeller Intrusion verursachten Kontaktmetamorphose überprägt wird (Peretti, 1988).

3 TEKTONIK UND STRUKTUREN

3.1 Allgemein

Die ultramafischen Gesteine sind sowohl bei der Platznahme in der ozeanischen Kruste als auch bei der alpinen Orogenese tektonisch beansprucht worden. DIETRICH (1976) beobachtete eine allgemeine Zunahme der Deformation von Norden gegen Süden in den penninischen Ophiolithzonen. Dabei weisen die Serpentinitmassen eine komplizierte Schuppentektonik auf. Die stark verstellten, zerbröckelten und zerscherten Gesteinsmassen stehen nicht im Einklang mit der regionalen Tektonik; d.h. viele grossräumige tektonische Strukturen sind nicht erkennbar in den Serpentinitmassen. KÜNDIG (1982) bezeichnete sie in diesem Zusammenhang als eine Art tektonische Pufferzone. Aus diesem Grund findet man in der Literatur nur äusserst selten strukturelle Daten für die Serpentinite. Die tektonische Beanspruchung der Serpentinite umfasst sowohl interne Tektonik, wie z.B. die Volumenzunahme bei der Serpentinisierung, als auch externe Tektonik.

Die spezielle Tektonik der Serpentinitmassen wird dadurch charakterisiert, dass anstelle der sonst beobachtbaren grossräumigen Strukturen andere Gefügearten in Erscheinung treten, wie z.B. lokale Rekristallisationsprozesse und Bildung von Diskontinuitätsflächen unterschiedlicher Art (Klüfte, Rutschharnische, Adern). Die ursprüngliche mineralogische Zusammensetzung der Peridotite, die P-T-Bedingungen während der Metamorphose, die Stoffzufuhr sowie die Art der Druckbeanspruchung waren die wichtigsten Faktoren bei der Gesteinsdeformation, die sowohl spröde als auch duktile Phasen beinhaltete.

Die Malencoserpentinite zeigen grossräumige Strukturen, die detailliert von BUCHER & PFEIFER (1973) und PERETTI (1988) untersucht worden sind.

3.2 Gefüge

Die Serpentinisierung der mafischen Mineralien und die daraus resultierenden mikroskopischen Serpentinstrukturen werden ausführlich von DUNGAN (1979a), TRÖGER (1969), WICKS & WHITTAKER (1977), WICKS et al. (1977) und in unserem Gebiet von PETERS (1963) beschrieben. Deshalb wird hier auf eine detaillierte Beschreibung dieser Strukturen verzichtet. Statt dessen werden im folgenden kurz die wichtigsten Serpentinstrukturen und ihre Verbreitung im Untersuchungsgebiet vorgestellt.

Die ersten tektonischen Beanspruchungen der peridotitischen Gesteine in der ozeanischen Kruste sind sehr schön im nördlichen Teilgebiet (Totalp, Davos) in den feinkörnigen Peridotiten dokumentiert (Fig. 3.1).

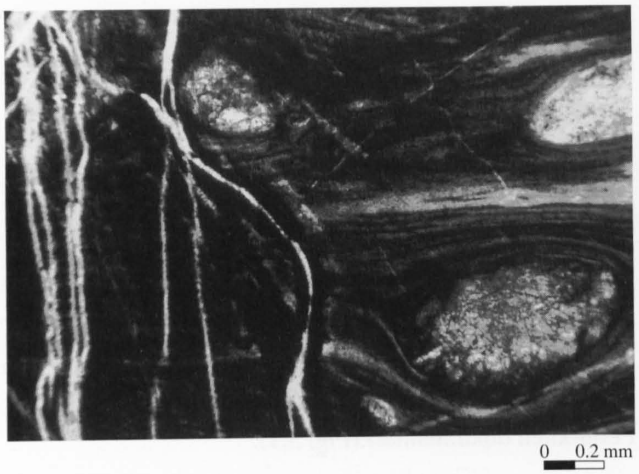
Die am häufigsten beobachteten Gefüge im ganzen Gebiet sind Serpentinpseudomorphosen nach Olivin und Pyroxen, sogenannte „Maschenstrukturen" bzw. „Bastite" (Fig. 3.2 und Fig. 3.3).

Die Serpentinisierung aus Olivin beginnt beim massigen Peridotit stets von den wasserführenden Intergranularen aus, d.h. von Kornrändern, Spaltrissen und regellosen Brüchen. Längs jeder Intergranulare entsteht eine Schicht, die sich im Querschnitt als ein Strang darstellt, der anfangs wenige Hundertstel-Millimeter, zuletzt einige Zehntel-Millimeter breit ist. Jeder Strang ist bilateral-symmetrisch aufgebaut: zwei Aussenzonen aus Chrysotilfasern, die sich möglichst senkrecht zur ehemaligen Intergranulare ausrichten, enthalten dazwischen eine schmale quasi-isotrope Zentralzone.

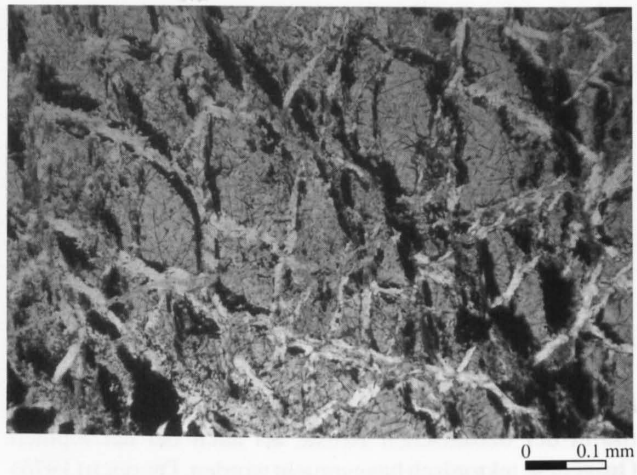
Das bei der Serpentinisierung meist frei werdende Eisen scheidet sich als Magnetit (seltener Hämatit) manchmal gleichmässig in den Strängen ab, reichert sich aber öfters in der Zentralzone und/oder an den Aussenkontakten an. Die Summe aller dieser Chrysotilstränge bildet ein Netz (daher „Maschenstruktur"), das entweder regellos über die Olivinkörner verteilt ist oder, bei vorheriger tektonischer Beanspruchung des Peridotits, eine sich mehr oder weniger regelmässig kreuzende bis parallelstreifige Anordnung zeigt, sogenannte „Bänderstruktur" (curtain-texture). Fig. 3.4 zeigt eine solche Struktur, die wir ziemlich oft vor allem in den reinen Serpentiniten getroffen haben.

Die oben erwähnten Maschenstrukturen und Bastite sind hauptsächlich in den pyroxenhaltigen Serpentiniten und vorwiegend in den Regionen mit tieferem Metamorphosegrad anzutreffen.

In den Regionen mit stärkerer Deformation und steigendem Metamorphosegrad werden die pseudomorphen Strukturen durch Antigorit-Gefüge überprägt, welche Druck und Zug relativ flexibel aufnehmen können. Gesteinsbildende Antigoritkristalle können alle Grössenordnungen von 1 μ m bis 0.2 mm aufweisen. Dadurch, dass die Antigoritplättchen oder -täfelchen quer übereinander wachsen, wird dieses Gefüge „Durchdringungsgefüge" genannt (Fig. 3.5). Sehr häufig sieht man eine subparallele Anordnung der Blättchen

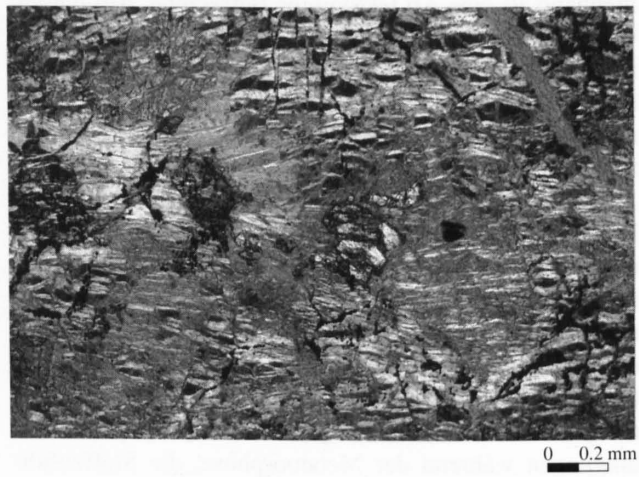


Figur 3.1: *Feinkörnige Peridotite mit Tektonit-Gefüge, typisch für die ozeanische Kruste (oberer Mantel). Gerundete Pyroxenkörner schwimmen in einem Mörtel aus peridotitischem Material. Das Mylonitgefüge wird von unregelmässigen Serpentin-Adern (hell) durchschnitten. Nicols x.*

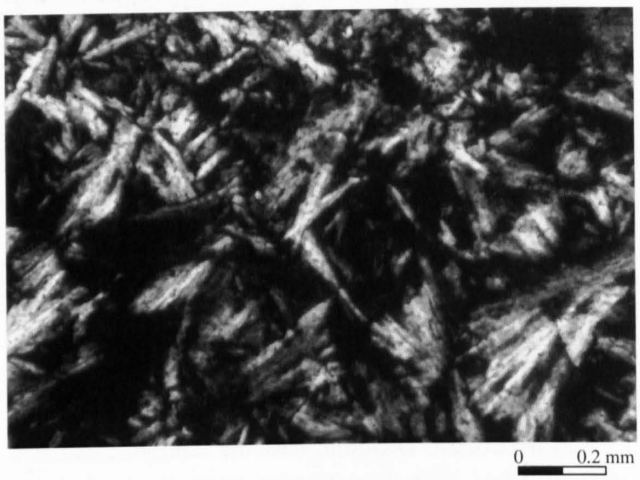


Figur 3.2: *Maschenstruktur mit Rutil-Nädelchen im Zentrum: Pseudomorphosen nach Olivin. Nicols nicht x.*

Figur 3.3: *Bastit: Pseudomorphosen nach Pyroxen. Nicols x.*



Figur 3.4: *Bänderstruktur. Mit Gipsplättchen, Nicols x.*



Figur 3.5: *Durchdringungsgefüge: die Antigorit-Plättchen überwachsen sich gegenseitig. Nicols x.*

unter einem Winkel von 90° (seltener von 45° und 60°), die sogenannte „Gitterstruktur". Gesteinsbildend tritt Antigorit südlich von Bivio auf. Dies zeigt eine Erhöhung des Metamorphosegrades an.

Seltener kann man auch das sogenannte „Verzahnungsgefüge" beobachten, in dem die xenoblastischen Serpentinmineralien ein mosaikartiges Gefüge bilden.

3.3 Bruchflächen und Rutschharnische

Die Serpentinite lassen sich entlang sehr feiner Fugen in unterschiedlich grosse Polyeder trennen. Sehr oft sind die Trennflächen mit blossen Augen nicht mehr zu sehen. Erst nach einer Belastung, z.B. durch Sägen oder Bohren, fällt das Gestein entlang solcher Fugen auseinander. Die Anzahl dieser Fugen im Raum bestimmt die Grösse der Blöcke in den Schutthalden. Diese spezielle Art der Fugen, die sehr typisch für die Serpentinitmassen ist, zeigt keine räumliche Gesetzmässigkeit und zerteilt die Gesteinsmassen in zentimeter- bis dezimetergrosse Bruchkörper. Die komplizierte Bruchgeometrie kann man mit Hilfe eines einfachen Experimentes mit Glas veranschaulichen (Fig. 3.6). Glas besitzt wie das ursprüngliche Peridotitgestein eine massige Struktur.

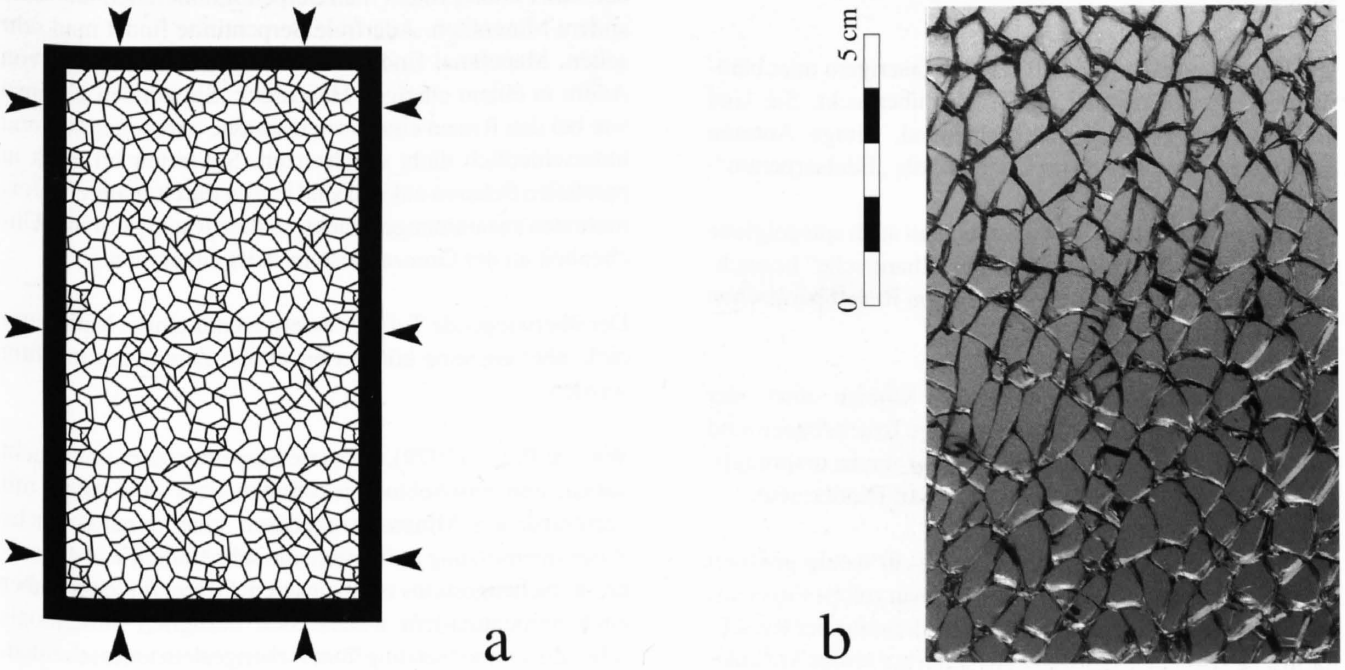
Das Glas wird in einem Metallrand fest eingespannt und durch gleichmässige Hitze und die daraus resultierende Volumenvergrösserung zum Zerspringen gebracht. Die Volumenvergrösserung am Glas kann mit derjenigen der ultramafischen Körper bei der Serpentinisierung verglichen werden. Die unregelmässige Bruchgeometrie ist sehr typisch für die Serpentinitmassen. Sie kann im mikroskopischen und makroskopischen Bereich beobachtet werden (Fig. 3.7).

Dieses Muster spiegelt sich in allen Serpentiniten (ausser den vertalkten Serpentiniten) wider. Das Ausmass der Zertrennung ist scheinbar abhängig vom Gesteinsgefüge und der jeweiligen, physikalischen Bedingung, in der das Gestein deformiert wurde. Das unregelmässige Netz von Klüften ist zum Beispiel oft bei den reinen Serpentiniten engmaschiger als bei den pyroxenhaltigen Serpentiniten.

Die Bildung von Rissen ist Ausdruck spröder Deformation. Neben der Volumenzunahme während der Serpentinisierung waren sicher auch externe tektonische Ereignisse für ihre Entstehung verantwortlich. In den stärker deformierten Serpentiniten findet man ein gerichtetes Netz, in dem die Bruchkörper flaserig aussehen.

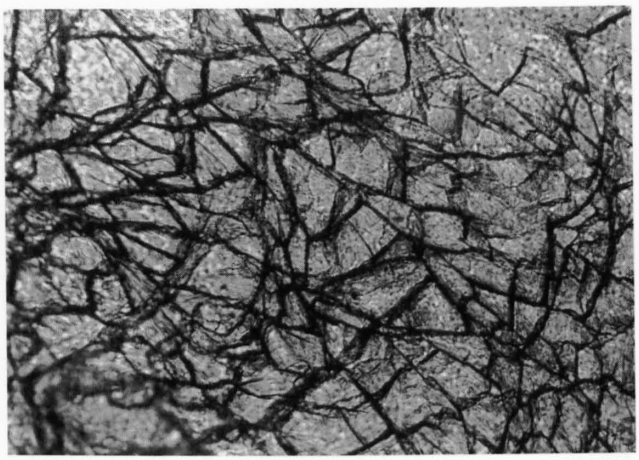
Die durch die Rissbildung entstandenen, unregelmässigen Bruchkörper zeigen auf ihren Flächen entweder Gleitflächen, die sogenannten Rutschharnische oder unregelmässige, rauhe Oberflächen, die eine Spalte oder eine Öffnung darstellen.

Die Rutschharnische auf einem einzigen Bruchkörper zeigen immer verschiedene Gleitrichtungen. Sie sind manchmal von Querstörungen überlagert, die jüngere Gleitbewegungen aufzeigen. Die Rutschharnische stellen Gleitflächen dar, entlang denen ein Teil der tektonischen Deformationen durch Gleitbewegungen aufgenommen wurde. Die räumliche Begrenzung der Rutschharnische zeigt, dass in den meisten Fällen auf den Rutschharnischen nur ein kleiner Bewegungsbetrag anzunehmen ist. Als Ausgangslage der Serpentinitdeformationen wird ein Entfestigungsmuster (vgl. Fig. 3.6) während der Serpentinisierung angenommen. Bei den späteren Beanspruchungen kann es entweder zu einer intensiveren Zerbrechung des Gesteins kommen oder es erfolgt eine Verlagerung und Drehung der



Figur 3.6: Unregelmässige Geometrie:
a) Schematisches Bild der Glasscheibe, welche fest in einem Metallrand eingespannt und durch thermische Spannung zum Zerspringen gebracht wurde. Das Glas war 6 mm dick, 30 cm lang und 20 cm breit.
b) Resultierende Maschenstruktur

a)



b)

Figur 3.7: Unregelmässiges Netz von Brüchen im makroskopischen (a) und mikroskopischen (b) Bereich:
a) Reiner Serpentinit, Davos, Totalp; Koord.: 782'280/191'520. Im oberen Teil des Aufschlusses klaffen die sonst geschlossenen, unregelmässigen Risse durch Entlastung und Auffüllen mit Verwitterungsmaterial weit auseinander. Auffällig in diesem Netz ist die räumliche Begrenzung der Risse.
b) Reines Antigorit-Gefüge (Durchdringungsgefüge). Nicols nicht x.

Bruchkörper innerhalb des Verbandes. In den meisten Fällen kann man beide Vorgänge mikroskopisch und makroskopisch beobachten. Im zweiten Fall kommt es, aufgrund der vorhandenen, komplizierten Geometrie (Fig. 3.6) zu komplexen Bewegungen, welche durch Adern sehr schön dokumentiert wird (vgl. Kap. 3.4). In diesem Zusammenhang ist es wichtig zu erwähnen, dass zudem grossräumige Scherbewegungen entlang grösserer Scherhorizonte (Verschiebungsbahnen) stattfanden. Diese bestehen aus flaserigen Bruchstücken, die makroskopisch eine Paralleltextur aufweisen.

Die Rutschharnische sind oft z.T. mit faserigem oder blättrigem Chrysotil parallel zur Fläche überdeckt. Sie sind gelblich oder grünlich durchscheinend. Einige Autoren bezeichnen diese Form von Chrysotil als „Edelserpentin".

Neben den Rutschharnischen findet man auch spiegelglatte Bruchflächen, die wir hier als „Spiegelharnische" bezeichnen. Diese zeigen im Gegensatz zu den Rutschharnischen keine Gleitrichtung (vgl. Kap. 6.4.2).

Die Gleitflächen auf den Polyedern können eben oder uneben sein. Treppenartige oder wellige Bruchebenen sind sehr häufig. Die Gleitflächen zeigen in ihrem ursprünglichen Schersinn nie eine Verzahnung und Hindernisse.

Im Gebirge sind die Rutschharnische sehr wenig geöffnet (<0.25mm). Nach ISRM (1978) kann man solche Fugen als geschlossen bezeichnen. Die Längsausdehnung der Rutschharnische erreicht in den meisten Fällen nur einige Millimeter bis einige Dezimeter.

Die Risse dienten nicht immer als Gleitflächen wie Rutsch- oder Spiegelharnische, sondern können manchmal auch als Öffnungen oder Spalten ausgebildet sein. Man findet solche oft in den pyroxenhaltigen Serpentiniten, wo sie eine sehr rauhe und unebene Bruchfläche aufweisen. Nach ISRM (1978) kann man diese Risse ebenfalls als geschlossen bezeichnen.

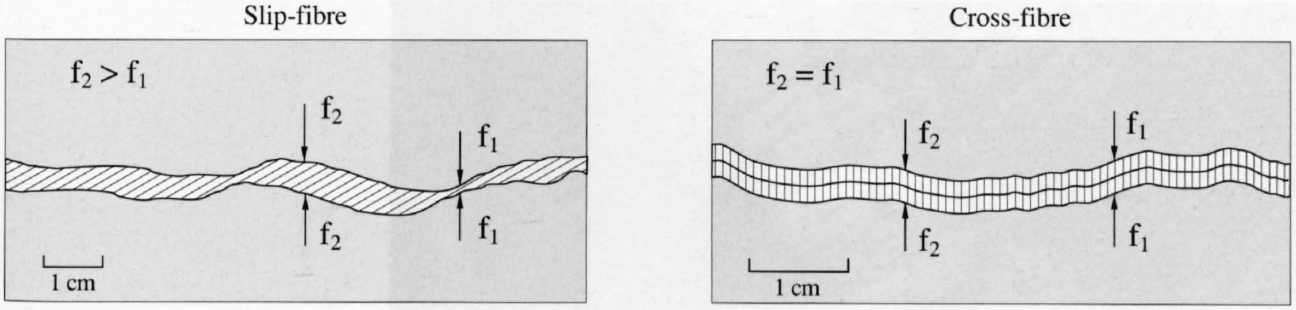
3.4 Aderbildung

Verheilte Risse und Spalten werden hier als Adern bezeichnet. Als Füllung findet man Serpentinmineralien und/oder andere Mineralien. Aderfreie Serpentinite findet man sehr selten. Manchmal findet man mehrere Generationen von Adern in einem einzigen Handstück. Sie können genauso wie bei den Rissen eine Gesteinsmasse unregelmässig und unterschiedlich dicht durchsetzen. Sie treten oft auch in parallelen Scharen auf und sind häufig durch spätere Deformationen zusammengestaucht, so dass Rauhigkeit und Unebenheit an der Grenze Gestein/Ader zunehmen.

Der überwiegende Teil der Adern ist nur einige Millimeter dick, aber einzelne können bis einige Zentimeter mächtig werden.

Wick & Plant (1979), die viele Serpentinadern untersucht haben, sind zum Schluss gekommen, dass viele Adern mit verschiedenen Mineralparagenesen eine mineralogische Zusammensetzung aufweisen, die sehr ähnlich wie diejenige des Nebengesteins ist. In unserem Gebiet finden wir aber auch Serpentinadern welche sich bezüglich mineralogischer Zusammensetzung vom Nebengestein unterscheiden.

Die Serpentinadern zeigen sehr unterschiedliche mineralogische Zusammensetzungen und Strukturen. So gesehen zeigt jede Ader ihre eigene Geschichte. Es ist jedoch unmöglich, die geologische und felsmechanische Bedeutung



Figur 3.8: Ader aus Slip-fibre und Cross-fibre (Proben 63Su-1 bzw. 39Ma).

jeder einzelnen Ader zu untersuchen. In diesem Kapitel werden die häufigsten Adern, denen eine wichtige geotechnische Bedeutung zukommt, beschrieben:

Chrysotiladern

Die Chrysotiladern stellen die häufigsten Aderbildungen im Untersuchungsgebiet dar. Hydrothermal im Serpentinit mobilisierter und über eine Gelphase auf Klüften wieder ausgeschiedener Chrysotil hat Asbest-Textur (TRÖGER, 1969). Die Fasern stehen entweder senkrecht bis steil zur Rissfläche: Querfaser-Asbest (=cross-fibre) oder sie laufen der Risswand etwa parallel: Längsfaser-Asbest (=slip-fibre).

Fig. 3.8 zeigt den Unterschied zwischen einer sogenannten "Crossfibre-Ader" und einer "Slipfibre-Ader". Eine Crossfibre-Ader bildet in dieser einfachen Form eine Öffnung ab, während Slipfibre-Adern eine Öffnung und gleichzeitige Scherung anzeigen. In dieser einfachen Form treten Crossfibres relativ selten auf. Sehr oft (vgl. Fig. 3.9) sieht man einen viel komplizierteren Aufbau. Verschiedene Generationen von parallelen Chrysotilfasern in den Streifen beweisen, dass die Öffnung in mehreren Phasen stattgefunden hat und dass jeweils die beiden Seiten der Bruchfläche leicht gegeneinander verschoben wurden. Auf diese Weise wird die unregelmässige Kontur der Bruchfläche im Raum mehrmals wiederholt; die Dicke einer Crossfibre-Ader bleibt überall ungefähr gleich. Die Fasern können symmetrisch zu einer Mittelnaht senkrecht zur Wand hinauswachsen (Fig. 3.8) oder einen asymmetrischen Aufbau aufweisen (vgl. Fig. 3.9).

Wenn die parallelen Fasern subparallel oder schräg zur Bruchfläche wachsen, dann spricht man von einer sogenannten Slipfibre-Ader (Fig. 3.10), bei der man auf einfache Weise den Schersinn bestimmen kann (dextral in Fig. 3.10). Im Gegensatz zu den Crossfibre-Adern findet man wegen der Scherung unterschiedliche Dicken enlang einer Ader (Fig. 3.8). Man kann auch Slipfibres aus Nichtserpentinmineralien wie z.B. Calcit und Diopsid beobachten (Fig. 3.11).

Sowohl die Crossfibre-Adern als auch die Slipfibre-Adern bestehen in den meisten Fällen aus sehr feinkörnigen Fasern, welche räumlich einen grossen Freiheitsgrad zum Wachsen besitzen. Im Schnitt täuschen die Adern eine einfache Strukturierung vor. Dreidimensional können sogar die in einem Dünnschliff scheinbar einfachen Slipfibre-Adern in sich komplizierte Strukturen aufweisen (ähnlich wie Crossfibre-Adern in Fig. 3.9).

In millimeterdicken Lagen erscheint die graugrüne, feinfaserige Chrysotilader sehr massig. Die Wachstumsrichtung der Fasern ist aber entweder in angewittertem Zustand oder unter dem Mikroskop zu beobachten.

Antigoritadern

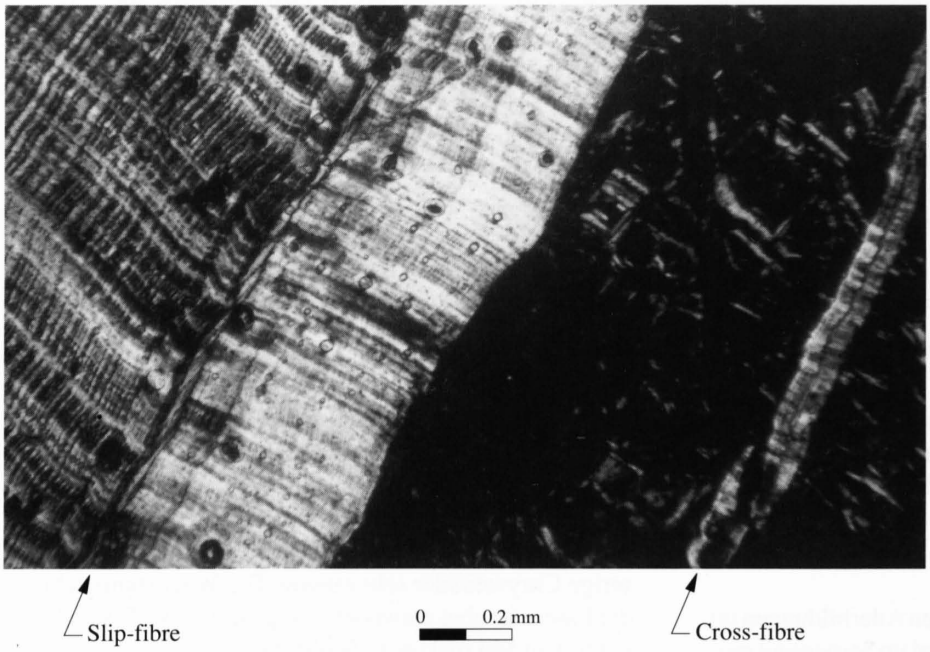
Kluftantigorit findet man überall südlich von Tiefencastel im Untersuchungsgebiet. Seine Bildung im Oberhalbstein führen DIETRICH & PETERS (1971) auf die niedrige H_2O- und CO_2-Aktivität zurück. Er kann Parallelgefüge, Fächer (z.T. mottenflügelartige Verwachsungen), Büschel, Gitter oder konzentrische Aggregate bilden. Die Antigoritadern, die in der Regel bis ein Millimeter mächtig sind, können durchaus einige Zentimeter dick werden. Massige Adern zeigen, unter dem Mikroskop betrachtet, eine starke Verzahnung mit dem Nebengestein. Neben diesen massigen Strukturen kann man auch Adern mit Antigorit in faseriger Form finden, die eine sehr grosse Ähnlichkeit mit den Chrysotiladern zeigen und die ebenfalls einige Zentimeter dick werden können.

Calcitadern

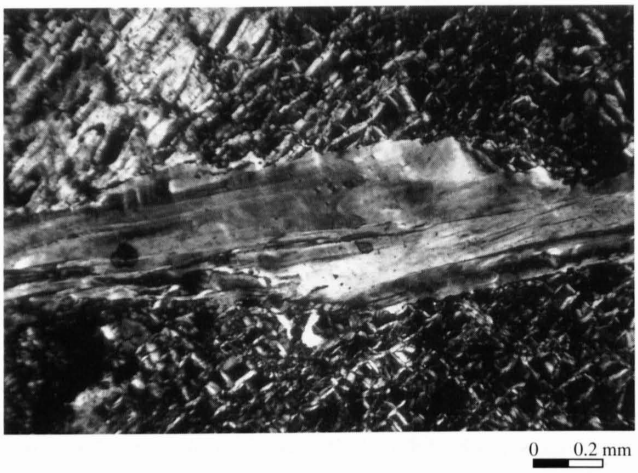
Neben den Serpentinitadern zeigen Calcitadern im ganzen Gebiet eine sehr grosse Verbreitung. Calcit bildet oft sehr feine Adern in den Serpentinitmassen. Bei grösseren Karbonatgehalten und bei Vernetzung von mehreren Adern ist es besser von einem Ophikarbonat zu sprechen. Das Karbonatmaterial stammt entweder aus der Serpentinisierung oder aus den Meeressedimenten.

Talkadern

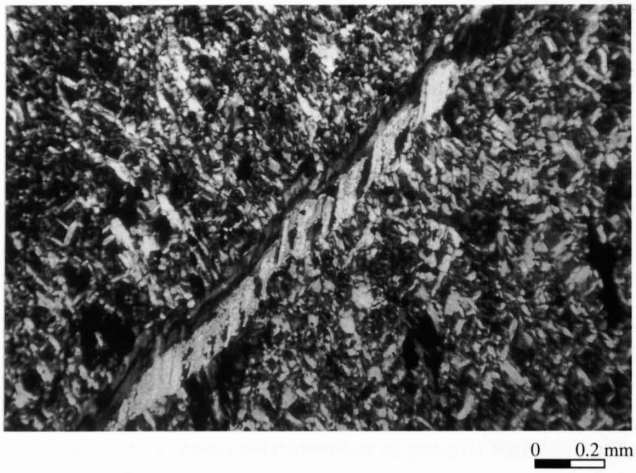
Südlich von Tiefencastel werden Spalten oder Klüfte mit Talkfüllung beobachtet (DIETRICH & PETERS, 1971). Manchmal treten reine Serpentinite mit deutlich hellerer Farbe auf; die helle Farbe lässt sich darauf zurückzuführen, dass die Serpentinite mit sehr feinen Talkadern (Fig. 3.12) vollkommen durchnetzt sind. Die Talkadern können einige Millimeter dick werden.



Figur 3.9: *Cross-fibre und Slip-fibre. Probe 39Ma, Nicols x.*



Figur 3.10: *Slip-fibre aus Chrysotil. Nicols x.*



Figur 3.11: *Slip-fibre aus Chrysotil- und Calcit-Fasern (weiss). Nicols x.*

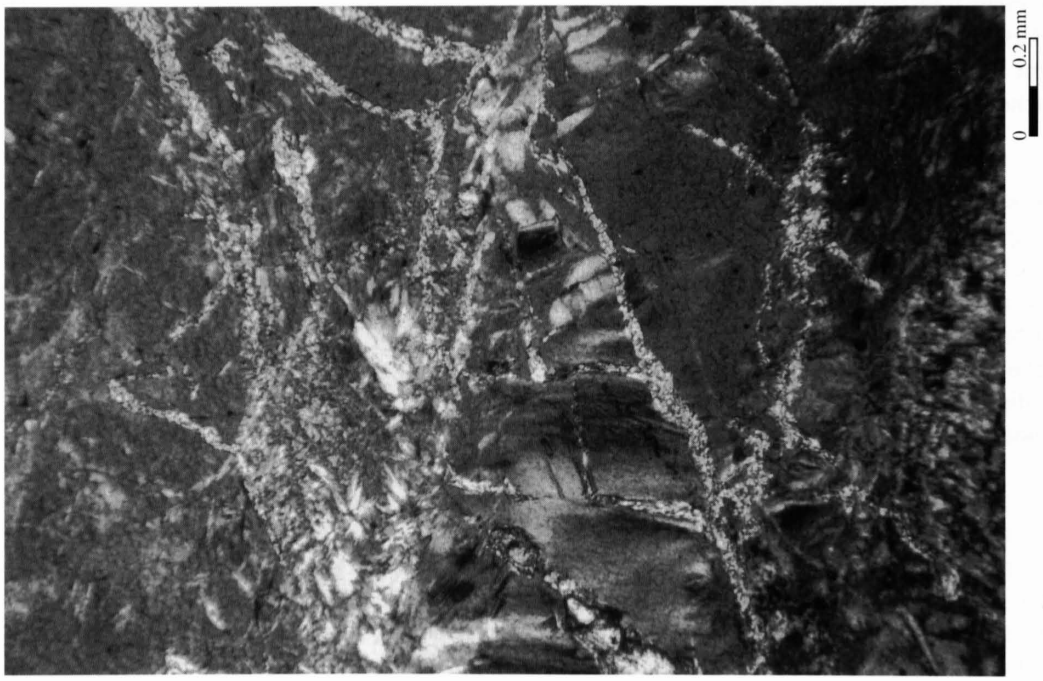


Fig. 3.12: *Feine Talkader. Probe 91Fu, Nicols x.*

4 PETROGRAPHISCHER TEIL

4.1 Allgemein

Die Bestimmung folgender Punkte stand im Mittelpunkt der petrographischen Untersuchungen:

- Mineralogische Zusammensetzung (Modalanalyse): Identifizierung und mengenmässige Bestimmung der einzelnen Mineralien.
- Gefüge: Die Grösse und Form der einzelnen Mineralien und ihre räumliche Anordnung wurden bestimmt. Hier wurde speziell auf die Verteilung der typischen Serpentinstrukturen in den Gesteinsproben und in den Adern geachtet.
- Dichte, Porosität

4.2 Makroskopische und mikroskopische Beschreibung der Gesteinsproben

Die Petrographie und Mineralogie der Serpentinite wurde bereits in zahlreichen Studien abgehandelt (z. B. Peters, 1963; Dietrich & Peters, 1971; etc.). In dieser Arbeit wird angestrebt, die Gesteinsproben makroskopisch und mikroskopisch kurz zu beschreiben. Die Beschreibung soll vor allem über die mechanischen Eigenschaften der Gesteine Aufschluss geben.

Für die mineralogische Bestimmung und die strukturellen Untersuchungen der Gesteinsproben wurden Dünnschliffe aller Gesteinsproben am Polarisationsmikroskop untersucht. Wegen der Feinkörnigkeit der Serpentinmineralien und der schwierigen Unterscheidung einiger mafischer Minerale war aber eine mineralogische Bestimmung (Art und Menge der verschiedenen Mineralien) allein mit Hilfe des Polarisationsmikroskopes nicht möglich, weshalb die petrographischen Untersuchungen mit röntgenographischen Methoden vervollständigt werden mussten.

Für die röntgenographischen Untersuchungen wurden von allen Gesteinsproben Pulverpräparate vorbereitet. Die Untersuchungen wurden am Tonmineralogischen Institut (IGT) mit Hilfe eines Philips Röntgendiffraktometers (APD 1700) mit Kupferstrahlung durchgeführt. Die Auswertung basierte auf der ASTM-Kartei und der Literatur (Wiks & Plant, 1979; Dietrich & Peters, 1971; Tröger, 1969; etc.).

Die petrographischen Untersuchungen dienten als Grundlage für die Auswahl der Gesteinsproben und für geeignete felsmechanische Untersuchungen. Im folgenden werden einige typische Serpentinitarten beschrieben. Sie sollen die grosse Vielfalt und Inhomogenität innerhalb der Serpentinitmassen veranschaulichen. Anschliessend geben die Tabellen 4.1, 4.2 und 4.3 einen Überblick über die mineralogischen und strukturellen Daten aller für die felsmechanischen und anderweitigen Untersuchungen vorbereiteten Gesteinsproben.

Die Tabelle 4.1 zeigt die mineralogische Zusammensetzung der untersuchten Serpentinite. In der Tabelle 4.2 werden die Anteile von beobachteten Serpentin-Gefügen, Nichtserpentinmineralien und Erz in Vol.-% angegeben. Angaben bezüglich der Korngrösse findet man in der Tabelle 4.3. Der Anhang A gibt die Herkunft der Gesteinsproben an.

4.2.1 Reine Serpentinite

Probe 55Se-1
HGT: ANT, CHR, LIZ
NGT: MAG, HAE

Das Gestein sieht hell- bis gräulichgrün und sehr massig aus. Es zeichnet sich durch ein verbundenes enges Netz aus feinen Crossfibre aus (Fig. 4.1). Die kurzen und hellgrünen Adern (bis 3 mm dick und bis 3 cm lang) durchsetzen das ganze Gestein zum grössten Teil unregelmässig, nur stellenweise verlaufen sie parallel zueinander. Sie sind überall auf der Gesteinsoberfläche herausgewittert und die Querfasern sind makroskopisch sichtbar.

Probe 58Ma
HGT: CHR, LIZ
NGT: MAG, HAE, CPX

Das Gestein ist schwarz und sehr massig. Man findet metergrosse Blöcke in den Schutthalden. Die frischen Bruchflächen erscheinen sehr rauh und schwarz. Das Gestein zeigt vereinzelt millimeterdicke, hellgrüne Chrysotiladern, mit scharfen ebenen Grenzen zum Nebengestein.

Probe 60Ma
HGT: CHR, LIZ
NGT: CC, MAG, HAE

Stark kataklastisch deformierte, dunkelgrüne, massige Serpentinite. Im Aufschluss könnte das Gestein auch als hartgepresstes Lockermaterial bezeichnet werden (Fig. 4.2).

Figur 4.1: Feine Crossfibre-Ader aus Antigorit und Chrysotil. Nicols x.

Figur 4.2: Aufschluss von stark kataklastisch deformierten, reinen Serpentiniten. Koordinaten: 769'091/150'788.

Die scharfkantigen, länglichen Bruchstücke weisen im Aufschluss keine einheitliche Orientierung auf. Die Bruchstükke können einige Millimeter bis einige Zentimeter gross werden. Auf den Bruchflächen findet man grünlich weisse, feine Fasern und vor allem gelblich grün durchscheinende Schuppen aus Serpentinmineralien.

Probe 81En-1
HGT: ANT
NGT: CHR, LIZ, CPX, CHL, MAG, HAE, SP

Das massige Gestein erscheint im Feld schwarz, frisch und unregelmässig zertrennt. Das Gestein ist durch millimeterdicke weisse Diopsidadern in quadratmetergrosse Abschnitte unterteilt. Das Gestein reagiert auf Schlag mit dem Hammer sehr hart und zäh. Neben den Diopsidadern findet man bis einige Zentimeter lange Chrysotiladern und massige schwarze Antigoritadern.

Probe 92Fu
HGT: ANT, CHR, LIZ
NGT: MAG, CPX, SP

Das dunkelgrüne Gestein zeigt im frischen Bruch eine sehr rauhe und massige Oberfläche. Auf den frisch gesägten Oberflächen werden massige, parallele schwarze Antigoritadern sichtbar, die bis ca. 4 mm dick und ca. 6 cm lang werden. Die parallelen Antigoritadern zeigen ein kompliziertes Muster. Die Verzahnug der Adern mit dem Nebengestein ist ausgesprochen gut.

4.2.2 Pyroxenhaltige Serpentinite

Probe 55Se-2
HGT: ANT, CHR, CPX
NGT: LIZ, MAG, HAE, OPX, AMP

Das sehr massig erscheinende Gestein weist eine schwarze Grundmasse auf, welche milchig weisse und flaschengrüne Pyroxene enthält. Die Grundmasse zeigt zum grössten Teil eine Gitterstruktur mit senkrecht zueinander verlaufenden Antigoritplättchen.

Probe 65To-1
HGT: LIZ, CHR, CPX, OPX
NGT: MAG, SP, CHL, OLI

Die Gesteinsmasse, welche in Bruchstücke zerfällt, ist im Abstand von einigen Zentimetern bis Dezimetern zerklüftet und verwittert rostbraun. Auf frisch gesägten Oberflächen findet man eine sehr feine Bänderung, die durch feine Pyroxene hervorgerufen wird. Die graugrünlich fein getupfte schwarze Grundmasse wird durch viele hellgrüne Chrysotiladern (einige Millimeter dick) in zentimeter- bis dezimetergrosse Polyeder getrennt.

Probe 73To-1
HGT: LIZ, CHR, CPX, OPX
NGT: MAG, RUT, SP

Das Gestein zeigt im frischen Zustand eine schwarze Grundmasse mit parallelen flaschengrünen Pyroxenen und goldgelb schillernden Bastiten. Das Gestein zerfällt entlang schwarz glänzenden, treppenartigen Rutschharnischen mit dunkelgrünlichen feinfaserigen Edelserpentinen und unregelmässigen Öffnungen (Risse oder Spalten) mit rauher Oberfläche, in unterschiedlich grosse Bruchstücke. Das Gestein ist stellenweise von sehr feinen Slipfibre-Adern (bis 0.2 mm dick und einige Millimeter bis einige Zentimeter lang) durchsetzt. Neben den Slipfibre-Adern findet man isotrope, gelartige Serpentinadern, die eine sehr unebene und rauhe Kontaktfläche Ader/Nebengestein aufweisen. In den gelartigen Adern schwimmen Bruchstücke des Nebengesteins in einem isotropen Gelmaterial.

4.2.3 Feinkörnige Peridotite

Probe 65To-2
HGT: OLI, CPX, OPX, CHR, LIZ
NGT: CC , SP, MAG, RUT

Feinkörnige Peridotite gehören zu den auffallendsten Gesteinen im Totalp-Gebiet, welche von PETERS (1963) detailliert beschrieben worden sind. Die Peridotite zeigen an der Verwitterungsseite eine typische ockergelbe Farbe. Sie sind durch 1-5 cm dicke Edelserpentinitadern in quadratdezimetergrosse Abschnitte aufgeteilt. Diese sind in sich wiederum in quadratzentimetergrosse Bereiche gegliedert, diesmal aber durch etwa millimeterdicke Serpentinäderchen. Durch Züge feinkörnigen und grobkörnigen Materials aus Enstatit und Augit in einer schwarzen, mylonitischen Grundmasse entsteht eine bänderig-schlierige Paralleltextur. Parallel zum Planargefüge laufen Crossfibre-Adern aus Chrysotil und/oder Calcit, die 0.1 mm dick und einige Millimeter lang werden können.

4.2.4 Ophicalcite

Probe 53Se-1
HGT: CC , ANT, CHR, LIZ
NGT: CPX, SP , MAG, HAE

Die calcitreichen Partien bestehen hauptsächlich aus sehr feinkörnigem calcitischem Material in welchem grössere flaserige Calcit- und Serpentinitbruchstücke schwimmen. Diese Grundmasse verleiht dem Gestein makroskopisch ein grünlich-weisses Planargefüge. Die serpentinitreichen Partien werden von Calcitadern in unregelmässige und unterschiedlich grosse Bruchstücke zertrennt. Die Bruchstücke zeigen sowohl Spiegelharnische als auch rauhe Bruchflächen.

Probe 64To-1
HGT: CC , LIZ, CHR, CPX, OPX
NGT: MAG, CHL, AMP

Das Gestein zeigt eine Bänderung von hellgrünen und grünlich weissen Lagen. Die grünen Lagen zeigen eine starke Vermischung von Serpentinitmaterial mit sehr feinkörnigem calcitischem Material. Parallele Schnüre oder Bänder aus Serpentinmaterial mit flaserigen Pyroxenen schwimmen in einer feinkörnigen Calcit-Grundmasse (bis ca. 0.1 mm). In den grünen Lagen laufen viele feine parallele Calcitäderchen fast senkrecht zur Bänderung. Ein grosser Gehalt an Magnetit kennzeichnet die grünen Lagen. Die weissen Lagen bestehen fast ausschliesslich aus gröberen Calcitkörnern (0.5 mm), die stylolithähnliche Korngrenzen aufweisen.

4.2.5 Ophidolomite

Probe 63Su-3
HGT: DO , CHR, LIZ, ANT
NGT: CPX, CHL, MAG, HAE

Grünlich schwarze Serpentinite schwimmen in einer rosaweissen Grundmasse aus Dolomit, welche von sehr feinen Adern durchsetzt wird. Das Gestein ähnelt sehr stark einem Ophicalcit. Unter dem Mikroskop erkennt man eine mikritisch erscheinende Grundmasse aus Dolomit mit Fliessstruktur, in welcher eckige Serpentinitbruchstücke schwimmen. Fein verteilte Diopsidstengel überwachsen stellenweise regellos die Dolomite.

4.2.6 Karbonatführende Serpentinite

Proben 55Se-3
HGT: ANT, CHR, LIZ, CC
NGT: MAG, HAE, SP

Die karbonatführenden Serpentinite weisen aufgrund der vielen makroskopisch sichtbaren, feinen Calcitadern eine hellgrüne Farbe auf. Das massige Gestein zeigt auch sehr oft zentimetergrosse Vertiefungen an der verwitterten Oberfläche. Auf diesen Vertiefungen und entlang sehr feinen Adern reagiert das Gestein mit HCl.

4.2.7 Vertalkte Serpentinite

Proben 3Ma, 4Ma, 5Ma, 6Ma und 7Ma
HGT: AMP, ANT, TAL, CHL
NGT: CC , MAG, Pyrit

Das graugrüne Gestein tritt in dezimeterdicken Lagen innerhalb der stark tektonisierten reinen Serpentinite auf. Die Grenze Serpentinit/vertalkter Serpentinit ist scharf. Das Gestein ist sehr feinkörnig und stellenweise stark verfältelt. Im allgemeinen ist das Gestein fein geschiefert. Die Bohrkerne lassen sich entlang dunkelgrünen serpentinreicheren Lagen auftrennen. Auf den Trennflächen findet man typische, spiegelglatte Serpentinitoberflächen, die mit grünlich weissen Talkschichten bedeckt sind. Mikroskopisch zeigt sich eine sehr feinkörnige, parallelfaserige Grundmasse aus Tremolit, die um linsenförmige Domänen aus Tremolit und/oder Antigorit mit Durchdringungsgefüge (seltener Verzahnungsgefüge) fliesst.

4.2.8 Malenco-Serpentinite

Probe 75Po-1
HGT: ANT, CPX, OLI, CHR
NGT: CHL, BRU, MAG, SP

Das Gestein ist durch eine graugrüne Farbe und ein grobkörniges, massiges Gefüge gekennzeichnet. Der Serpentinit zeigt fast ausschliesslich Durchdringungsgefüge. Neubildung von Diopsid und Olivin werden oft beobachtet.

Probe 75Po-2

HGT: ANT, CHR, OLI, CPX
NGT: CHL, BRU, TIT, MAG, SP

Das Gestein zeigt Isoklinalfalten (im Millimeterbereich), deren Schenkel bei mechanischer Beanspruchung als Trennflächen wirken; diese Trennflächen zeigen gewellte, grünlich glänzende Flächen (wie Spiegelharnische). Eine sehr feine Grundmasse (0.06 mm) aus parallelen Antigorit- und Chrysotilfasern zeichnet die Isoklinalfalten ab. Dazwischen verlaufen millimeterdicke titanklinohumit- und olivinreiche Lagen (sogenannte Dunit-Layer) parallel zur Schieferung. Neubildungen von Diopsid und Olivin werden beobachtet.

4.2.9 Serpentinit mit sehr feinen Talkadern

Probe 91Fu

HGT: ANT, CHR, LIZ, TAL
NGT: DO, MAG, HAE

Das Gestein erscheint im Feld sehr dicht und massig. Es zeigt eine hellgrüne Farbe. Ein dichtes unregelmässiges Netz von sehr feinen Talkadern (Bruchteile von Millimetern dick und bis ca. 2 cm lang) durchsetzt das ganze Gestein. Entlang der Talkadern findet man eine leicht rötlich braune Verwitterungsfarbe.

Tabelle 4.1: Mineralogische Zusammensetzung der Gesteinsproben

GESTEINSTYP	PROBE Nr.	CHR	LIZ	ANT	TAL	CHL	BRU	AMP	CPX	OPX	OLI	MAG	HAE	CC	DO	SP
Reine Serpentinite	55Se-1	+	+	+					+			+	+			
	58Ma-1	+	+						+			+	+			
	60Ma	+	+									+		+		
	81En-1	+	+	+		+		+	+	+		+	+			+
	92Fu	+	+	+					+			+				+
Pyroxenhaltige Serpentinite	55Se-2	+	+	+					+	+		+	+			
	61Ma	+	+			+			+	+		+	+			
	62Ma	+	+						+	+		+	+			+
	65To-1	+	+			+			+	+	+	+				+
	65To-4	+	+						+	+		+				
	69To-1	+	+						+	+		+		+	+	+
	73To	+	+						+	+		+				+
Feinkörnige Peridotite	65To-2	+	+						+	+	+	+				+
Ophicalcite	53Se-1	+	+	+					+			+	+			+
	64To-1	+	+					+	+	+		+		+		
	65To-3		+		+	+		+	+	+		+		+		
	66To-1		+					+	+			+		+		+
	67To-1	+				+		+	+			+		+		+
Ophidolomite	63Su-3	+	+	+		+			+			+	+		+	
Karbonatführende Serpentinite	55Se-3	+	+	+								+	+	+		+
Vertalkte Serpentinite	5Ma			+	+	+		+						+		
Serpentinite mit Talkadern	91Fu	+	+	+	+							+	+		+	
Malenco-Serpentinite	75Po-1	+		+		+	+		+		+	+				+
	75Po-2	+		+		+	+		+	+	+	+				+

Tabelle 4.2: Der Anteil von verschiedenen Serpentinstrukturen, Nichtserpentinmineralien und Erz (Angaben in Vol.-%)

GESTEINSTYP	PROBE Nr.	SERPENTIN-STRUKTUREN						NICHT-SERPEN-TIN-MINERA-LIEN	ERZ
		BASTIT	MASCHEN-STRUKTUR	GITTER-STRUKTUR	DURCH-DRIN-GUNGS-GEFÜGE	VER-ZAH-NUNGS-GEFÜGE	BÄNDER-STRUK-TUR		
Reine Serpentinite	55Se-1	12			13	45	18		12
	58Ma-1	8	20			4	56	4	8
	60Ma		29			25	43		3
	81En-1	2		52		29		14	3
	92Fu	2		89				2	7
Pyroxenhaltige Serpentinite	55Se-2	4	3	46	8	7	13	21	9
	61Ma	12	38				22	15	13
	62Ma	8	59					18	15
	65To-1	3	37			24		28	8
	65To-4	20	54					23	3
	69To-1	29	46					11	14
	73To	11	62					22	5
Feinkörnige Peridotite	65To-2	8	13			20		48	11
Ophicalcite	53Se-1			+	+			+	+
	64To-1	+	+					+	+
	65To-3	+						+	+
	66To-1	+	+	+				+	+
	67To-1	+	+					+	+
Ophidolomite	63Su-3	+	+		+			+	+
Karbonatführende Serpentinite	55Se-3				69	10	8	7	6
Vertalkte Serpentinite	5Ma				22	4		70	4
Serpentinite mit Talkadern	91Fu	21	47		8	6		6	3
Malenco-Serpentinite	75Po-1				45	12		35	8
	75Po-2				21			44	3

Tabelle 4.3: Grösster Korndurchmesser der Gemengteile in Millimeter. Die Angaben über die Maschenstrukturen beziehen sich auf die Maschenkerne.

GESTEINSTYP	PROBE Nr.	ÜBERWIEGENDE SERPENTIN-STRUKTUR	SERPENTIN-MINERALIEN	MASCHEN-STRUKTUR	BASTIT	PYRO-XEN	OLIVIN	CAL-CIT
Reine Serpentinite	55Se-1	Verzahnungsgefüge	0.02		1.60			
	58Ma-1	Bänderstruktur	0.07	0.15	0.80	0.50		
	60Ma	Bänderstruktur	0.02	0.06	0.30			
	81En-1	Gitterstruktur	0.01		0.70	0.14		
	92Fu	Gitterstruktur	0.05		1.50	0.45		
Pyroxenhaltige Serpentinite	55Se-2	Gitterstruktur	0.04	0.08	5.60	2.00		
	61Ma	Maschenstruktur		0.05	3.50	1.10		
	62Ma	Maschenstruktur		0.20	0.30	1.46		
	65To-1	Maschenstruktur		0.15	2.50	0.60	0.07	
	65To-4	Maschenstruktur		0.23	3.20	2.60		
	69To-1	Maschenstruktur		0.16	4.00	2.70		
	73To	Maschenstruktur		0.23		4.00		
Feinkörnige Peridotite	65To-2	Mylonitgefüge	<0.001 0.09	0.11		0.40	<0.001	
Ophicalcite	53Se-1	Durchdringungsgefüge	0.06			0.60		1.00
	64To-1	Mylonitgefüge				3.50		0.50
	65To-3	Maschenstruktur		0.05	3.00			0.10
	66To-1	Mylonitgefüge				2.40		0.70
	67To-1	Mylonitgefüge				2.20		0.60
Ophidolomite	63Su-3	Maschenstruktur		0.06	1.50			
Karbonatführende Serpentinite	55Se-3	Durchdringungsgefüge	0.16					0.70
Vertalkte Serpentinite	5Ma	Durchdringungsgefüge	0.05					
Serpentinite mit Talkadern	91Fu	Maschenstruktur		0.10	0.40			
Malenco-Serpentinite	75Po-1	Durchdringungsgefüge	0.23			5.00	0.20	
	75Po-2	Paralleltextur	0.06			2.50	0.12	

4.3 Dichte, Porosität

Als Porosität wird bei Gesteinen definionsgemäss der Hohlraumanteil bezogen auf das Gesamtvolumen bezeichnet. Die Angabe erfolgt gewöhnlich als Prozentwert, seltener als Dezimalbruch. Die quantitative Ermittlung der Porosität beruht in der Regel auf der Bestimmung von Raumgewichten und spezifischen Gewichten:

$$\gamma_d = \frac{G_s}{V_{tot}} \qquad 4.1$$

$$n = \frac{V_p}{V_{tot}} = 1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s} \qquad 4.2$$

G_s = Gewicht der Festsubstanz
V_{tot} = Totales Volumen
V_p = Porenvolumen
γ_d = Trockenraumgewicht
γ_s = spezifisches Gewicht
n = Porosität

G_s und V_{tot} aller vorbereiteten Prüfkörper wurden gemäss den von ISRM (1977) vorgeschlagenen Methoden bestimmt. Daraus wurde γ_d mit Hilfe der Formel 4.1 berechnet. Die Ermittlung des spezifischen Gewichtes wurde jeweils an einigen Proben jedes Gesteinstyps nach dem Pyknometerverfahren gemäss DIN 18 124 durchgeführt. Die Genauigkeit beträgt ±0.02 g/cm^3 für γ_d und ±0.01 g/cm^3 für γ_s. Die Pyknometerversuche wurden mindestens dreimal für jede Gesteinsprobe wiederholt, Abweichungen bis zu ±0.01 g/cm^3 gab es nur in wenigen Fällen.

4.4 Resultate

Die Tabelle 4.4 zeigt Trockenraumgewicht γ_d, spezifisches Gewicht γ_s und Porosität n.

Die spezifischen Gewichte innerhalb der reinen Serpentinite, der pyroxenhaltigen Serpentinite und der Malenco-Serpentinite variieren stark. Diese grosse Variation beruht auf dem unterschiedlichen Erzgehalt und bei den pyroxenhaltigen Serpentiniten und den Malenco-Serpentiniten auf dem Anteil von dunklen Gemengteilen. Auch bei den Ophicalciten wird eine starke Variation der spezifischen Gewichte beobachtet. Die grossen Schwankungen sind durch unterschiedliche Calcitgehalte bedingt. Die höchsten γ_s-Werte wurden bei den vertalkten Serpentiniten beobachtet, welche einen hohen Gehalt an Tremolit ($\gamma_s = 3.02$ g/cm^3) und Sulfiderzen aufweisen.

Die Gesamtporosität kann auf primäre oder sekundäre Porosität zurückgeführt werden. Bei den untersuchten Gesteinen herrscht die sekundäre Porosität in der Form von späten Rissbildungen infolge tektonischer Entfestigung vor. Allgemein wirkt die Rissbildung nicht nur schwächend auf die mechanischen Eigenschaften der Gesteine, sondern sie begünstigt auch die Wasserdurchlässigkeit.

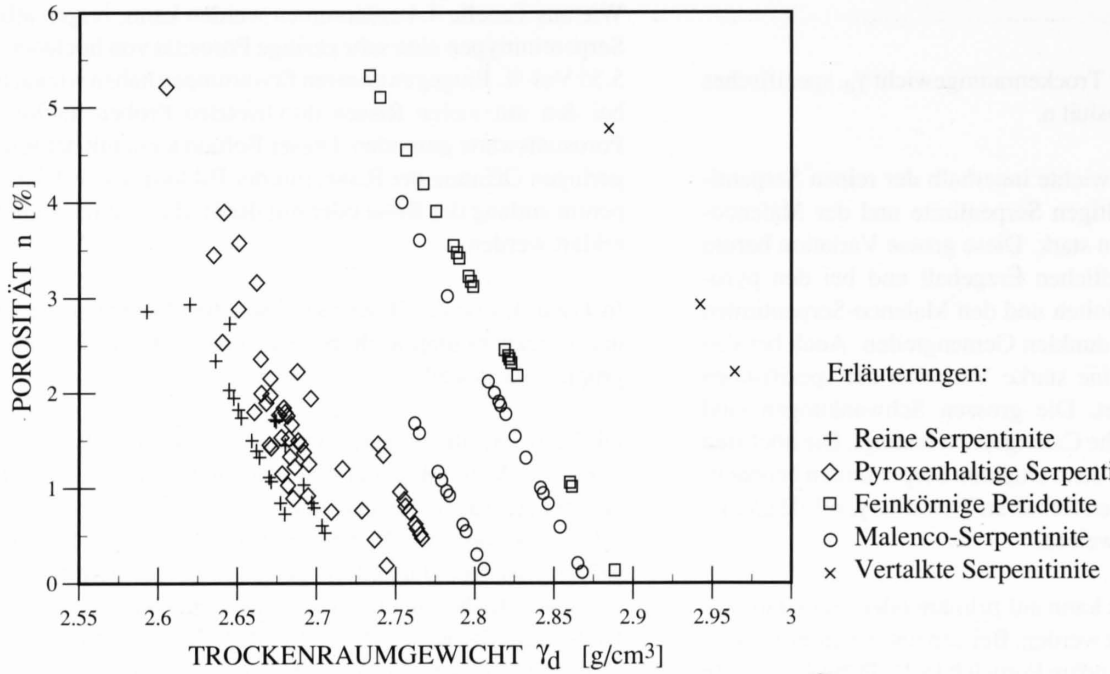
Wie aus Tabelle 4.4 entnommen werden kann, zeigen alle Serpentinittypen eine sehr geringe Porosität von höchstens 5.35 Vol-%. Entgegen unseren Erwartungen haben wir auch bei den mit vielen Rissen durchsetzten Proben niedrige Porositätswerte gefunden. Dieser Befund kann mit der sehr geringen Öffnung der Risse, mit der Bildung von Edelserpentin entlang der Risse oder mit der Heilung durch Calcit erklärt werden.

In Figur 4.3 ist die Beziehung zwischen Gesamtporosität und Trockenraumgewicht bei den verschiedenen Gesteinsgruppen dargestellt.

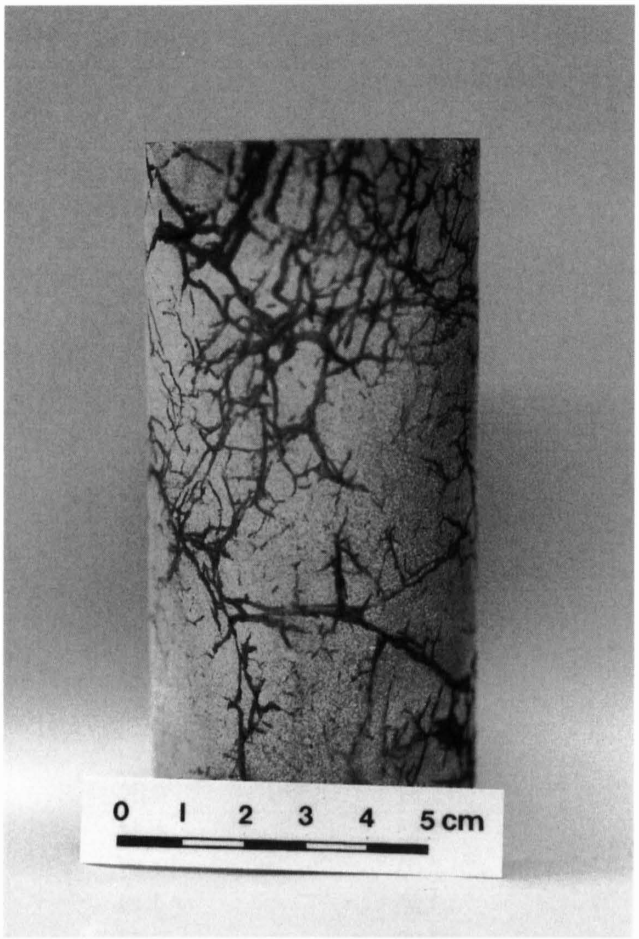
Die Porosität alleine sagt nichts aus über die Entstehung, die räumliche Verteilung und die Öffnung der Risse. Um auch darüber Aussagen machen zu können, wurden einige typische Serpentinite an der EMPA (Eidgenössische Materialprüfungsanstalt, Dübendorf) geröntgt. Leider lieferten die Röntgenaufnahmen mit einer Ausnahme keine schönen Bilder über die Rissverteilung in den Gesteinsproben. Mit grosser Wahrscheinlichkeit ist dies auf den Erzgehalt der Proben zurückzuführen, der ein grosses Hindernis für die Röntgenstrahlen darstellt. Um einen besseren Weg für die Bestimmung der Schwächezonen zu finden, wurden einige Proben auf Vorschlag der EMPA mit Farbe behandelt. Mit

Tabelle 4.4: Extrem- und Mittelwerte von γ_d, γ_s und n der verschiedenen Serpentinitarten.

GESTEINSART		TROCKENRAUM-GEWICHT γ_d [g/cm^3]	SPEZ. RAUMGEWICHT γ_s [g/cm^3]	GESAMT-POROSITÄT n
Reine Serpentinite	MAX.	2.71	2.72	2.94
	MIN.	2.59	2.67	0.53
	MIT.	2.67	2.71	1.52
Pyroxenhaltige Serpentinite	MAX.	2.77	2.78	5.24
	MIN.	2.61	2.68	0.19
	MIT.	2.70	2.72	1.57
Feinkörnige Peridotite	MAX.	2.89	2.91	5.35
	MIN.	2.74	2.88	0.11
	MIT.	2.81	2.89	2.93
Ophicalcite	MAX.	2.79	2.81	5.21
	MIN.	2.57	2.71	0.34
	MIT.	2.70	2.75	1.94
Malenco- Serpentinite	MAX.	2.87	2.87	3.99
	MIN.	2.76	2.81	0.09
	MIT.	2.81	2.85	1.34
Vertalkte Serpentinite	MAX.	2.96	3.03	4.77
	MIN.	2.89	3.03	2.19
	MIT.	2.93	3.03	3.29
KarbonatführendeSerpentinite	MAX.	2.67	2.70	1.83
	MIN.	2.65	2.70	1.15
	MIT.	2.66	2.70	1.58



Figur 4.3: Vergleich zwischen Gesamtporosität n und Trockenraumgewicht γ_d.



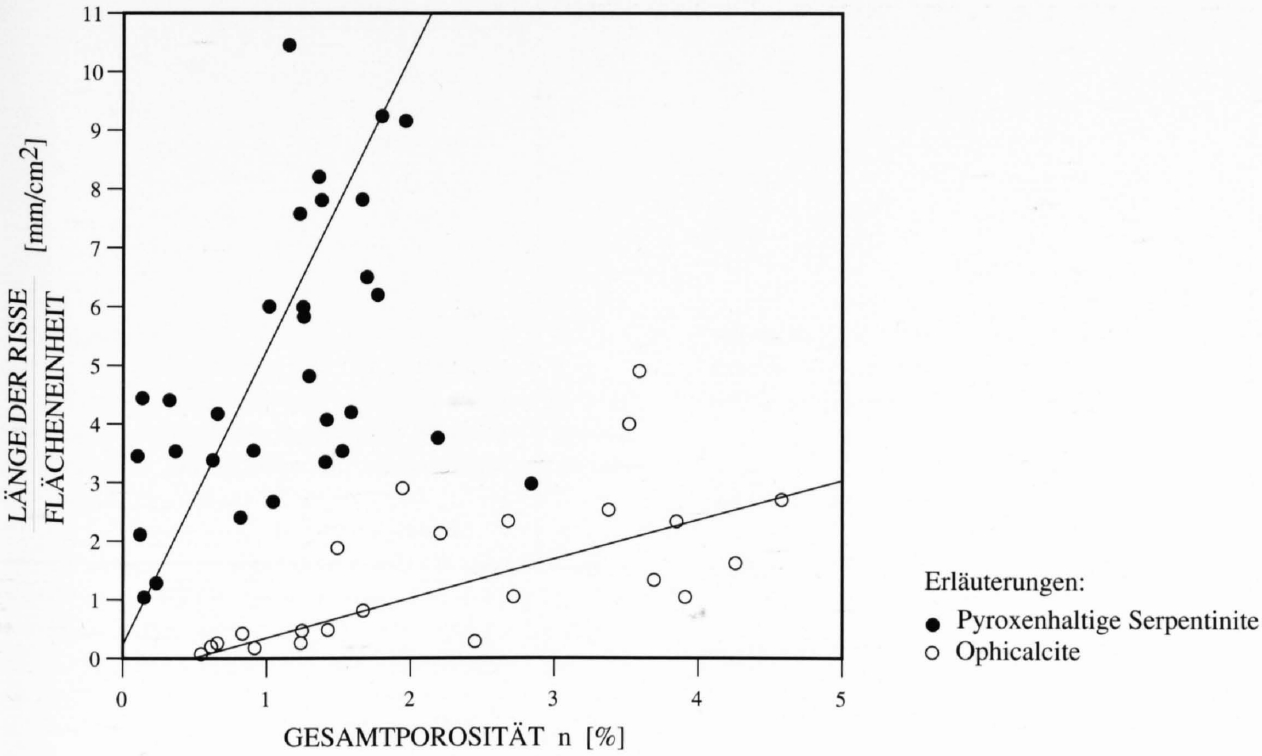
Figur 4.4: Probe 73To-2-1e nach Behandlung mit der Farbmethode.

dieser Methode können feinste Risse in einem Material sichtbar gemacht werden. Dabei wird die Probe an der Oberfläche mit einem Cleaner[1)] besprayt und gereinigt. Nach dem Trocknen wird die Probe mit einer wasserlöslichen, penetrativen roten Farbe[2)] bespritzt. Nach einer halben Stunde wird die Farbe mit Wasser weggewaschen und die Probe mit Entwickler[3)] besprayt, wobei die feinsten Risse sichtbar werden (Fig. 4.4). In den meisten Fällen zeigten die Proben auf der Oberfläche ein unregelmässiges Netz von Rissen (vgl. Kap. 3.3).

Bei einigen Proben pyroxenhaltiger Serpentinite (Proben 65To-1, 69To, 73To-1 und 73To-2) und von Ophicalciten (Proben 66To und 67To) haben wir die Länge der Risse auf der Oberfläche bestimmt. Fig. 4.5 zeigt die Beziehung zwischen Risslänge und Porosität. Bei den beiden Gesteinsgruppen findet sich eine grosse Streuung, die mit der Öffnung und Beschaffenheit der Risse erklärt werden kann. Wie aus Fig. 21 zu entnehmen ist, zeigen die pyroxenhaltigen Serpentinite grössere Risslängen als die Ophicalcite. Aus dem Diagramm wird ferner ersichtlich, dass der Porenraum der pyroxenhaltigen Serpentinite trotzdem klein ist und allein auf Rissbildung beruht. Die Ophicalcite besitzen dagegen einen gewissen Anteil an primärem Porenraum. Bei den Ophicalciten finden sich die meisten Risse in den serpentinitreichen Partien.

---

1) Cleaner/Remover, Firma Magnaflux (SKC-NF/ZC.1)
2) Penetrant, Firma Magnaflux (SKL-W)
3) Developer, Firma Magnaflux (SKD-NF/ZP.9)



Figur 4.5: *Beziehung zwischen Risslänge und Gesamtporosität.*

5 BODENMECHANISCHE UNTERSUCHUNGEN

5.1 Allgemeines

In bestimmten Scherhorizonten, die beträchtliche Mächtigkeiten von einigen Metern erreichen können, findet man stark kataklastisch deformiertes, total zersetztes Serpentinitmaterial (Fig. 5.1a).

Die Gesteinsmassen wurden durch Scher- und Kompressionsbewegungen in linsenförmige Bruchstücke zerkleinert. Diese sind parallel zur Scherbewegung eingeregelt. Die Bruchstücke zeigen auf ihren Oberflächen typische Spiegelharnische. Das Ziel der bodenmechanischen Untersuchungen war, die Scherfestigkeitsparameter entlang den parallel eingelagerten, linsenförmigen Bruchstücken zu ermitteln.

Die untersuchten verscherten Zonen zeigen eine räumliche Anordnung. Eine Probenentnahme im ungestörten Zustand war leider nicht möglich, aber die schuppenartige Form der Bruchstücke ermöglichte eine naturnahe Rekonstruktion der Parallelstruktur im Labor.

5.2 Probenentnahme

In zwei verschiedenen Scherzonen wurden Proben für bodenmechanische Untersuchungen entnommen (Fig. 5.1a):

Probe 70To

Diese Probe besteht aus reinem Serpentinit. Sie enthält hauptsächlich Chrysotil, Lizardit, Magnetit und Hämatit. Die Form der Bruchstücke kann nach Zingg (1935) als flach bis flach stengelig bezeichnet werden, nach Swanson (1981) ergibt sich eine Rundung von 0.1 bis 0.3 und eine Sphärizität von 0.3.

Figur 5.1: a) Stark kataklastisch deformierte Scherzone. Totalp bei Davos. Koord.: 783'492/190'830.

b) Kornfraktion 2-4 mm, Probe 70To

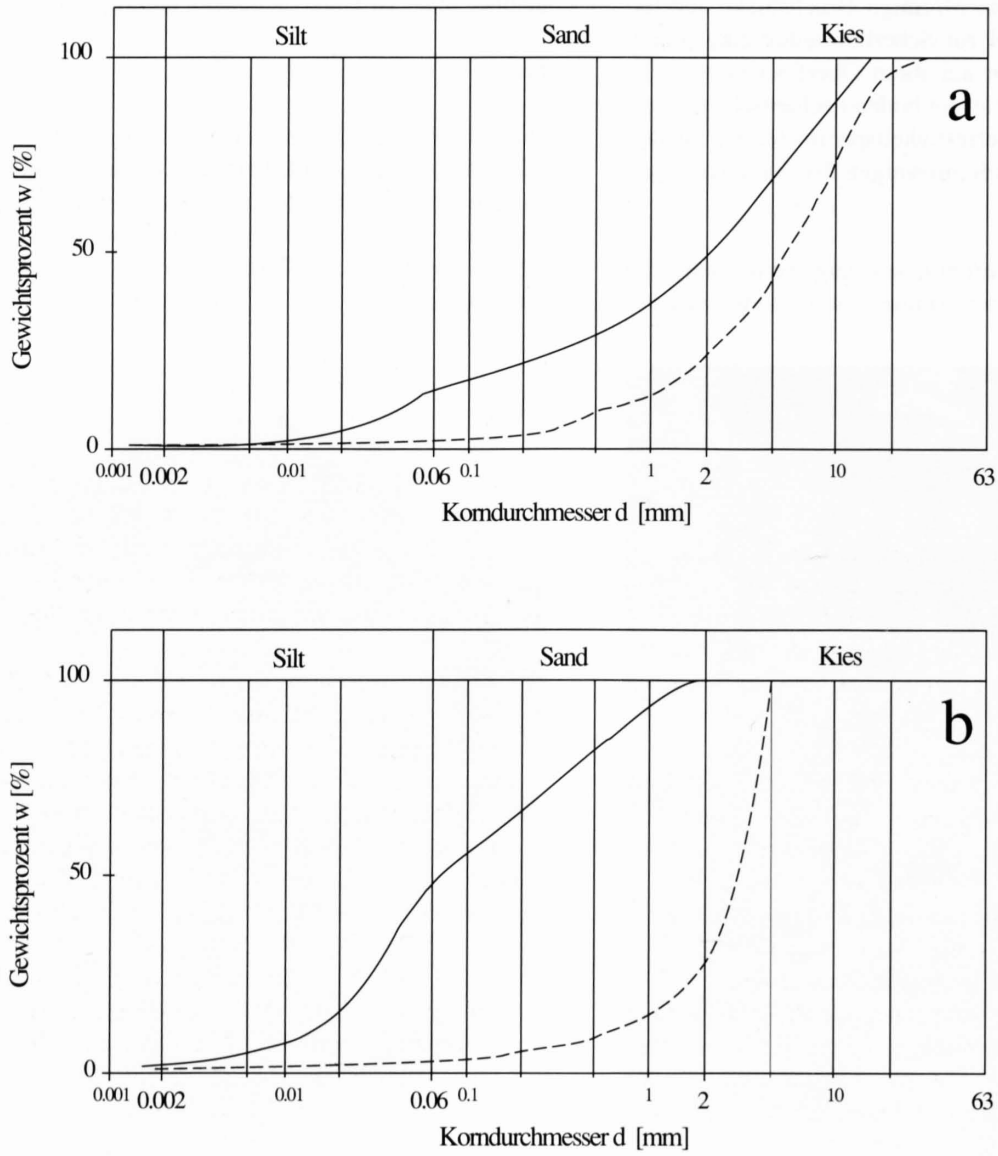
Probe 83Se

Das Material wurde aus einer Kontaktzone mit Serizit-Quarzit (Ostalpin) gewonnen. Das Gestein besteht aus kohäsionslosem, vertalktem Serpentinit, welcher parallel zur Kontaktfläche zerlegt worden ist. Das Material besteht hauptsächlich aus Antigorit, Tremolit, Talk, Chlorit und Hämatit. Die Form der Bruchstücke entspricht nach ZINGG (1935) dem flach bis flach stengeligen Typ. Nach SWANSON (1981) kann ihm eine Rundung von 0.5 und eine Kugeligkeit von 0.3 zugeordnet werden. In der Kornfraktion <1 mm findet man vermehrt stengelige Formen aus Tremolit.

5.3 Probenvorbereitung

Die Kornverteilungen der entnommenen Proben wurden mittels Sieb- und Schlämmanalysen ermittelt. Dies erfolgte nach den SNV Normen 670 808, 670 810b, 870 812a. Die Summationskurven sind in der Fig. 5.2a dargestellt.

Während Probe 70To ursprünglich hauptsächlich aus Grobfraktionen (Sand und Kies) bestand, zeigte Probe 83Se neben der Grobfraktion einen Anteil von 14 Gew.-% Silt. Da für unsere Untersuchungen eine parallele Anordnung der Schuppen und die Scherfestigkeit entlang den Schuppen



Figur 5.2: *a) Kornverteilung der Proben 70To (gestrichelte Linie) und 83Se (ausgezogene Linie) im natürlichen Zustand im Feld.*
b) Kornverteilung der Proben 70To (gestrichelte Linie) und 83Se (ausgezogene Linie) nach dem Scherversuch (Normaldruck 200 kN/m²).

massgeblich sind, wurden beim Versuch nur bestimmte Kornfraktionen berücksichtigt. Die flache schuppenartige Korngeometrie der Grobfraktion erlaubte den naturnahen parallelen Einbau der Schuppen in den Ringscherbehälter.

Von der Probe 70To wurden die Kornfraktionen 0.5-1 mm und 2-4 mm, von der Probe 83Se jene von <0.5 mm sowie 1-2 mm ausgewählt. Die Schuppen wurden parallel aufeinander in den Ringscherbehälter eingestampft. Bei Probe 83Se <0.5 mm war dies nicht möglich, weil die Feinkörnigkeit des Materials und die stengelige Kornform einen parallelen Einbau verhinderten.

Im Labor wurden die Raumgewichte γ_d nach den Abmessungen der Ringscherbehälter und dem Trockengewicht des jeweiligen verwendeten Lockermaterials bestimmt. Die spezifischen Gewichte γ_s wurden jeweils an einigen Proben jedes Gesteinstyps nach dem Pyknometerverfahren gemäss DIN Norm 52102 (DNA, 1965) ermittelt. Demnach zeigt die Probe 70To ein spezifisches Gewicht von 2.67 g/cm^3, bei Probe 83Se erreichte es 2.98 g/cm^3.

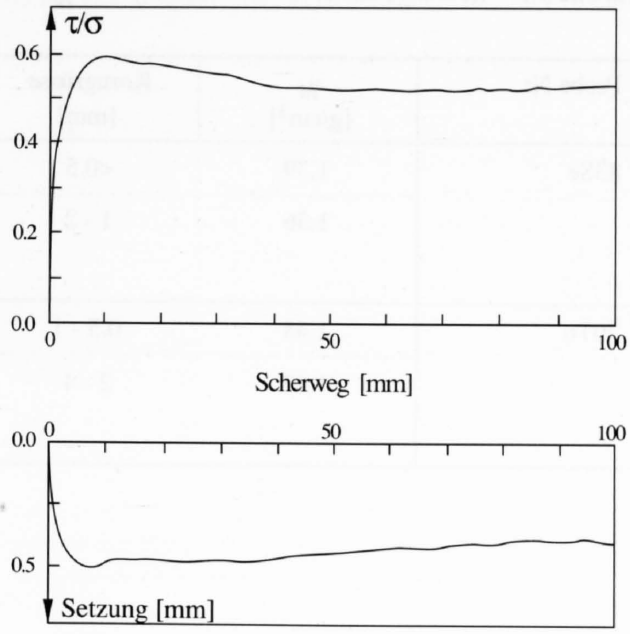
Eine dichte Lagerung wurde vermieden, da die parallele Anordnung der Schuppen durch Aufbringung zusätzlicher Last hätte gestört werden können. Die Proben wurden im trockenen Zustand eingebaut, was einen Vergleich zwischen Lockermaterial und dem ursprünglichen Zustand im Fels ermöglichte.

5.4 Methodik

Zur Ermittlung der Scherfestigkeit der kataklastisch deformierten Gesteine in den Scherhorizonten wurden Ringscherversuche durchgeführt. Diese haben gegenüber Direkt- und triaxialen Scherversuchen den Vorteil, dass die Restscherfestigkeit nach langen Scherwegen gemessen werden kann.

Die Versuche mit feinkörnigen Fraktionen - Probe 70To (0.5-1 mm) und Probe 83Se (<0.5 mm) - wurden am Geonor-Ringschergerät durchgeführt. Eine ausführliche Beschreibung des Gerätes ist in einem Beitrag von Bishop et al. (1971) enthalten. Die Versuche mit grobkörnigeren Fraktionen - Probe 70To (2-4 mm) und Probe 83Se (1-2 mm) - wurden mit dem vom Institut für Geotechnik der ETH (damals Institut für Erdbauforschung an der ETH) entwickelten Ringscherapparat durchgeführt, da dieser Ringscherapparat einen grösseren Behälter als das Gerät Geonor besitzt. Dieses Gerät wird ausführlich von Haefeli (1938) beschrieben.

Die Proben wurden im trockenen Zustand eingebaut und mit der notwendigen Normallast konsolidiert. Sie wurden mit einer Schergeschwindigkeit von 0.88 mm/h geschert. Der Verlauf eines der Ringscherversuche ist in Fig. 5.3 dargestellt.



Figur 5.3: Typischer Verlauf eines Ringscherversuchs. τ/σ: Verhältnis Scherspannung/Normalspannung: tanφ, Probe 70To, Korngrösse 0.5-1 mm, Normalspannung 100 kN/m^2.

5.5 Ergebnisse

Insgesamt wurden 13 Ringscherversuche durchgeführt. Die Scherkörper wurden mindestens um 90 mm geschert. Die ermittelten Resultate sind in der Tabelle 5.1 dargestellt.

Nach dem Scherversuch war nur bei der Probe 83Se (<0.5 mm) ein Einblick auf die Scherfläche möglich (dank Verfilzung der Tremolitfasern in der feinkörnigen Fraktion). Sie war sehr leicht wellig. Wegen der lockeren Lagerung der Proben kam es bei keinem Versuch zur Dilatanz.

Die Figur 5.2 b zeigt die Kornverteilung der Proben 70To (2-4 mm) und 83Se (1-2 mm) nach dem Scherversuch. Die Probe 70To zeigt eine geringere Änderung der Kornverteilung als Probe 83Se. Dies könnte einerseits durch den Probeneinbau bedingt sein, da ein paralleler Einbau bei der grobkörnigeren Probe 70To einfacher erscheint als bei Probe 83Se. Andererseits könnte die Festigkeit der einzelnen Körner unterschiedlich gewesen sein (Haarrisse).

Wie aus Tabelle 5.1 erkennbar ist, zeigt das vertalkte Serpentinitmaterial kleinere Reibungswinkel als das reine Serpentinitmaterial. Einen noch grösseren Einfluss auf die Scherfestigkeitsparameter der beiden Lockermaterialien als die Petrographie übt die Korngrösse aus. Aus den oben vorgestellten Resultaten kann geschlossen werden, dass je feinkörniger das Lockermaterial ist, desto geringer auch die Reibung entlang den parallelen Schuppen ist. Mit anderen Worten: Je stärker das Gesteinsmaterial in den Scherhorizonten tektonisiert wird und je kleiner die Korndurchmesser werden, desto geringere Scherfestigkeiten parallel zu den Schuppen sind zu erwarten.

Tabelle 5.1: Reibungswinkel für Höchstfestigkeit (φ_p) und Restfestigkeit (φ_r) aus den Ringscherversuchen.

Probe Nr.	γ_d [g/cm^3]	Korngrösse [mm]	Normaldruck [kN/m^2]	φ_p [°]	φ_r [°]
83Se	1.39	<0.5	100	18.8	14.8
	1.36	1 - 2	100	22.1	18.2
			200	21.0	17.6
70To	1.48	0.5 - 1	100	30.3	27.2
	1.47	2 - 4	100	31.1	26.0
			200	26.5	22.5

6 FELSMECHANISCHE UNTERSUCHUNGEN

6.1 Allgemeines

6.1.1 Probenvorbereitung

Für die einaxialen und triaxialen Druckversuche wurden ausnahmslos zylindrische Proben mit einem Durchmesser von d = 56mm und mit einer Höhe von h = 2d verwendet. Die Proben wurden zum grössten Teil im Labor aus grossen Gesteinsbrocken herausgebohrt. Einige Proben aus Tiefbohrungen wurden uns freundlicherweise für unsere Zwekke zur Verfügung gestellt. Die Probekörper wurden in verschiedenen Richtungen aus dem Gestein herausgebohrt, um dessen Anisotropie zu erfassen. Die Endflächen wurden mit einer Genauigkeit von 0.01 mm planparallel geschliffen. Aus der Zylinderoberfläche herausgebrochene Einbuchtungen wurden mit einem nicht klebenden Kunststoff[1)] ausgefüllt und korrigiert, um eine saubere Kraftübertragung beim triaxialen Druckversuch zu gewährleisten.

Um von den stark kataklastisch deformierten Gesteinen Proben zu gewinnen, mussten sie in tiefgefrorenem Zustand gebohrt werden. Für diesen Zweck wurde eine vorher isolierte, zusammenhängende Gesteinspartie mit Wasser gesättigt und dann in einer Wanne mit flüssigem Stickstoff (Siedepunkt: -195.8°C) eingetaucht. Aus dem gefrorenen Gesteinskörper wurden nachher Proben gebohrt. So ist es uns gelungen, zusammenhängende zylindrische Prüfkörper für die Druckversuche zu gewinnen. Die Volumenzunahme infolge der Eisbildung beeinflusst die Restfestigkeit der Prüfkörper nicht.

Für die einaxialen Druckversuche wurden die Proben systematisch für die Messung der Querdehnung vorbereitet (ATTINGER & KÖPPEL, 1983). Die Prüfkörper für einaxiale und triaxiale Versuche wurden getrocknet, gewogen und ihre Abmessungen bestimmt. Anschliessend folgte eine Lagerung bei Raumtemperatur und 50% relativer Luftfeuchtigkeit während mindestens 6 Tagen. Die Proben wurden vor dem Versuch noch einmal gewogen. Die aufgenommene Feuchtigkeit war vernachlässigbar klein (weniger als 1%).

Für die Scherversuche mussten die uns interessierenden Diskontinuitätsflächen entweder herausgebohrt oder herausgesägt werden. Es war oft leider nicht möglich, die Bruchflächen gleich gross herzustellen, weil viele Bruchkörper mit der kleinsten Beanspruchung auseinandergefallen wären. Viele Bruchflächen hatten daher unregelmässige Formen und mussten mit Hilfe eines Planimeters gemessen werden. Dies ergab in den meisten Fällen Werte von 50 bis 70 cm^2 (Extremwerte: 26.1 bis 139.6 cm^2).

6.1.2 Versuchsvorrichtung

Für alle felsmechanischen Untersuchungen wurde die Prüfvorrichtung des Instituts für Geotechnik (IGT) an der ETHZ verwendet. Sie besteht aus einer besonders steifen (100 GN/m), servogesteuerten Druckpresse mit einer maximalen Kapazität von 3000 kN, welche die axiale Belastung besorgt, und einer Steuerungs- und Messeinheit. Für die triaxialen Druckversuche wurde an diese Vorrichtung eine leistungsfähige hydraulische Pumpanlage zur stufenlosen Regulierung und Messung des seitlichen Druckes angeschlossen. Bei den direkten Scherversuchen diente die servogesteuerte Druckpresse zur Erzeugung der Scherspannung und eine am IGT entwickelte, mobile hydraulische Presse zur Erzeugung und Messung der Normalspannung. Eine detaillierte Beschreibung der Scherversuchsapparatur geben TISA & KOVARI (1984).

Die Axiallast wurde kontinuierlich bei konstanter Deformationsgeschwindigkeit von 1.6×10^{-3} mm/s aufgebracht.

6.2 Einaxialer Druckversuch

6.2.1 Methodik

Der einaxiale Druckversuch gehört zu den gebräuchlichsten felsmechanischen Versuchen. Damit kann die einaxiale Druckfestigkeit σ_d, das Elastizitätsmodul E und die poisson'sche Konstante ν von Gesteinen ermittelt werden. Die einaxiale Druckfestigkeit σ_d kann einerseits zur Vervollständigung der triaxialen Druckversuche benutzt werden, andererseits kann sie zur Beurteilung und Abschätzung der Scherparameter φ auf Kluftflächen verwendet werden (BARTON, 1973).

Beim einaxialen Druckversuch wird der Prüfkörper bei ungehinderter Seitendehnung bis zum Bruch und darüber hinaus belastet. Die Versuchsergebnisse hängen, neben den petrographischen Gegebenheiten, von der Prüfkörperbehandlung und von verschiedenen versuchstechnischen Randbedingungen ab. Wegen der ungünstigen Gesteinseigenschaften der Serpentinite war die Gleichbehandlung der

---

[1)] *Beracryl: selbsthärtender Acrylat-Kunststoff der Firma W. Troller AG.*

Prüfkörper leider nicht immer gewährleistet. Die geringfügigen Unterschiede der Probendurchmesser bleiben ohne signifikanten Einfluss auf die ermittelten Parameter. Bei den Proben, welche die Bedingung: h = 2d (h: Höhe, d: Durchmesser) nicht erfüllten, wurde die Höchstfestigkeit σ_d nach der von OBERT et al. (1946) gegebenen Beziehung korrigiert:

$$\sigma_d = \sigma_0 \ / (0.875 + 0.250 \times d / h) \qquad (6.1)$$

Wobei σ_0 die Druckfestigkeit eines Prüfkörpers mit einem Verhältnis von $d / h \neq 0.5$ bedeutet.

Die Deformationsgeschwindigkeit wurde für alle Prüfkörper konstant gehalten (1.6×10^{-3} mm/s). Die Vorbereitung der Proben und die Durchführung der Versuche erfolgte nach den ISRM-Richtlinien (ISRM, 1977b). Fig. 6.1 zeigt ein typisches Spannungs-/Dehnungsdiagramm. Es wurden während des Versuches im elastischen Bereich (und sehr oft im Nachbruchbereich) jeweils eine oder zwei Entlastungen und Wiederbelastungen vorgenommen.

Ohne Berücksichtigung der Hysterisisschlaufen trat der Bruch je nach Gesteinsart innert 4 bis 13 Minuten ein. Die aus den Messwerten umgerechneten Spannungen und Dehnungen beziehen sich durchwegs auf die Abmessungen der unverformten Prüfkörper. Druckspannung und Zusammendrückung werden als positiv definiert.

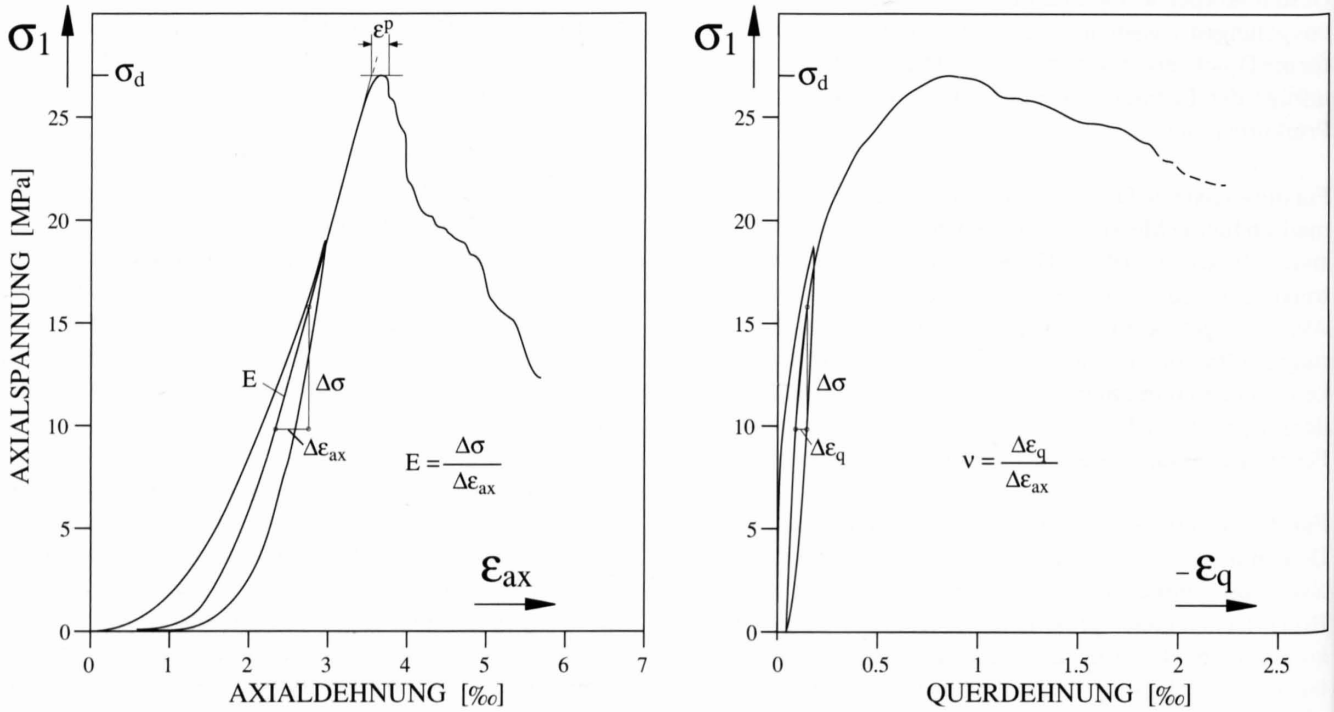
6.2.2 Ergebnisse

Insgesamt wurden 51 einaxiale Druckversuche an den intakten Serpentinitproben durchgeführt. Die Resultate sind in der Tab. 6.1 dargestellt. Die Gesteinsparameter variieren innerhalb der Gesteinsgruppen sehr stark. Dies lässt sich in erster Linie auf die Anzahl und die räumliche Verteilung der bereits bestehenden Risse und Rutschharnische in den Gesteinsproben zurückführen. Die tiefsten einaxialen Druckfestigkeiten werden bei den Ophidolomiten und bei den mit parallelfaserigen Serpentinadern durchsetzten, reinen Serpentiniten (Gesteinsserie 55Se-1) beobachtet. Die höchsten Druckfestigkeiten können bei reinen oder pyroxenhaltigen Serpentiniten mit einem massigen und feinkörnigen Gefüge gefunden werden (Gesteinsserie 81En-1 und 55Se-2).

In Fig. 6.2 ist die Druckfestigkeit gegenüber dem Elastizitätsmodul aufgetragen. Um eine Beziehung zwischen Druckfestigkeit und Elastizitätsmodul herzustellen, muss eine sehr grosse Anzahl einaxialer Druckversuche mit zahlreichen Proben jeder Gesteinsgruppe durchgeführt werden.

Für reine Serpentinite aus Serpentinitvorkommen bei Wurlitz-Woja am SE-Rand der Münchberger Gneismasse (NE-Bayern) werden von ROST (1960a) und ALDHEID (1981) einaxiale Druckfestigkeiten von 130 - 450 MPa angegeben. Diese Serpentinite mit mehr oder weniger antigoritisierten Maschenstrukturen liegen im Bereich der Grünschieferfazies. Die z.T. sehr hohe Druckfestigkeit des Münchberger Serpentinits wird von ROST (1960a) mit Verfilzung durch Antigoritschuppen erklärt.

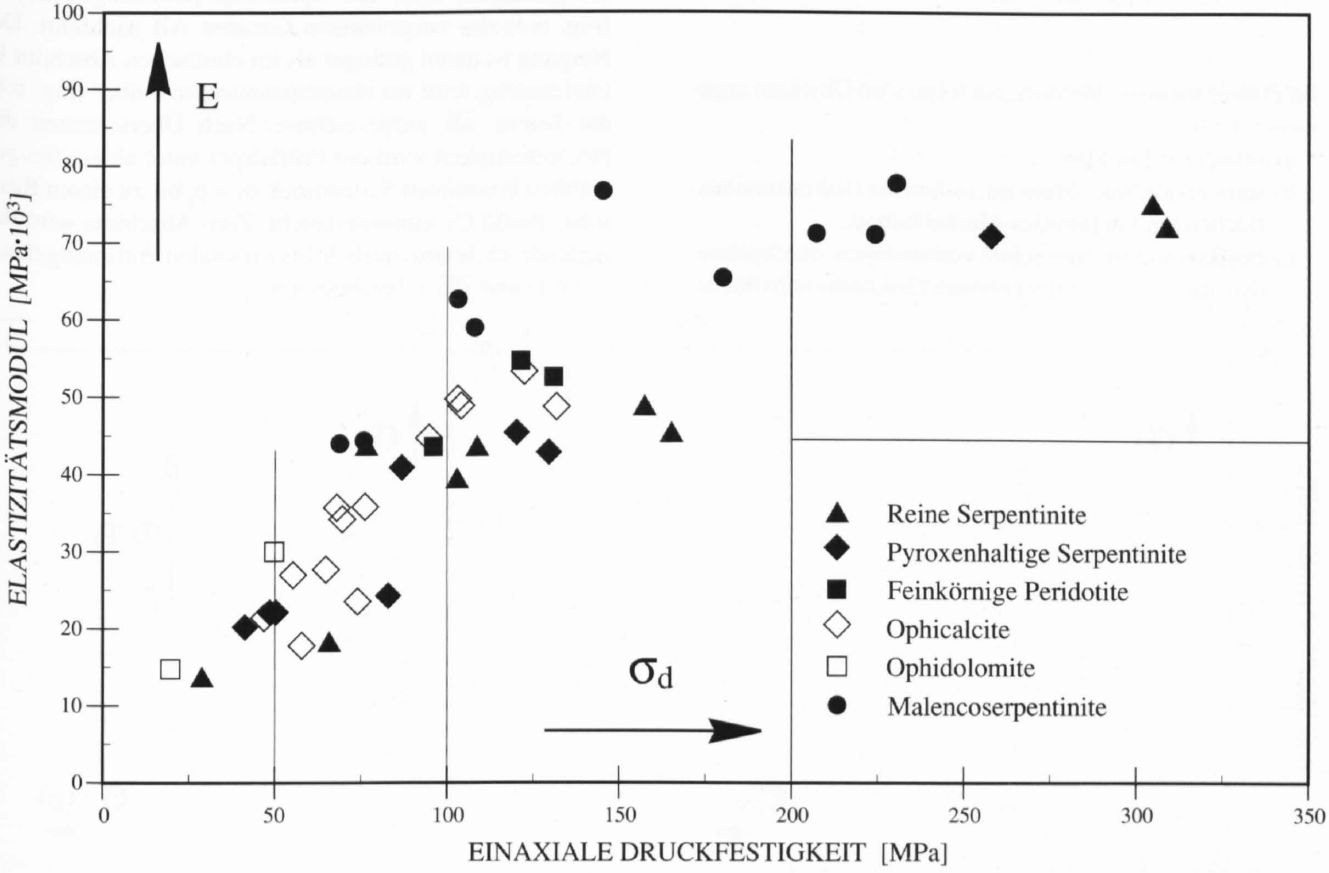
COUMANTAKIS (1982) findet aus einer grossen Anzahl von Bestimmungen der einaxialen Druckfestigkeiten an Serpentiniten aus Griechenland eine Streubreite von 95.4 - 268.3 MPa für frische und intakte Serpentinite und mehr oder weniger serpentinisierte Peridotite, 45.2 - 139.4 MPa für verwitterte Serpentinite und 95.1 - 174.4 MPa für Ophicalcite und breccierte Serpentinite. Leider fehlen aus Coumantakis' Berichten jegliche petrographischen Beschreibungen der Serpentinitproben.



Figur 6.1: Einaxialer Druckversuch. Spannungs-/Dehnungsdiagramme eines reinen Serpentinites (Probe 55Se-1-2a). σ_d: einaxiale Druckfestigkeit, E: Elastizitätsmodul, ε^p: Bruchdehnung und ν: Poissonzahl.

Tabelle 6.1: Grenzwerte von: einaxiale Druckfestigkeit σ_d, Elastizitätsmodul E, Poissonzahl ν und Bruchdehnung ε^p.

GESTEINSART	PROBE Nr.	σ_d [MPa]	E [MPa x 10^3]	ν	ε^p %
Reine Serpentinite	55Se-1	27.9 - 66.2	13.5 - 18.1	0.18	0.02 - 0.04
	58Ma-1	77.4 - 167.3	39.5 - 45.5	0.15 - 0.19	0.00 - 0.02
	81En-1	305.8 - 309.8	71.6 - 75.8	0.18	0.00 - 0.01
Pyroxenhaltige Serpentinite	55Se-2	83.8 - 259.3	24.9 - 71.4	0.18 - 0.22	0.00 - 0.02
	62Ma-4	41.0 - 131.5	19.8 - 42.9	0.13 - 0.24	0.00 - 0.02
	65To-1	50.5 - 87.8	22.0 - 41.1	0.14 - 0.24	0.01 - 0.03
	73To-1	48.5 - 122.1	22.0 - 45.4	0.20 - 0.37	0.00 - 0.03
Feinkörnige Peridotite	65To-2	97.1 - 132.9	43.6 - 54.6	0.27 - 0.32	0.00 - 0.01
Ophicalcite	53Se-1	30.4 - 74.4	20.9 - 35.8	0.09 - 0.30	0.00 - 0.04
	64To-1	57.8 - 133.9	17.4 - 53.3	0.08 - 0.30	
	66To-1	65.2 - 76.9	27.6 - 35.7	0.23 - 0.32	0.00 - 0.03
Ophidolomite	63Su-3	19.0 - 50.1	14.4 - 29.8	0.24 - 0.26	0.00 - 0.01
Karbonatführende Serpentinite	55Se-3	110.1 - 159.5	43.7 - 49.0	0.10 - 0.18	0.02 - 0.03
Malenco-Serpentinite	75Po-1	182.7 - 232.4	65.6 - 78.1	0.22 - 0.29	0.00 - 0.02
	75Po-2	69.8 - 147.2	43.9 - 62.8	0.13 - 0.20	0.00 - 0.02



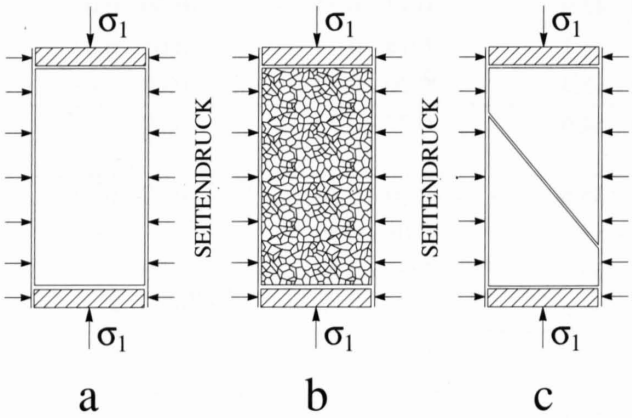
Figur 6.2: *Elastizitätsmodul im Verhältnis zur einaxialen Druckfestigkeit. Die vertikalen Linien beziehen sich auf die Festigkeitsklassifikation nach* DEER & MILLER *(1966) und* BIENIAWSKI *(1967):*

σ_d: ≤ 25 MPa: sehr geringe Druckfestigkeit
25 - 50 MPa: geringe Druckfestigkeit
50 - 100 MPa: mittlere Druckfestigkeit
100 - 200 MPa: hohe Druckfestigkeit
≥ 200 MPa: sehr hohe Druckfestigkeit

6.3 Triaxialer Druckversuch

6.3.1 Allgemeines

Für die Bestimmung der Festigkeitsparameter, Reibungswinkel φ und technische Kohäsion c, wurden triaxiale Druckversuche durchgeführt. Fig. 6.3 zeigt den Einbau verschiedenartiger Prüfkörper in die triaxiale Druckzelle.



Figur 6.3: Schematische Darstellung verschiedenartiger Prüfkörper beim triaxialen Druckversuch. σ_1: Axialspannung (weitere Erläuterungen im Text).

Im Prinzip kann die Methode bei folgenden Objekten angewandt werden:

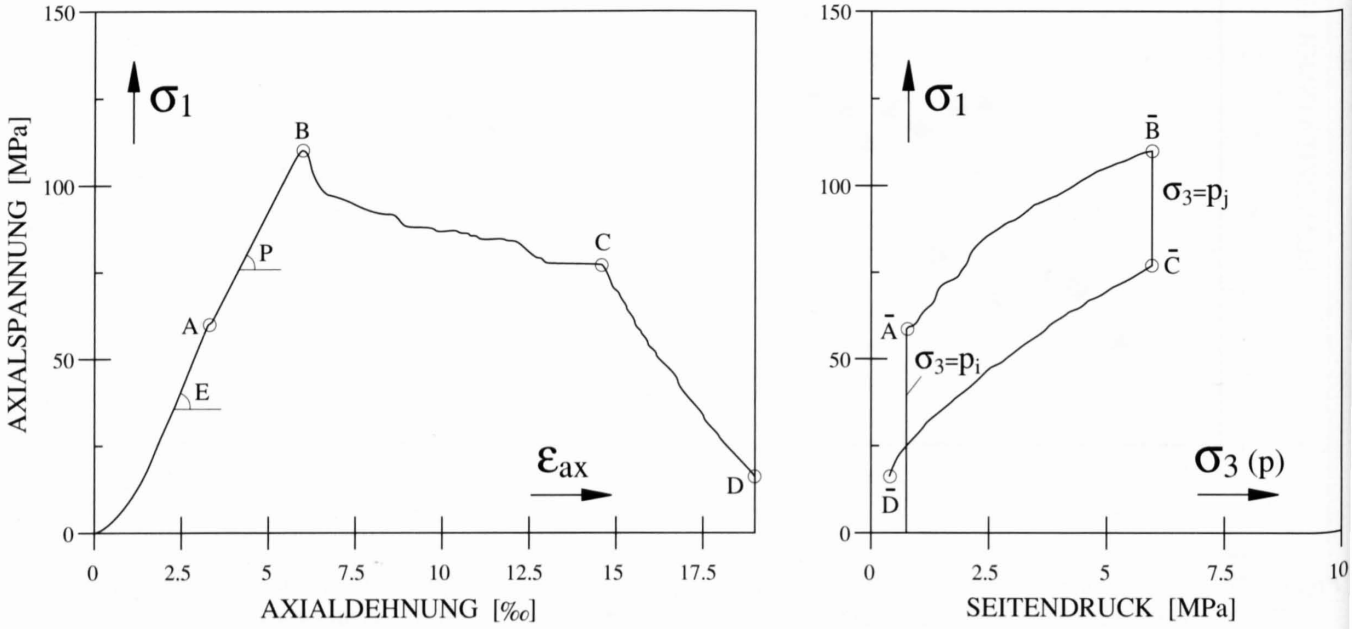
a) intakter Prüfkörper
b) stark zerklüftetes Material, in dem die Diskontinuitätsflächen kein definiertes Muster bilden.
c) Prüfkörper mit einer schon vorhandenen, durchgehenden, mehr oder weniger ebenen Diskontinuitätsfläche.

Im Falle a) kann die Festigkeit verschiedener Serpentinitarten und Serpentingefüge untersucht werden. Im Falle b) und c) können die Diskontinuitätsflächen aus verschiedenartigen Bruchflächen oder/und Adern bestehen. Im Falle c) können die Scherfestigkeitsparameter auf einer bereits vorhandenen Diskontinuitätsfläche ermittelt werden. Hier besteht auch die Möglichkeit, die Resultate mit denen eines direkten Scherversuches zu vergleichen.

6.3.2 Methodik

Die triaxialen Druckversuche wurden nach dem Konzept „Versuche mit kontinuierlichen Bruchzuständen" durchgeführt. Dieses Verfahren wird bei Kovari & Tisa (1975) und Kovari et al. (1983) ausführlich beschrieben. Der Vorteil dieser Methode liegt darin, dass man mit einem einzigen Prüfkörper die Mohr'sche-Umhüllende bzw. endliche Teile davon als Kurve ermitteln kann. Dies wird dadurch erreicht, dass durch manuelle Regulierung des Seitendruckes bei konstanter Zunahme der Stauchung neue Bruch- bzw. Fliesszustände erzeugt werden.

Die Fig. 6.4 zeigt Diagramme eines typischen Triaxialversuches. Der Versuch wird bei einem konstanten Seitendruck $\sigma_3 = p_i$ begonnen und bis zum Punkt A bzw. $\bar{A}$ konventionell gefahren. Hernach wird der Seitendruck derart gesteigert, dass der Spannungs-/Dehnungsschreiber (Fig. 6.4) der vorgewählten Geraden AB nachfährt. Die Neigung ist dabei geringer als im elastischen Abschnitt E. Gleichzeitig wird im Hauptspannungsschreiber (Fig. 6.4) die Kurve $\overline{AB}$ aufgezeichnet. Nach Überschreiten der Höchstfestigkeit wird der Prüfkörper unter einem frei gewählten konstanten Seitendruck $\sigma_3 = p_j$ bis zu einem Restwert (Punkt C) weitergestaucht. Zum Abschluss wird der Seitendruck kontinuierlich, bis zur totalen Entlastung (Kurven CD und $\overline{CD}$), herabgesetzt.



Figur 6.4: Typisches Diagramm eines Triaxialversuches mit kontinuierlichen Bruchzuständen (reiner Serpentinit mit Serpentinadern, Probe 55Se-1-2d; wie in Fig. 6.1). Die Punkte A, B, C, D entsprechen $\bar{A}$, $\bar{B}$, $\bar{C}$, $\bar{D}$. Weitere Erläuterungen im Text.

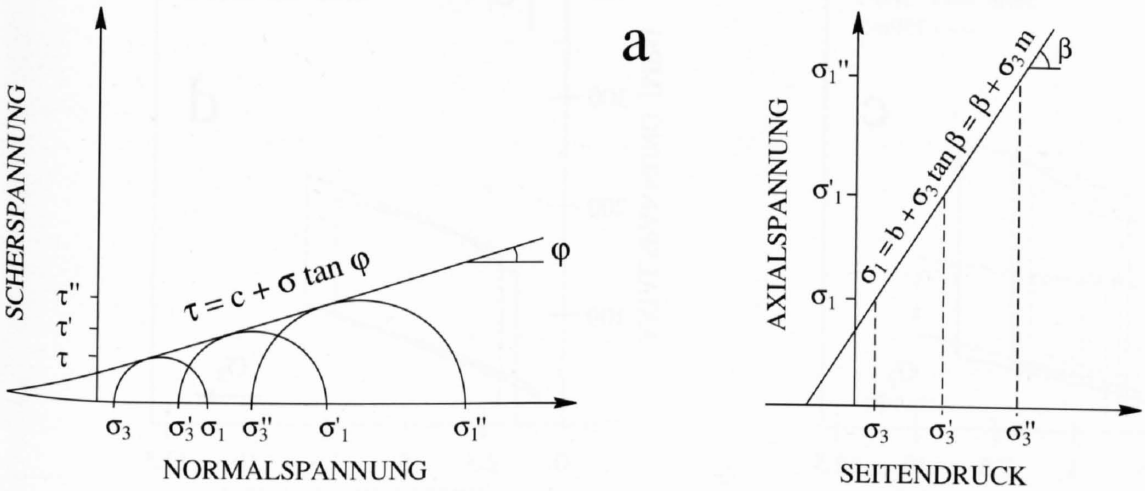
Bei der Bestimmung der Mohr'schen Umhüllenden spielt die Neigung P eine grosse Rolle. Sie zeigt sowohl eine Materialabhängigkeit als auch eine Spannungsabhängigkeit. Die oben erwähnten Autoren finden für die Neigung P die folgende Beziehung: $0.5 < P/E < 1.0$. Wegen des spröden Verhaltens der Serpentinite (vgl. Kap. 6.2.1; geringe ε^p) resultierten in den meisten Fällen sehr geringe Unterschiede zwischen P und E.

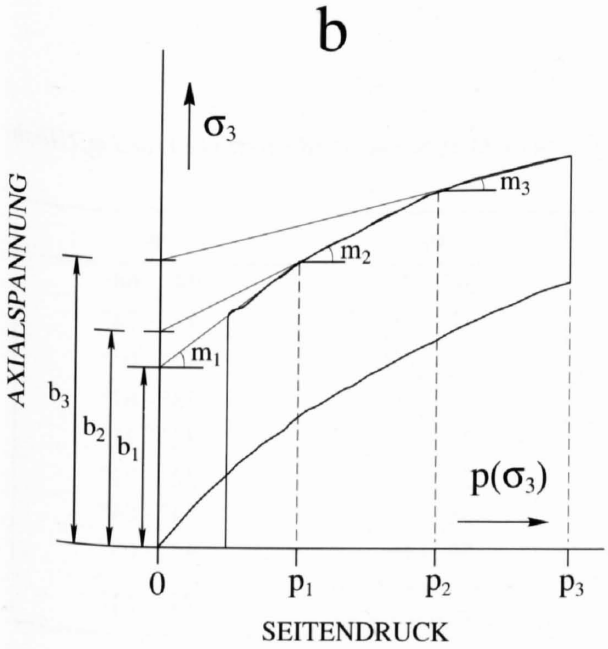
Für die Bestimmung der Festigkeitsparameter werden die erhaltenen Festigkeitskurven in bestimmten Seitendruckbereichen mit einer oder mehreren Geraden angenähert (Fig. 6.5b). Jede Gerade wird durch den Tangens der Neigung m und den Ordinatenabschnitt b bestimmt. Unter Verwendung dieser Parameter können der Winkel der inneren Reibung φ und die technische Kohäsion c im Sinne der Coulomb'schen Bruchtheorie (Fig. 6.5a) mit folgenden Formeln berechnet werden (ISRM, 1983):

$$\varphi = \arcsin \frac{m-1}{m+1} \qquad 6.2$$

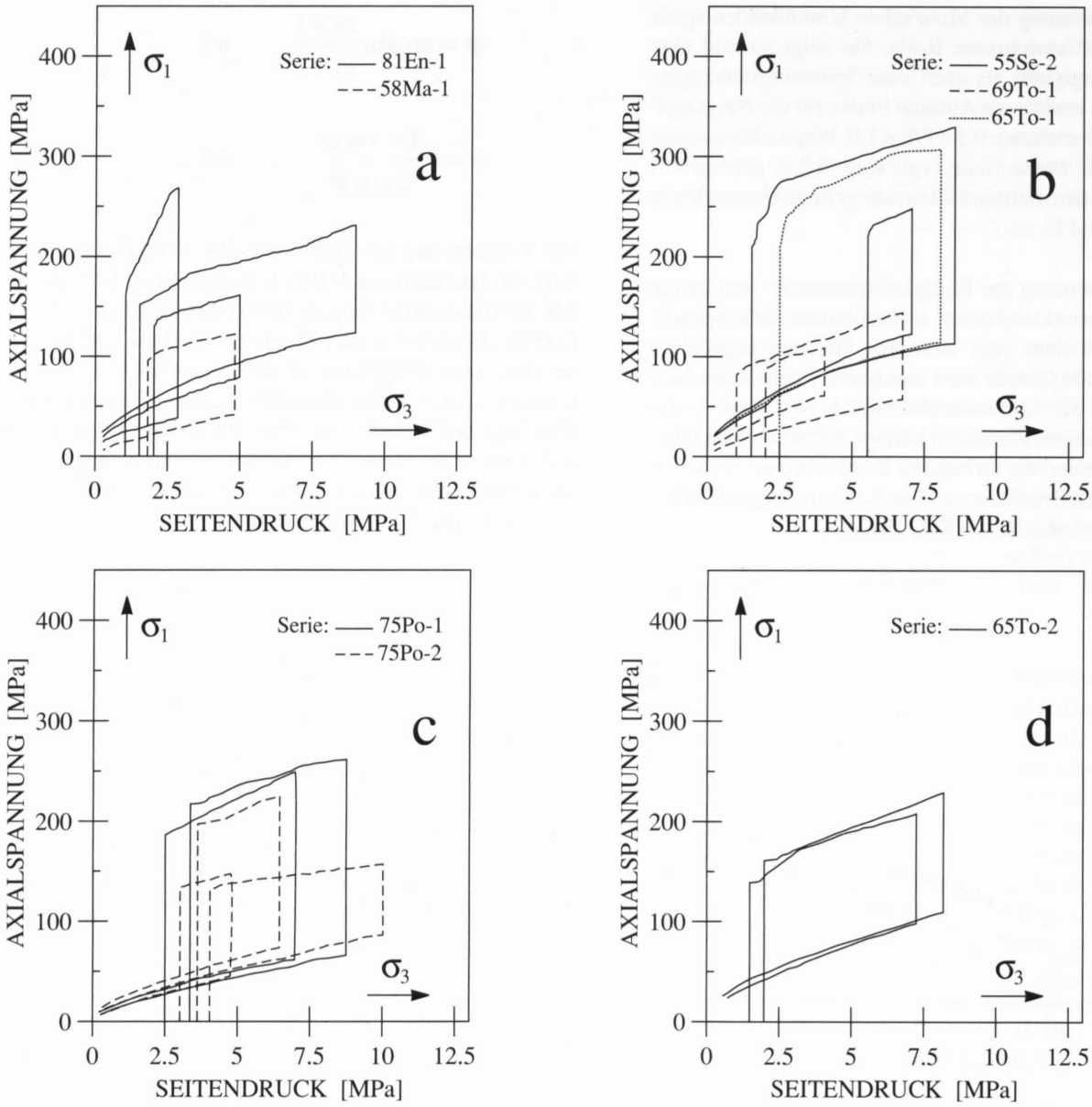
$$c = b \frac{1-\sin\varphi}{2\cos\varphi} \qquad 6.3$$

Die Vorbereitung der Proben und die Versuchsdurchführung erfolgte nach den ISRM-Vorschlägen (ISRM, 1983). Als Versuchsvorrichtung wurden Triaxialzellen vom Typ Franklin/Hoek verwendet (Franklin & Hoek, 1970). Wie bei den einaxialen Druckversuchen wurde die Deformationsgeschwindigkeit während des ganzen Versuches konstant bei 1.6×10^{-3} mm/s gehalten. Das Festigkeitsverhalten der Gesteine wurde bei Seitendrucken zwischen 0 und 13 MPa untersucht, also in dem Bereich, wo die meisten geotechnischen Problemen auftreten.





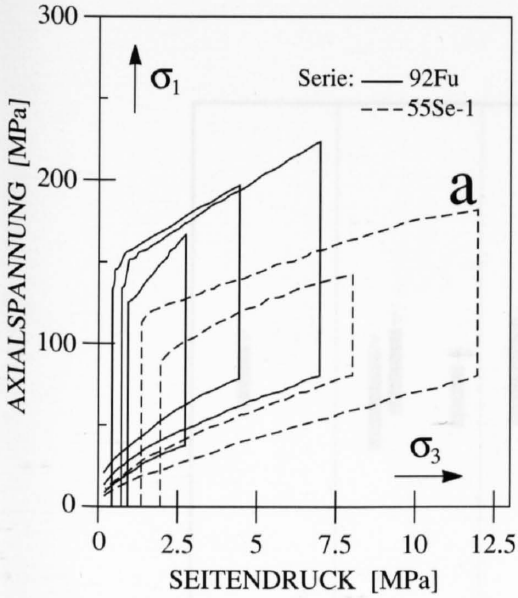
Figur 6.5: a) Festigkeitsparameter bei der Mohr-Coulomb'schen Bruchbedingung.
b) Beschreibung der Grenzkurve der Festigkeit (Höchstfestigkeit) in der Hauptspannungsebene (σ_1/σ_2) durch drei Geraden in den Seitendruckbereichen: 0 - p_1, p_1 - p_2 und p_2 - p_3, mit den Parametern m_i und b_i (ISRM, 1983).

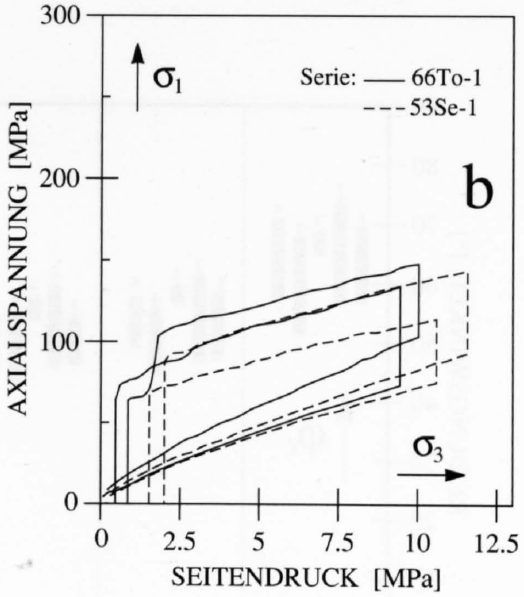


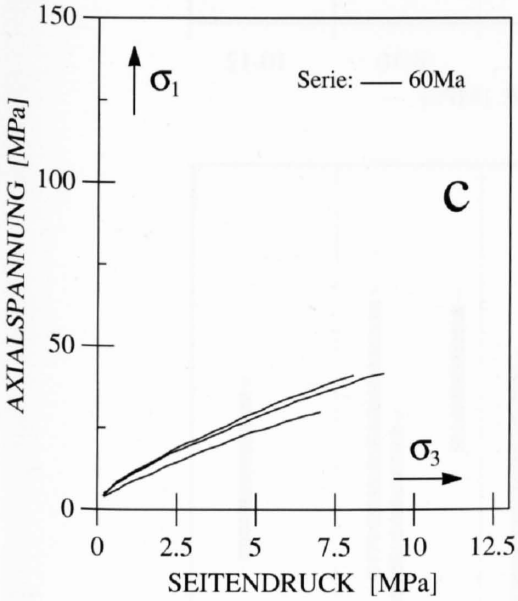
Figur 6.6: *Triaxiale Druckversuche mit kontinuierlichen Bruchzuständen. Hauptspannungsdiagramme von:*
a) reinen Serpentiniten
b) pyroxenhaltigen Serpentiniten
c) Malenco-Serpentiniten
d) feinkörnigen Peridotiten

Tabelle 6.2: *Wertebereich der aus triaxialen Druckversuchen ermittelten Reibungswinkel φ_r (Restfestigkeit) und φ_p (Höchstfestigkeit).*

GESTEINSTYP	φ_p	φ_r
Reine Serpentinite	34° - 75°	34° - 68°
Pyroxenhaltige Serpentinite	37° - 68°	42° - 74°
Feinkörnige Peridotite	43° - 62°	47° - 67°
Ophicalcite	26° - 59°	38° - 67°
Ophidolomite	26° - 56°	32° - 71°
Malenco-Serpentinite	22° - 56°	32° - 71°
Reine Serpentinite, stark durchsetzt mit Crossfibre-Adern	38° - 64°	34° - 64°
Reine Serpentinite, stark durchsetzt mit massigen Antigorit-Adern	54° - 66°	47° - 68°
Kataklastisch deformierte, reine Serpentinite mit einem unregelmässigen, dichten Netz aus Rutschharnische	Keine Grenzkurve für die Höchstfestigkeit	24° - 51°







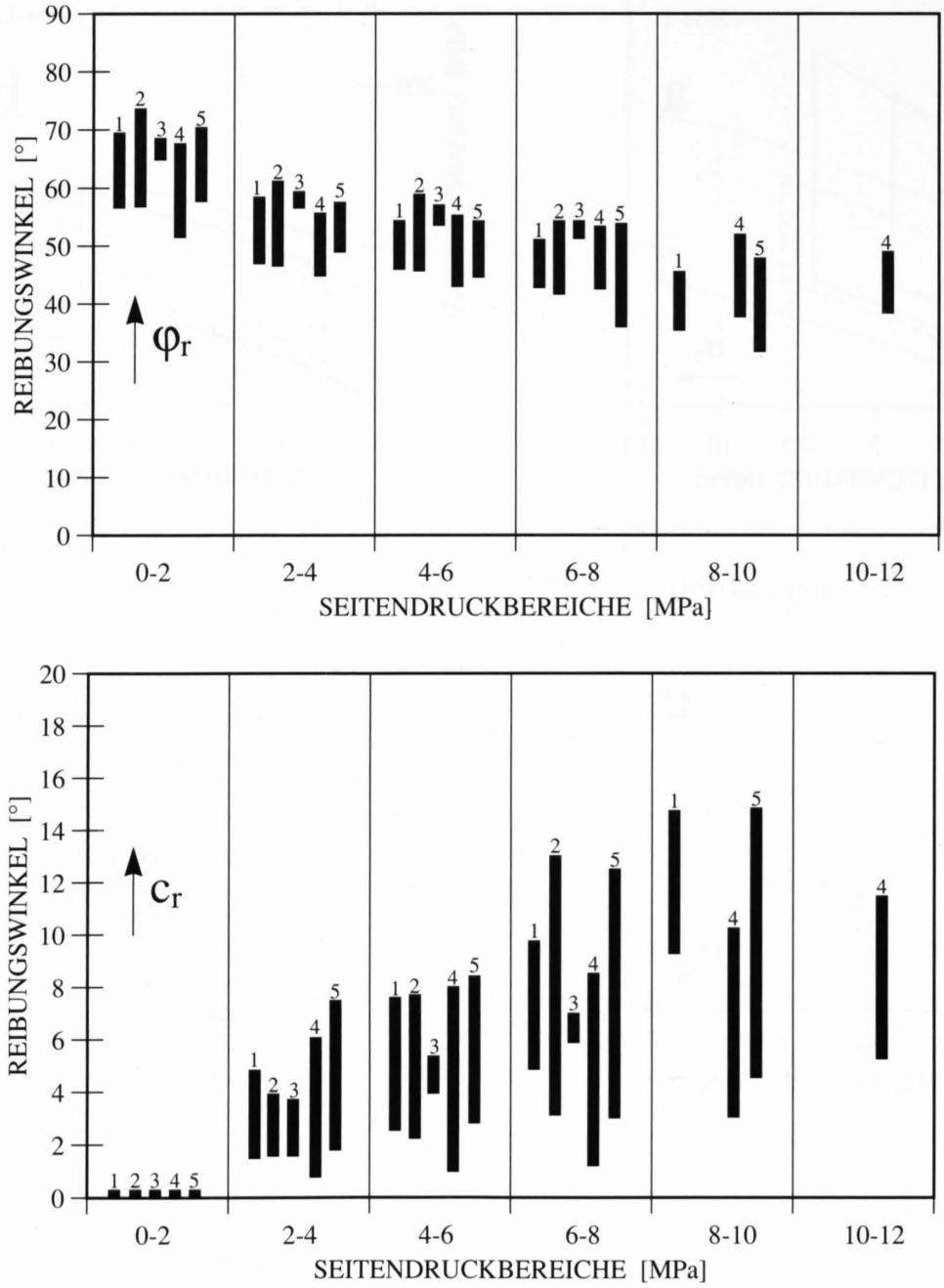
Figur 6.7: *Triaxiale Druckversuche mit kontinuierlichen Bruchzuständen. Hauptspannungsdiagramme von:*
a) Gesteinsserie 92Fu-1: stark mit massigen Antigoritadern durchsetzte reine Serpentinite und Gesteinsserie 55Se-1: stark mit parallelfaserigen Serpentinadern dursetzte reine Serpentinite.
b) Ophicalcite
c) stark mit Rutschharnischen durchsetzte reine Serpentinite. Keine Grenzkurven für die Höchstfestigkeit.

6.3.3 Ergebnisse

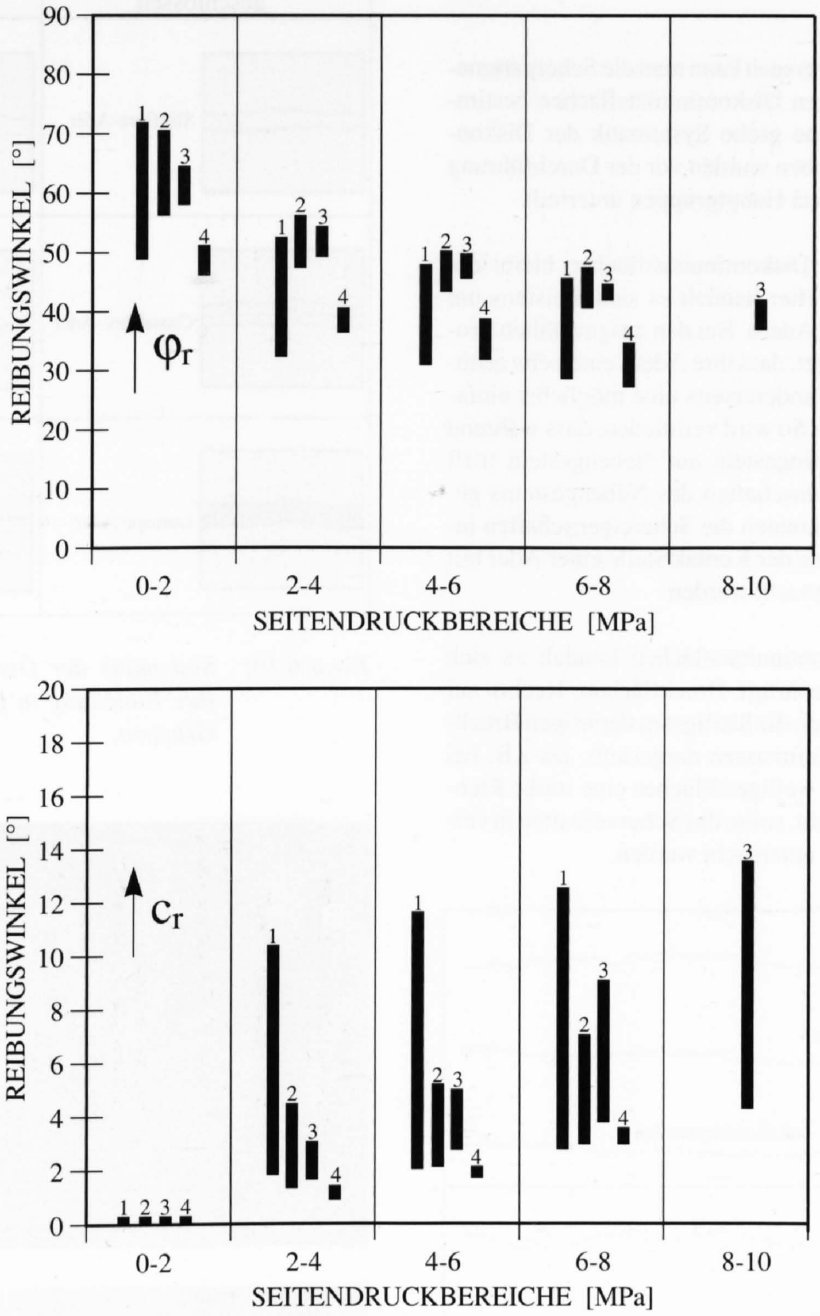
Es wurden insgesamt 74 triaxiale Druckversuche durchgeführt. In den Fig. 6.6 und Fig. 6.7 sind Hauptspannungsdiagramme mehrerer Versuche zusammengefasst. Zur besseren Übersichtlichkeit wurden in dieser Arbeit nur einige typische Resultate dargestellt. Bei den identischen Prüfkörpern konnte eine gute Reproduzierbarkeit der Versuche beobachtet werden.

Die Fig. 6.8 und 6.9 zeigen die Variation der ermittelten Restfestigkeitsparameter innerhalb verschiedener Seitendruckbereiche. Daraus wird sofort erkennbar, dass die Reibungswinkel φ_r kleineren Schwankungen unterworfen sind als die ermittelten c_r-Werte. Die Variationen der ermittelten Mohr'schen Umhüllenden werden auf die petrographische Beschaffenheit der Prüfkörper und ihre Bruchart zurückgeführt. Deshalb muss jedes Resultat einzeln studiert und die beiden Scherparameter c und φ müssen zusammen berücksichtigt werden. Die Resultate der triaxialen Druckversuche und die Beschreibung der Bruchflächen werden aus diesem Grund im Anhang B zusammengefasst. Die Bruchart und der Einfluss der Bruchflächen auf die intakten Gesteine werden im Kapitel 7 detailliert diskutiert.

Die Tab. 6.2 zeigt den Wertebereich der ermittelten Reibungwinkel φ_r (Restfestigkeit) und φ_p (Höchstfestigkeit). Demnach findet man die tiefsten Reibungswinkel bei den kataklastisch deformierten, reinen Serpentiniten (Probe 60-Ma). Die mit Serpentinadern durchsetzten Serpentinite zeigen immer eine Höchstfestigkeit (Fig. 6.7a) und ihre Festigkeitsparameter unterscheiden sich nicht von denjenigen intakter Serpentinite.



Figur 6.8: *Variationsbreite der Restfestigkeitsparameter c_r und φ_r von:*
1) reinen Serpentiniten
2) pyroxenhaltigen Serpentiniten
3) feinkörnigen Peridotiten
4) Ophikarbonaten
5) Malenco-Serpentiniten



Figur 6.9: *Variationsbreite der Restfestigkeitsparameter c_r und j_r von:*
1) vertalkten Serpentiniten
2) stark mit Serpentinadern durchsetzten reinen Serpentiniten
3) mit feinen Talkadern durchsetzten Serpentiniten
4) stark mit Rutschharnischen durchsetzten reinen Serpentiniten

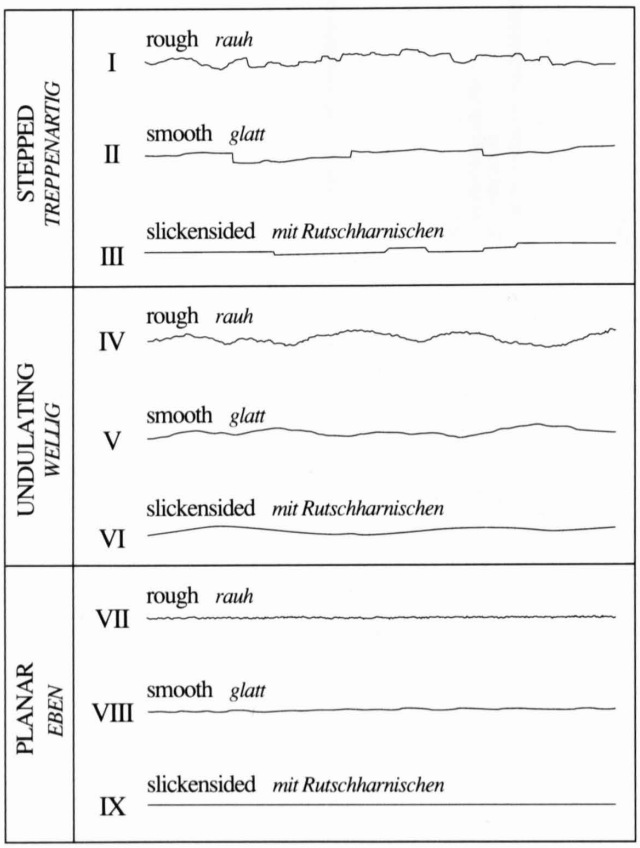
6.4 Direkter Scherversuch

6.4.1 Allgemeines

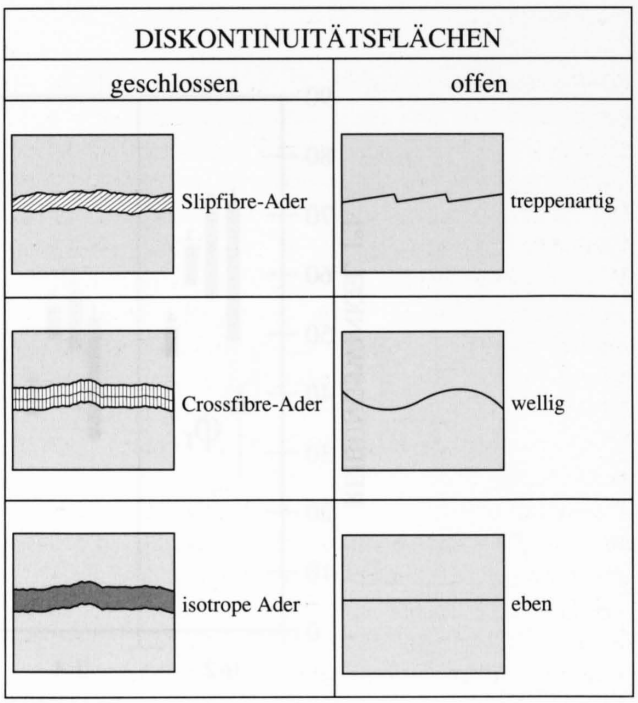
Mit dem direkten Scherversuch kann man die Scherparameter der verschiedenartigen Diskontinuitätsflächen bestimmen. Fig. 6.10 zeigt eine grobe Systematik der Diskontinuitätsflächen. Die Proben wurden vor der Durchführung der Scherversuche in zwei Hauptgruppen unterteilt.

Bei den geschlossenen Diskontinuitätsflächen bleibt der Versuchskörper intakt. Hier handelt es sich meistens um verschiedene Arten von Adern. Bei den ausgewählten Proben wurde darauf geachtet, dass ihre Adern einerseits genügende Mächtigkeit und andererseits eine möglichst einfache Geometrie besassen. So wird vermieden, dass während des Scherversuchs Nebengestein auf Nebengestein trifft und somit die Schereigenschaften des Nebengesteins gemessen werden. Damit können die Schereigenschaften innerhalb von Adern und an der Kontaktstelle einer Ader mit dem Nebengestein untersucht werden.

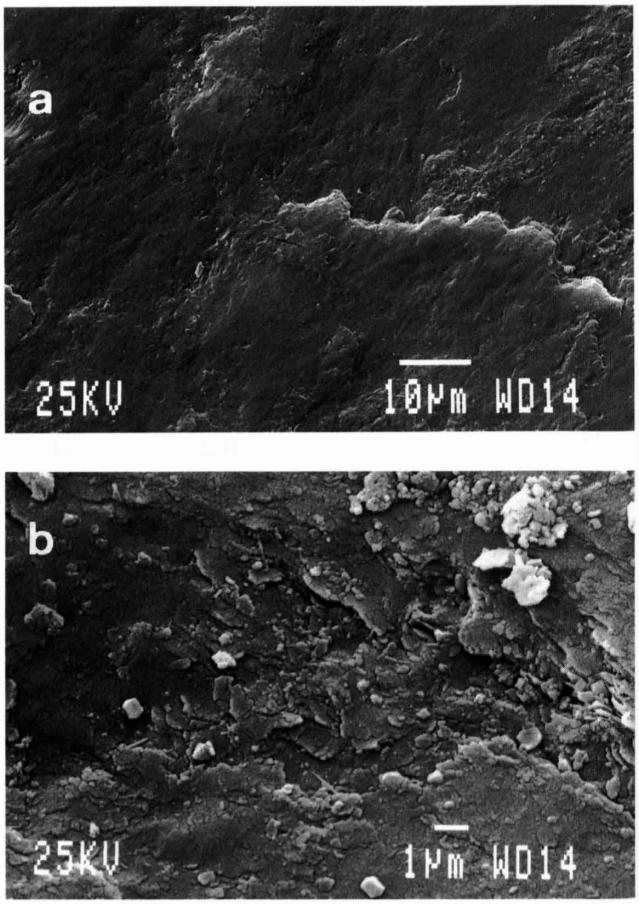
Bei den offenen Diskontinuitätsflächen handelt es sich meistens um verschiedenartige Bruchflächen. Rechts auf Fig. 6.10 sind schematisch die häufigsten derartigen Bruchflächen in den Serpentinitmassen dargestellt. Da z.B. bei den treppenartigen oder welligen Flächen eine starke Richtungsabhängigkeit besteht, sollte das Scherverhalten in verschiedenen Richtungen untersucht werden.



Figur 6.11: Typische Profile für Rauhigkeit und Unebenheit sowie vorgeschlagene Nomenklatur (nach ISRM, 1974). Nicht überhöht.



Figur 6.10: Systematik der Diskontinuitätsflächen und ihre Einteilung in geschlossene und offene Gruppen.



Figur 6.12: Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen von:
a) Probe 51Mu-A: mit Spiegelharnischen.
b) Probe 60Ma-1: mit Rutschharnischen, die mit Serpentinschuppen bedeckt sind.

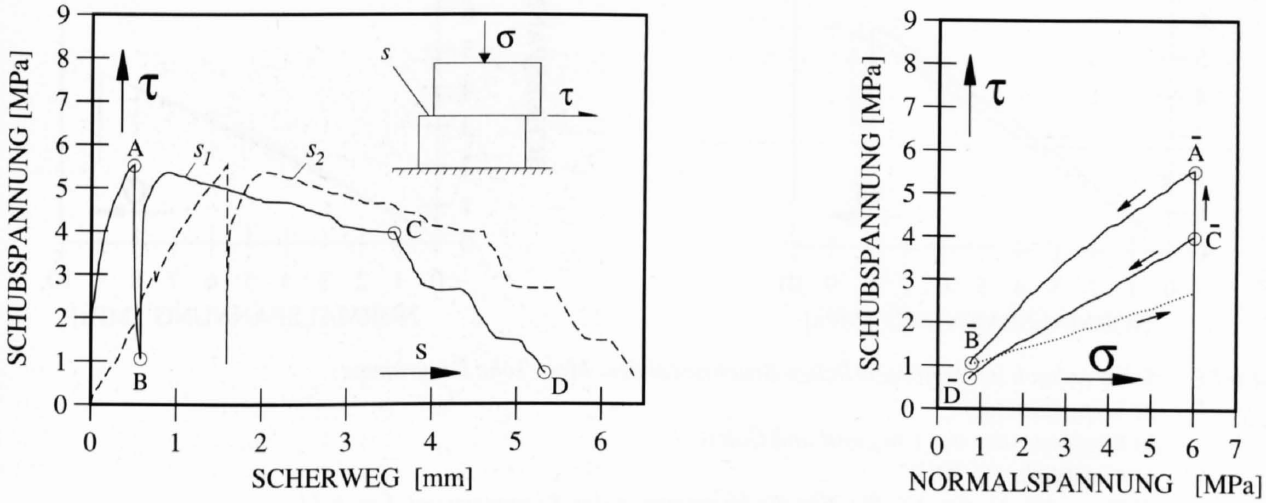
6.4.2 Methodik

Die Proben wurden nach den Richtlinien des ISRM (1974) vorbereitet. Vor dem Eingiessen des Scherkörpers in die Scherbox wurde bei den offenen Diskontinuitätsflächen mittels eines Texturabtasters deren Verlauf aufgezeichnet. Die aufgezeichneten Profile wurden dann nach ISRM-Nomenklatur (Fig. 6.11) klassifiziert (ISRM, 1974). Ein Vergleich zwischen Fig. 6.10 und Fig. 6.11 zeigt, dass sich diese Nomenklatur sehr gut für die Bruchflächen eignet. Die Begriffe „rough", „smooth" und „slickensided" müssen hier näher beschrieben werden. Die Begriffe „smooth" (glatt) und „slickensided" (mit Rutschharnischen) können Übergänge aufweisen und können vor dem Versuch oft nicht durch Texturabtaster unterschieden werden. Der Hauptunterschied zwischen den beiden Begriffen „smooth" und „slickensided" besteht darin, dass es sich beim ersten um eine reine Öffnung einer Dikontinuitätsfläche handelt, während „slickensided" mit einer Scherbewegung verbunden ist, was sich in den meisten Fällen durch gerichtete Strukturen auf der Trennfläche bemerkbar macht. Die sehr häufig in den Serpentinitmassen beobachteten, sehr glatten Spiegelharnische stellen wir zur Gruppe „slickensided", obwohl oft makroskopisch keine gerichtete Bewegung auf der Bruchfläche nachgewiesen werden kann.

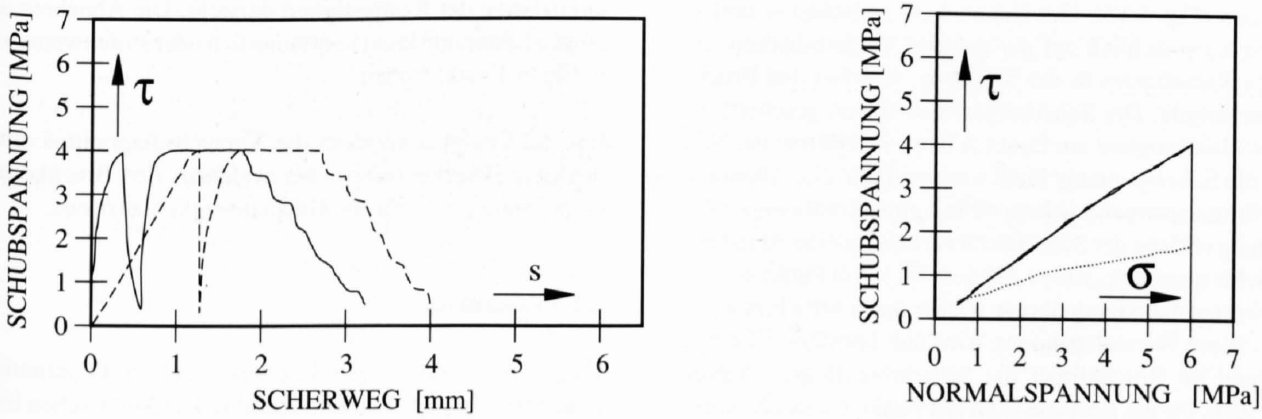
Fig. 6.12 zeigt Rasterelektronenmikroskopaufnahmen von solchen Diskontinuitäten. In diesem kleinen Massstab zeigen weder die Rutschharnische noch die Spiegelharnische eine Verzahnung, dagegen weisen schuppenartige Gebilde eindeutig auf eine Gleitung hin. Der Begriff „smooth" wird für Trennflächen definiert, die makroskopisch keine Verzahnung und keine gerichtete Struktur aufweisen.

Bei den Abscherungen wurde die Versuchsmethode „direkte Scherversuche mit kontinuierlichen Bruchzuständen" angewandt. Diese Technik basiert auf dem Konzept „Triaxiale Druckversuche mit kontinuierlichen Bruchzuständen" (Kovari et al., 1983, vgl. Kap. 6.3.2). Sie wird ausführlich bei Tisa & Kovari (1984) beschrieben. Der Vorteil dieser Methode gegenüber konventionellen Scherversuchen besteht darin, dass man mit einem einzigen Bruchkörper die Mohrsche-Umhüllende bzw. endliche Teile davon bestimmen kann.

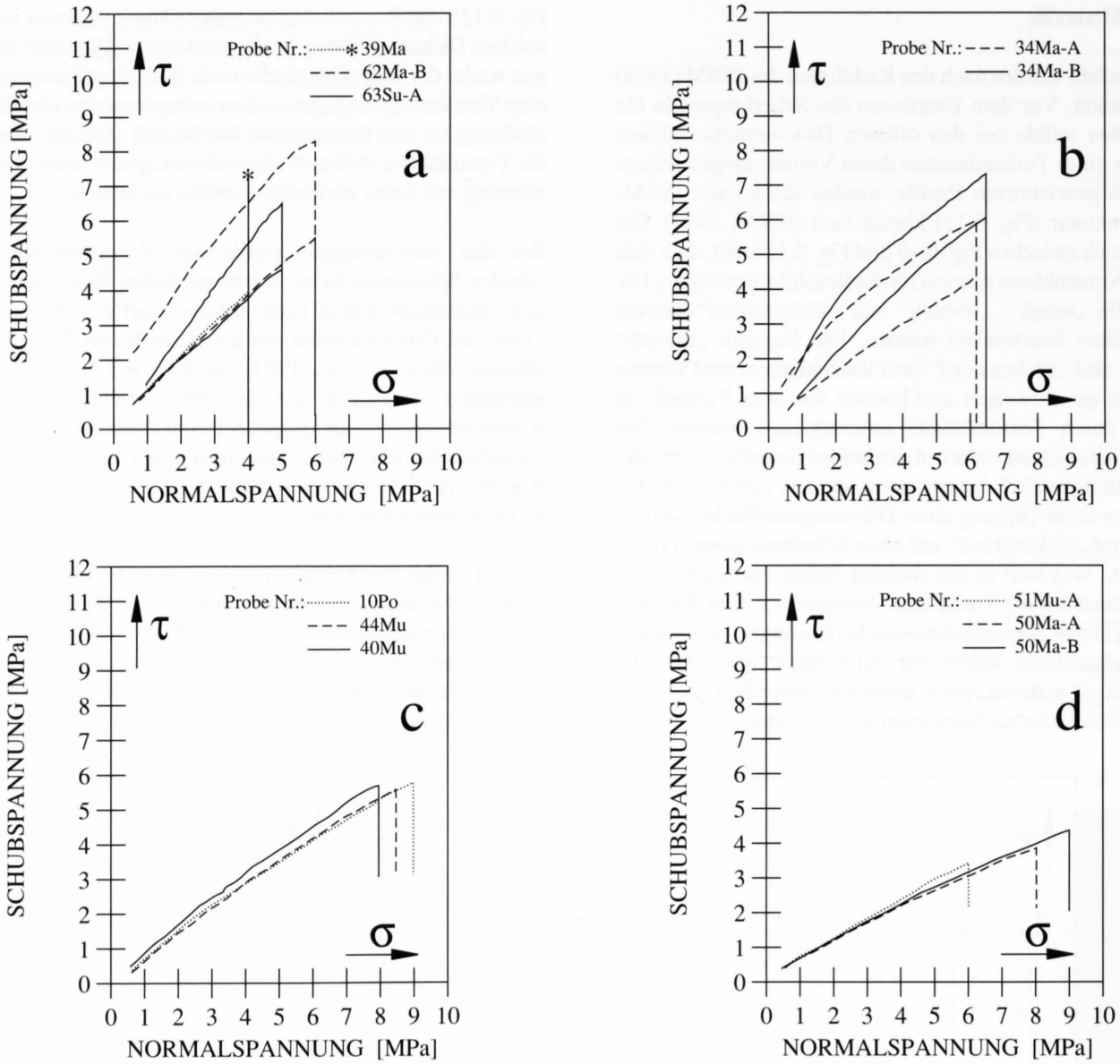
Fig. 6.13 zeigt den Ablauf eines typischen Direktscherversuches mit kontinuierlichen Bruchzuständen. Bei einer gewählten Normalspannung, in diesem Fall 6 MPa, beginnt man mit dem Versuch. Der Scherweg wird direkt an der Diskontinuitätsfläche (s_1) und an den steifen Platten der grossen Presse zur Erzeugung der Scherkraft (s_2) aufge-



Figur 6.13: Diagramme eines Scherversuchs, bei dem die Höchst- und die Restscherfestigkeit bestimmt wurde (Probe 91Fu-E: Parallelfaserige Antigoritader; z.T. mit Talk und Calcit).



Figur 6.14: Diagramme eines Scherversuchs, bei dem nur die Restscherfestigkeit bestimmt wurde (Probe 63Su-11: Kluftfläche; eben, glatt, Klasse VIII).



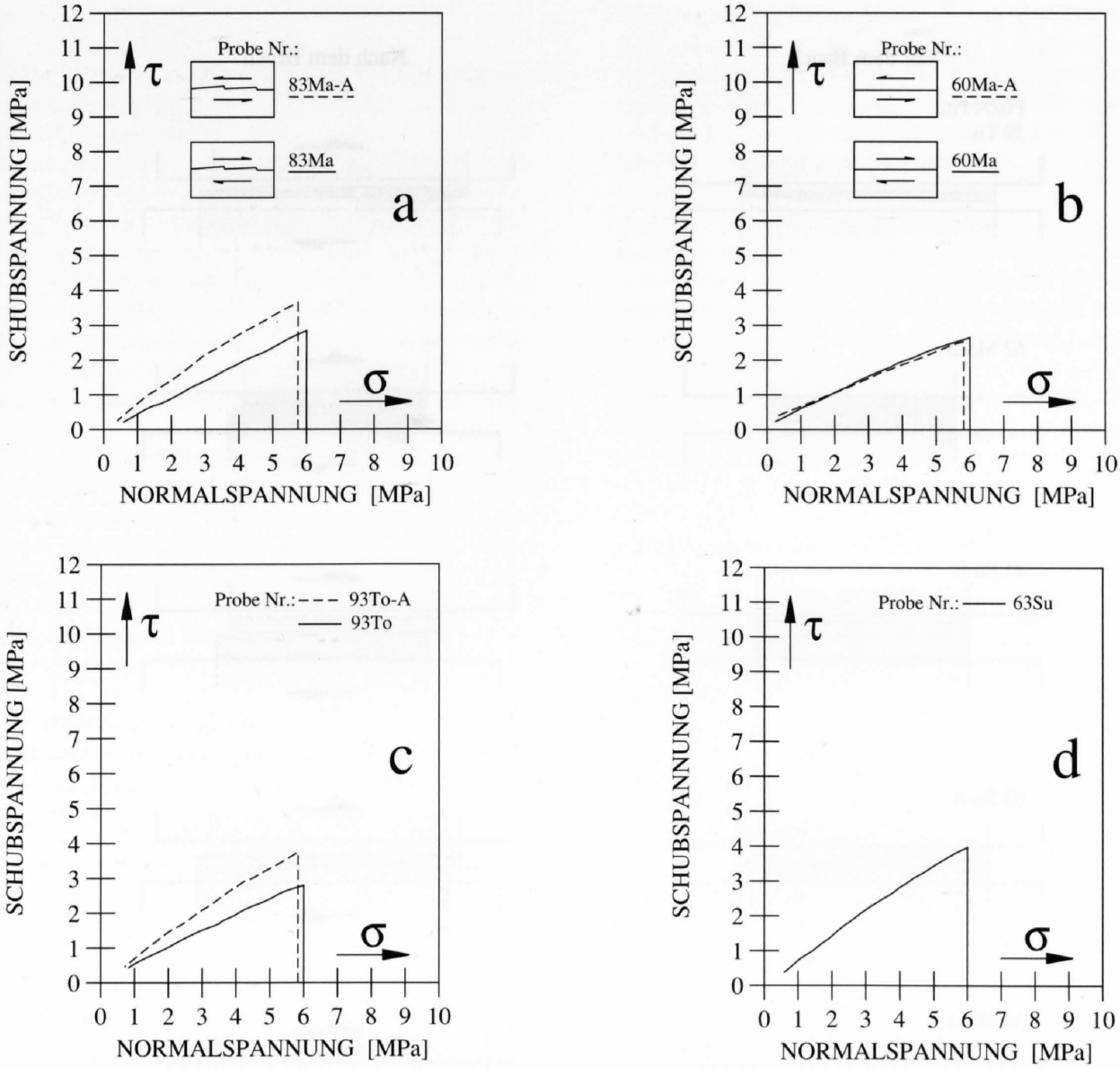
Figur 6.15: Scherversuch mit kontinuierlichen Bruchzuständen. Mohr'sche Diagramme:
a) Serpentinitader
b) Slipfibre-Ader aus Chrysotil und Calcit
c) Kluftfläche (V, VIII)
d) Spiegelharnische (VI, IX). Für die Nummern in den Klammern vgl. Fig. 6.11.

nommen (Fig. 6.13). Der Unterschied zwischen s_1 und s_2 beruht hauptsächlich auf der grossen Verformbarkeit des Epoxy Kunstharzes in der Scherbox, welches den Bruchkörper umgibt. Der Scherkörper wird soweit geschert, bis die Höchstfestigkeit am Punkt A bzw. $\overline{A}$ erreicht ist. Nun wird die Scherspannung nicht weiter erhöht. Die Abnahme der Normalspannung gekoppelt mit einer kontinuierlichen Gleitung entlang der Scherfläche verursacht eine Abnahme der Scherspannung (Kurve AB und $\overline{AB}$). Am Punkt B wird die Normalspannnung abrupt wieder auf 6 MPa hinaufgesetzt. Diese Normalspannung wird nun konstant gehalten, während im Bruchkörper die Scherbewegungen solange ansteigen, bis die Restfestigkeit am Punkt $\overline{C}$ erreicht wird. An diesem Punkt wird bei ständiger Scherung die Normalspannung herabgesetzt, sodass $\overline{CD}$ im τ-σ-Diagramm die Grenzkurve der Restfestigkeit darstellt. Die Abnahme der Normalspannung kann kontinuierlich oder stufenweise wie in Fig. 6.13 stattfinden.

Fig. 6.14 zeigt ausserdem die Versuchsdiagramme eines direkten Scherversuches, bei welchem der Bruchkörper keine Grenzkurve für die Höchstfestigkeit aufweist.

6.4.3 Ergebnisse

Insgesamt wurden 29 Direktscherversuche mit kontinuierlichen Bruchzuständen durchgeführt. Die Mohr'schen Diagramme ähnlicher Diskontinuitätsflächen sind in den Fig. 6.15 und 6.16 zusammengestellt.



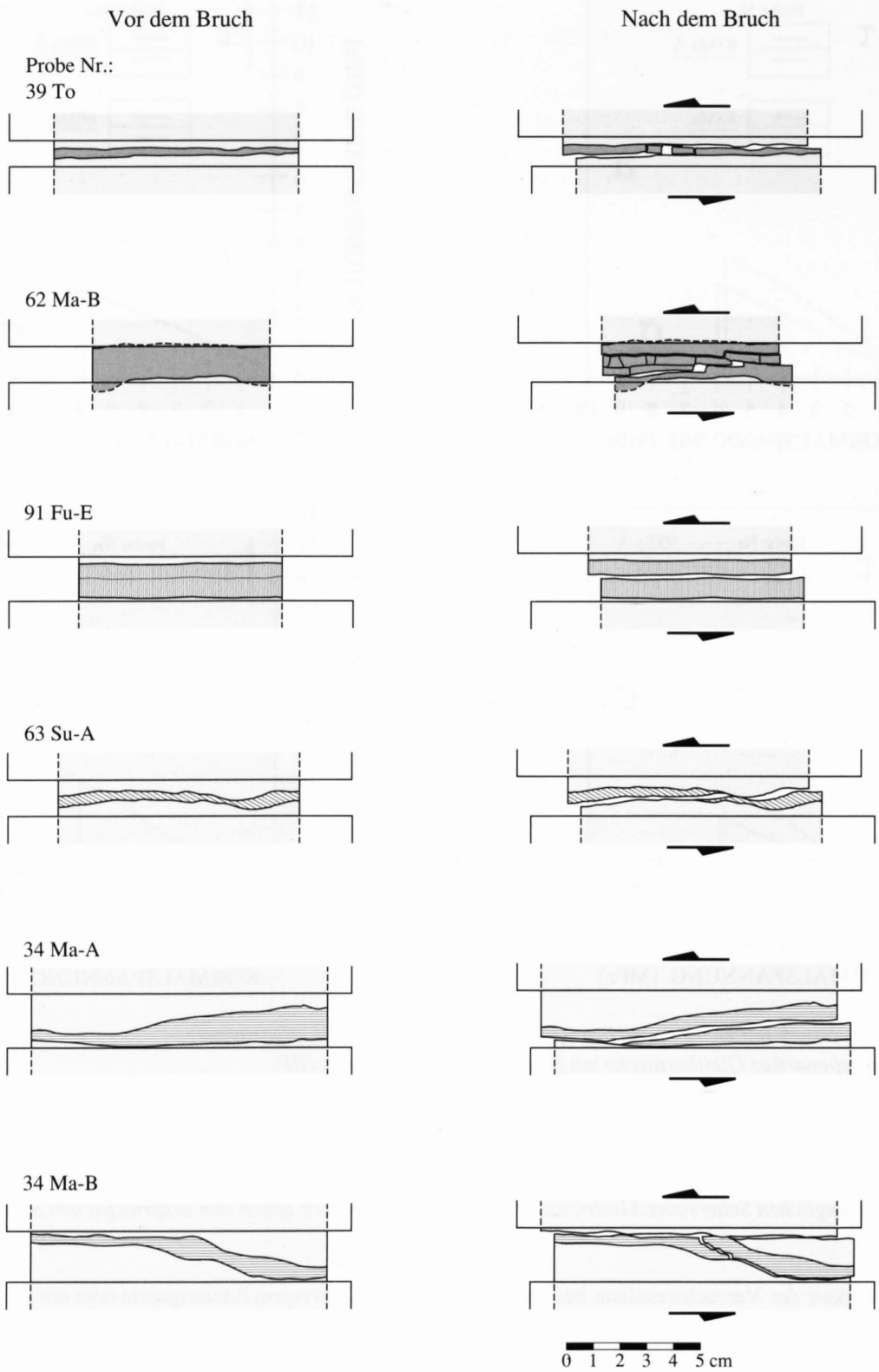
Figur 6.16: Scherversuch mit kontinuierlichen Bruchzuständen. Mohr'sche Diagramme:
a) treppenartige Gleitharnische mit feinen Serpentinschuppen (III)
b) ebene Rutschharnische mit feinen Serpentinschuppen (IX)
c) leicht unebene Rutschharnische mit faserigem Edelserpentin (VI)
d) Kluftflächen (VIII).
Für die Nummern in den Klammern vgl. Fig. 6.11. Ausgezogene Kurven: Scherversuch in Richtung des ursprünglichen Schersinns. Gestrichtelte Kurven: Scherversuch gegen den ursprünglichen Schersinn.

Die Reproduzierbarkeit der Versuchsresultate bei identischen Bruchkörpern ist sehr gut. Die ermittelten Scherparameter und die Beschreibung der Bruchkörper vor und nach dem Bruch sind im Anhang C zusammengefasst.

Die Reibungswinkel der Serpentinadern variieren zwischen 31° und 58° für die Höchstscherfestigkeit und zwischen 28° und 47° für die Restscherfestigkeit. Bruchflächen mit den Klassen V und VIII, d.h. „glatt und uneben" sowie „glatt und eben", zeigen Reibungswinkel zwischen 27° und 38° für die Restscherfestigkeit. Ebene und unebene Rutschharnische sowie Spiegelharnische, weisen Reibungswinkel der Restscherfestigkeit zwischen 13° und 30° auf.

Die mit faserigem Edelserpentin oder mit schuppenartigem Serpentin bedeckten Rutschharnische zeigen Reibungswinkel zwischen 17° und 27° für die Restfestigkeit. Der Scherversuch an einer massigen Aderfüllung aus Talk (ca. 3 mm dick) ergab Reibungswinkel zwischen 15° und 23° für die Restfestigkeit.

Je nach Prüfkörper wurde die Restscherfestigkeit nach einem Scherweg von ca. 1 bis 6 mm erreicht, wobei die geschlossenen Serpentinadern den längsten Scherweg und die Rutschharnische den kürzesten Scherweg zum Erreichen der Restscherfestigkeit brauchten.



Figur 6.17: Bruchkörper mit Serpentinader vor und nach dem Bruch.
Proben 39To und 62Ma-B: Crossfibre-Ader aus Chrysotilfasern
Probe 91Fu-E: langfaserige Antigoritader
Probe 63Su-A: Slipfibre-Ader aus Chrysotil
Probe 34Ma: Slipfibre-Ader aus Chrysotil und Calcit
Die Schraffur bei den Serpentinitadern zeigt die parallele Richtung der Faser, hellgrau: Gastgestein, dunkelgrau: Crossfibre-Ader. Weitere Erläuterungen vgl. Text.

6.4.4 Serpentinadern

Die Fig. 6.17 zeigt den Einbau und den Bruchmechanismus bei den untersuchten Serpentin-Adern. Die Crossfibre-Adern 39To und 62Ma-B zeigen einen ähnlichen strukturellen und petrographischen Aufbau. Sie bestehen röntgenographisch zu einem grossen Teil aus Chrysotil und einem geringen Anteil aus Lizardit. Fig. 3.9 zeigt den mikroskopischen Aufbau dieser Ader. Die dickere Serpentinader 62-Ma-B wurde so in die Scherbox eingebaut, dass die Kontaktfläche Ader/Nebengestein zum grössten Teil im Kunstharz lag. So war es möglich, das Scherverhalten innerhalb der Ader zu untersuchen. Bei den Crossfibre-Adern findet nach der Scherung eine starke Zertrümmerung des Adermaterials und z.T. des unmittelbar angrenzenden Gastgesteins entlang der Bruchfläche statt. Die Bruchfläche läuft in beiden Fällen parallel zur Grenze Ader/Nebengestein. Obwohl die Bruchfläche bei der Probe 39To hauptsächlich der Grenze zwischen Ader und Nebengestein folgt, durchtrennt die Bruchfläche lokal auch Adermaterial. Dies, wie auch die erhaltene Höchstscherfestigkeit (Fig. 6.15a), spricht für eine gute Adhäsion zwischen dem Adermaterial und dem Nebengestein.

Die langfaserige Antigoritader, Probe 91Fu-E, besteht hauptsächlich aus Antigorit und sehr wenig Chrysotil. Teilweise innerhalb der Fasern, vor allem aber entlang der Mittelnaht findet sich eine millimetergrosse Ansammlung von massigem Calcit und/oder Talk. Die Bruchfläche entstand hier entlang der Mittelnaht (Fig. 6.17). Die senkrecht zur Bruchfläche stehenden Antigoritfasern wurden z.T. ausgefasert und umgekippt.

Die Slipfibre-Adern 63Su-A und 34Ma-A wurden parallel zu ihrem ursprünglichen Schersinn zerbrochen und versetzt, im Falle von Probe 34Ma-B in der entgegengesetzten Richtung der ursprünglichen Bewegung. Die Bruchfläche läuft z.T. parallel zu den Slipfasern, z.T. aber auch entlang der Grenze Ader/Nebengestein. Bei der Probe 63Su-A findet die Gleitung parallel zu den Fasern durch eine grosse Dilatation statt, der Bruch aber verläuft entlang des kürzesten Weges quer durch die Fasern (Fig. 6.17). Auf der Bruchfläche 34Ma-A folgt der Bruch nur teilweise den parallelen Chrysotil-Fasern. Hier findet man in der Bruchfläche auch Kontaktstellen aus Calcit, die stark zermahlen worden sind. Bei Probe 34Ma-B behindert der Kontakt Ader/Nebengestein den Verlauf eines Bruches durch die Ader und zwingt zum Ausweichen ins Nebengestein (Fig. 6.17). Wie aus Fig. 6.15b erkennbar ist, steigt dadurch der Widerstand gegen die Scherbewegung beträchtlich. Wir schliessen daraus, dass die Scherfestigkeit entlang den nicht ebenen Slipfibre-Adern richtungsabhängig ist.

6.4.5 Rutschharnische und Bruchflächen

Fig. 6.15c, 6.15d und die Fig. 6.16 zeigen die Mohr'schen Diagramme von typischen offenen Diskontinuitäten in den Serpentinitmassen. Die Proben 83Ma und 93To (Fig. 6.16a und 6.16c) zeigen eine Richtungsabhängigkeit. Bewegt man die Bruchkörper entlang dem ursprünglichen Schersinn, so werden tiefere Scherfestigkeitsparameter erzielt. Entgegen unserer Erwartung haben wir bei gegensinnigen Bewegungen bei den Proben 83Ma-A und 93To-A keine Höchstfestigkeit gefunden (Fig. 6.16a und 6.16c). Nach dem Scherversuch waren in diesen Fällen die Treppenabsätze bei Probe 83Ma-A mit Serpentin-Schuppen ausgefüllt, bei Probe 93To-A dagegen wurden die parallelen, feinfaserigen Edelserpentine im Rutschharnisch zermahlen und auf der Bruchfläche verteilt. Die planaren Gleitharnische von Probe 60Ma zeigten dagegen keinen Einfluss der Bewegungsrichtung auf die Scherfestigkeit (Fig. 6.16b).

7 INTERPRETATION DER ERMITTELTEN RESULTATE UND IHRE ANWENDUNG AUF DIE FELSMASSE

7.1 Intakte Serpentinite

Zu Beginn dieser Arbeit war es unser Ziel, den Einfluss der petrographischen Gegebenheiten auf die technischen Eigenschaften bei den intakten Serpentiniten zu untersuchen, weshalb wir auch einen sehr grossen Aufwand bei den Probenentnahmen getrieben haben. Aber wie aus dem Kapitel 4 zu entnehmen ist, zeigen die Serpentinite einen sehr komplizierten petrographischen Aufbau. Der mineralogische und strukturelle Aufbau ist in den meisten Fällen inhomogen und wechselhaft. Ausserdem sind diese Gesteine häufig tektonisch entfestigt und sie enthalten verschiedene Diskontinuitätsflächen. Aus diesen Gründen scheint es sehr schwierig oder in manchen Fällen sogar unmöglich zu sein, den Einfluss einzelner petrographischer Faktoren bei den intakten Serpentiniten ingenieurgeologisch zu erfassen. Um trotzdem eine Übersicht zu geben, wurden die Resultate der Triaxialversuche in einem separaten Anhang dargestellt. Jede Gesteinsprobe reagiert auf Grund des unterschiedlichen petrographischen Aufbaus und der daraus resultierenden Bruchart anders.

Trotz der komplizierten Natur der Serpentinite sollen vorerst einige interessante petrographische Aspekte bei den intakten Serpentiniten gegeben werden, um anschliessend den Einfluss der Diskontiuitätsflächen auf sie zu untersuchen. Wir müssen allerdings darauf hinweisen, dass die bescheidene Anzahl der durchgeführten einaxialen und triaxialen Druckversuche bezüglich der Petrographie keine detaillierten Aussagen erlaubte.

7.1.1 Serpentinitgefüge

Die reinen Serpentinite zeigen praktisch alle bekannten Serpentingefüge, wobei Maschenstrukturen und Bastite eher charakteristisch für die pyroxenhaltigen Serpentinite zu sein scheinen (vgl. Tab. 4.2 und 4.3). Im nördlichen Teilgebiet findet man vorwiegend Maschenstrukturen und Bastite aus Chrysotil und Lizardit, welche gegen Süden mit steigender Metamorphose allmählich von Antigoritgefügen (überwiegend Durchdringungs- und Gittergefüge, seltener Verzahnungsgefüge) überprägt werden. Wie aus Tab. 4.2 zu entnehmen ist, finden wir die Serpentingefüge nur in seltenen Fällen in reiner Form. Aus den einaxialen und triaxialen Druckversuchen kann zusammenfassend festgestellt werden, dass die Antigorit-Serpentinite eine höhere Druckfestigkeit als die Chrysotil-Lizardit-Serpentinite aufweisen. Mit anderen Worten verbessern sich die felsmechanischen Eigenschaften der reinen Serpentinite mit steigender Metamorphose. Eine Ausnahme macht die wenig metamorphe, aber sehr feinkörnige Probe 65To-1 aus Totalp bei Davos, welche eine sehr feinkörnige Maschenstruktur und ein Verzahnungsgefüge aufweist.

Die Bastite verschlechtern auf Grund ihrer grobkörnigeren Ausbildung und ihrer Spaltbarkeit im allgemeinen die felsmechanischen Eigenschaften. Dies könnte ein Grund für die geringe Festigkeit in den bastitreicheren Proben 69To-1 und 73To sein.

Makroskopisch stellen die reinen Serpentinite in den meisten Fällen sehr feinkörnige und massige Gesteine dar. Die Serpentinmineralien können nur bis ca. 0.2 mm gross werden, in den pyroxenhaltigen Serpentiniten werden die Pyroxene und ihre Pseudomorphosen (Bastite) bis ca. 5 mm gross.

7.1.2 Mineralogie

Wie aus der Tabelle 4.1 hervorgeht, zeigen die Serpentinite einen sehr wechselhaften mineralogischen Aufbau, weshalb es unmöglich ist, den Einfluss der einzelnen Mineralien auf die mechanischen Eigenschaften zu untersuchen. Aufgrund der Druckversuche lässt sich immerhin aussagen, dass generell mit der Zunahme der dunklen Mineralien (Olivin, Pyroxen und Amphibol) ein Anstieg der Druckfestigkeit festzustellen ist. Diese Tendenz wird auch durch Versuche von COUMANTAKIS (1982) über Serpentinite (mehr oder weniger serpentinisierte Peridotite und reine Serpentinite) aus Griechenland bestätigt.

7.1.3 Serpentinisierung

Beim Prozess der Serpentinisierung kann zweierlei stattfinden: Einerseits können die dunklen Mineralien serpentinisiert werden, andererseits können sich bei der tektonischen Entfestigung Serpentinmineralien neu auf den Bruchflächen bilden, was zur Bildung der Crossfibre- und Slipfibre-Adern führt. Die Serpentinisierung in Form der Aderbildung wirkt heilend auf die entfestigten Felsmassen, verbessert also die Felsqualität.

Nach unserer Auffassung ist es falsch anzunehmen, die Felsqualität verschlechtere sich einzig und allein wegen der Serpentinisierung. Eine viel grössere Rolle spielen die tektonischen Ereignisse und Verformungen, welche die Serpentinisierung begleiten. Serpentinite, die tektonisch nicht spröd deformiert sind, können sehr grosse Festigkeiten aufweisen. Der Grad der spröden Deformation ist deshalb ein wichtiges Kriterium bei der Beurteilung der Festigkeit.

7.1.4 Bruchart nach Druckversuchen

Obwohl die reinen und die pyroxenhaltigen Serpentinite in den meisten Fällen eine mikroskopische Einregelung aufweisen, wirken sowohl die Chysotil-Lizardit-Serpentinite als auch die Antigorit-Serpentinite makroskopisch sehr massig. Sie lassen sich normalerweise nur entlang Rissen, Klüften und Rutschharnischen aufbrechen. Dies ist auch zum grössten Teil bei den Druckversuchen der Fall. Die höchsten Druckfestigkeiten wurden immer dann erreicht, wenn die Bruchflächen ganzheitlich durch intaktes Gestein laufen (Fig. 7.3).

Bei den Ophikarbonaten verläuft die Bruchfläche je nach Orientierung der Prüfkörper entweder entlang der Grenze Calcitmaterial/Serpentinitbrekzien oder parallel zur Bänderung. Obwohl sich die Serpentinitbrekzien der Ophicalcite vom nördlichen (Proben 67To, 66To und 64To) und südlichen Teilgebiet (Probe 53Se) in ihren Serpentingefügen sehr stark voneinander unterscheiden, zeigen sie ähnliche Festigkeiten. Dies könnte auf ihr ähnliches Bruchverhalten zurückgeführt werden. Die Serpentinit-Brekzien der Probe 53Se zeigten sehr oft Spiegelharnische nach dem Druckversuch. Die höheren Festigkeiten wurden dann gemessen, wenn die Bruchfläche in calcitischem Material verlief.

Bei den vertalkten Serpentiniten verläuft die Bruchfläche immer durch S-Flächen. Wenn die Bruchfläche entlang der antigoritreichen Partien verläuft, findet man die tiefsten Scherparameter und die Bruchfläche zeigt einen Spiegelharnisch. Geht die Bruchfläche entlang der tremolitreichen Partien, dann ist sie rauh und uneben. Im zweiten Fall findet man die grössten Scherparameter.

7.2 Serpentinitmassen durchsetzt mit Diskontinuitätsflächen

Die meisten Serpentinitmassen sind durch tektonische Aktivitäten mehr oder weniger entfestigt worden. Die tektonischen Bewegungen führen je nach Metamorphosebedingungen zur Umkristallisation im Gesteinsgefüge und/oder zur Bildung von Bruchflächen und Rutschharnischen und/oder syntektonischen Adern in den Serpentinitmassen.

7.2.1 Bruchflächen und Rutschharnische

Die Wirkung von Bruchflächen und Rutschharnischen auf die Serpentinitmassen möchten wir anhand zweier Beispiele veranschaulichen. Es sind dies die Proben 60Ma und 73To-1, deren petrographische Beschreibung in den Kapiteln 4.2.1 und 4.2.2 zu finden ist. Diese zwei Gesteinsproben sind sehr typisch für viele durch Bruchflächen und Rutschharnische entfestigte Serpentinitmassen. Anschliessend seien die Resultate von Triaxialversuchen der Proben 3Ma-b, 4Ma und 6Ma mit ebenen und welligen Spiegelharnischen näher diskutiert.

Probe 73To-1

Die pyroxenhaltige Serpentinitmasse ist mit (von Edelserpentinen bedeckten) Rutschharnischen durchsetzt. Fig. 7.1 zeigt die Resultate von triaxialen Druckversuchen an drei verschiedenen Prüfkörpern. Der intakte Prüfkörper (ausgezogene Linie) zeigt die höchste Grenzkurve für die Festigkeit. Dieser gesunde und frische Prüfkörper besitzt keine Risse, weshalb die Bruchfläche durch das intakte Gestein läuft. Die Bruchfläche ist rauh und uneben. Der mit vielen Rissen durchsetzte Prüfkörper dagegen (gestrichelte Linie) zeigt eine tiefere Festigkeit als der intakte Prüfkörper. Dieser zerfällt nach dem Bruch in viele unterschiedlich grosse, eckige Bruchstücke. Die Polyeder zeigen auf ihren Flächen sowohl Rutschharnische (z.T. bedeckt mit Edelserpentin) als auch rauhe, frische Bruchflächen. Da eine Höchstfestigkeit sowie Bruchflächen durch das Gestein zu beobachten sind, können wir den Schluss ziehen, dass die Verschiebungen streckenweise den Rutschharnischen folgen können, im übrigen aber ihren Weg über Materialbrücken finden müssen. Auch andere Proben ergaben immer eine Höchstfestigkeit, falls der Scherweg sowohl über Rutschharnische als auch über Materialbrücken führte. Beim dritten Prüfkörper (punktierte Linie) finden wir einen durchgehenden Rutschharnisch. Der triaxiale Druckversuch zeigt keine Höchstfestigkeit.

Probe 60Ma

Die Probe 60Ma wurde in gefrorenem Zustand gewonnen (vgl. Kap. 5.3). Die Probe ist stark mit unregelmässig verlaufenden Rutschharnischen durchsetzt (Fig. 7.2). Die Resultate der Scherversuche entlang der Rutschharnische wurden bereits im Kap. 6.4.3 vorgestellt (vgl. Fig. 6.16b); jene der triaxialen Druckversuche findet man in Fig. 6.7b. Sie wurden zum Vergleich auf einem Mohr'schen Diagramm (Fig. 7.2) dargestellt. Die Proben aus dem triaxialen Druckversuch und dem direkten Scherversuch zeigen keine Höchstfestigkeit. Aus den triaxialen Druckversuchen erhält man je nach Bruchart unterschiedliche Resultate. Schematisch sind die Prüfkörper nach dem Bruch in Fig. 7.2 dargestellt. Wenn der Bruchkörper keine Hauptbruchfläche zeigt, dann erhält man höhere Scherparameter, als bei jenen mit einer eindeutigen Hauptbruchfläche. Die Hauptbruchfläche ist stark uneben (wellig). Aus den triaxialen Druckversuchen erhalten wir φ-Werte zwischen 24° und 51° für die Restfestigkeit. Resultate von triaxialen Druckversuchen an stark zertrennter Felsmasse werden von JÄGER (1969) präsentiert. Er hat aus grossen Triaxversuchen (Durchmesser 15 cm) für stark zertrennte Andesite aus Pangua Reibungswinkel zwischen 31° und 56° für die Restfestigkeit gefunden. Interessanterweise fand er auch keine Grenzkurve für die Höchstfestigkeit. Seine Versuche zeigen deutlich grössere Festigkeitsparameter. Aus den direkten Scherversuchen an Rutschharnischen selbst erhalten wir Reibungswinkel zwischen 19° und 27° für die Restscherfestigkeit. Das Resultat von einem solchen Rutschharnisch ist in Fig. 7.3 dargestellt. Die grosse Diskrepanz zwischen den Resultaten der Versuche kommt daher,

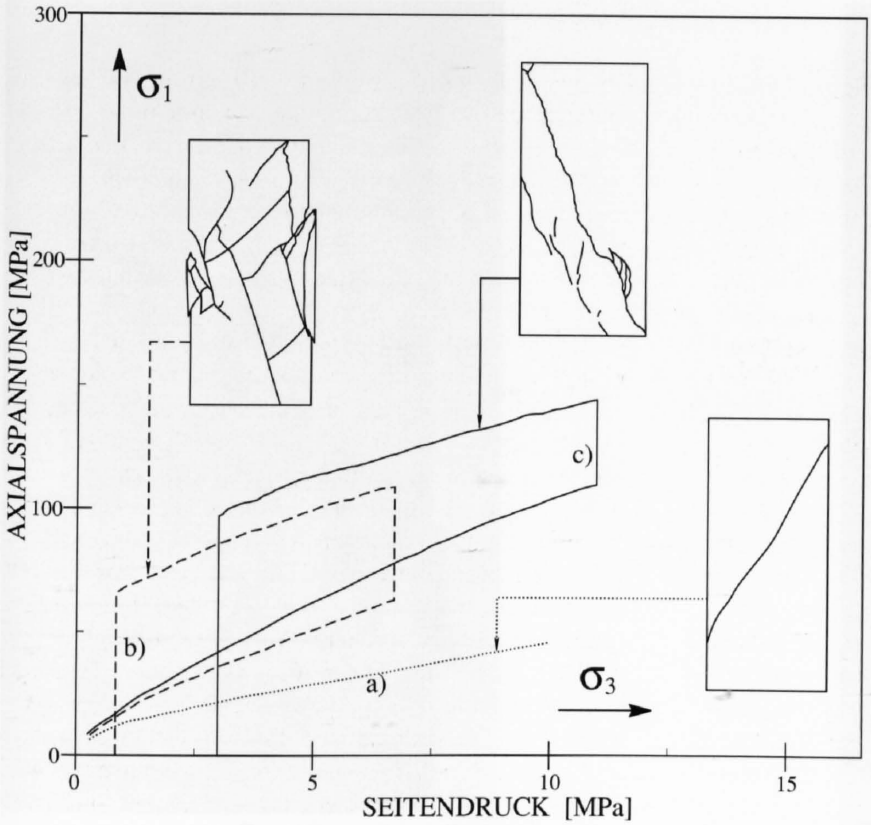


Fig. 7.1: Unterschiedliche Bruchbilder nach dem triaxialen Druckversuch.

a): Probe 73To-1-2h: durchgehender Rutschharnisch bedeckt mit Edelserpentinen, Neigung der Rutschharnische gegenüber der Probenachse ca. 35°.

b): Probe 73To-1-2g: nach dem Versuch zerfällt der Prüfkörper in mehrere Bruchstücke, auf den Bruchflächen findet man grösstenteils Rutschharnische wie bei obiger Probe, aber auch rauhe frische Bruchflächen; die räumliche Begrenzung der Rutschharnische ist gut sichtbar.

c): Probe 73To-1-2i: intakter Prüfkörper bricht entlang einer durchgehend rauhen, unebenen Bruchfläche.

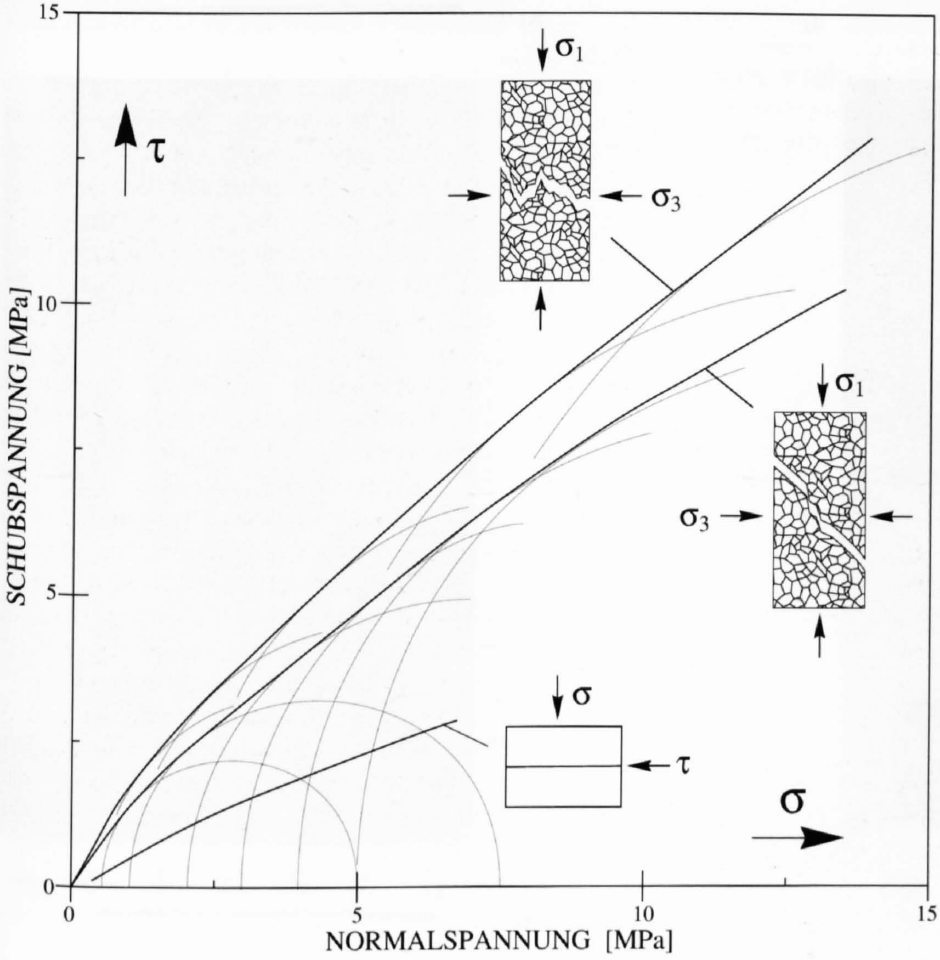
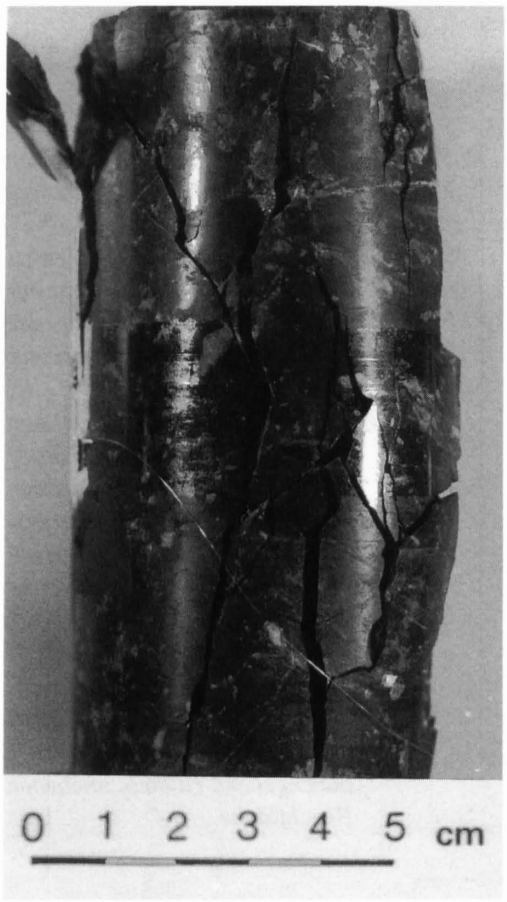
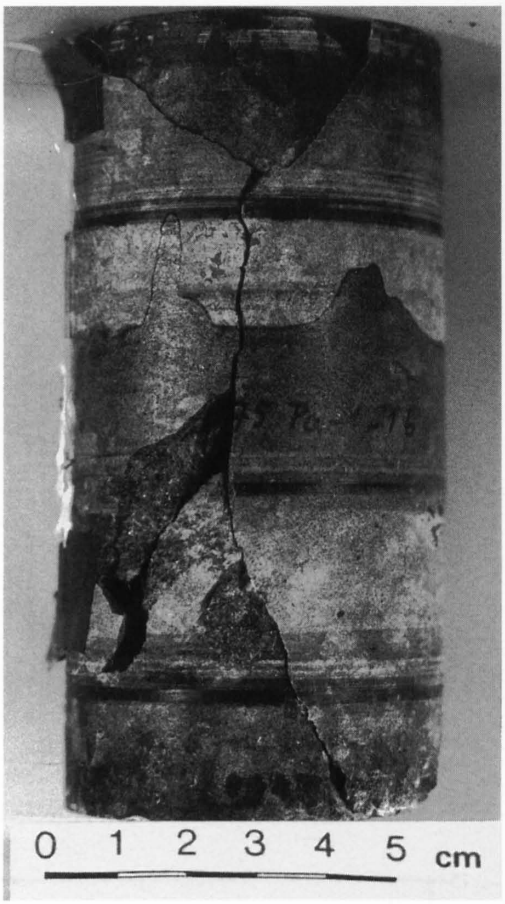


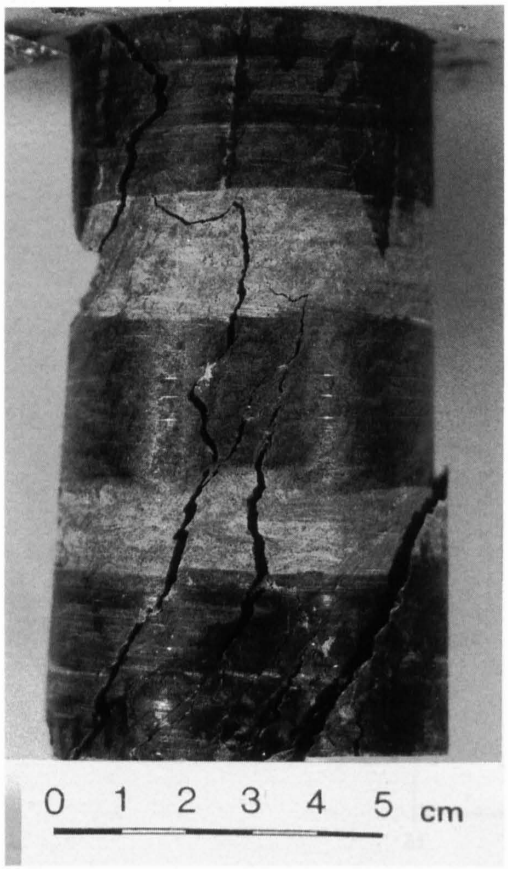
Fig. 7.2: Vergleich der Resultate von triaxialen Druckversuchen und direkten Scherversuchen im Mohr'schen Diagramm. Die Kreise wurden mit dem Radius = $(\sigma_1 - \sigma_2)/2$ und mit dem Mittelpunkt = $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$ für die Mohr'sche Umhüllende gezeichnet. Die Proben wurden schematisch nach dem triaxialen Druckversuch dargestellt. Das zeigt die Art der Trennflächenbildung nach dem Versuch.



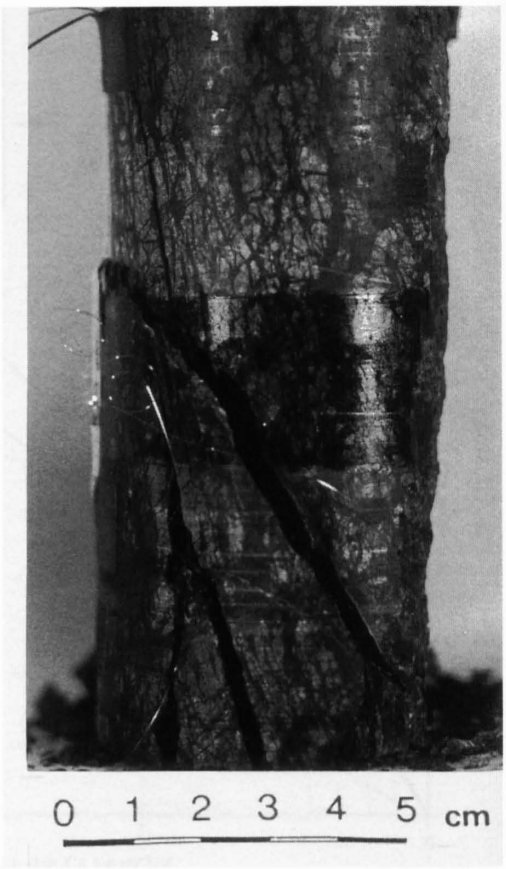
a)



b)



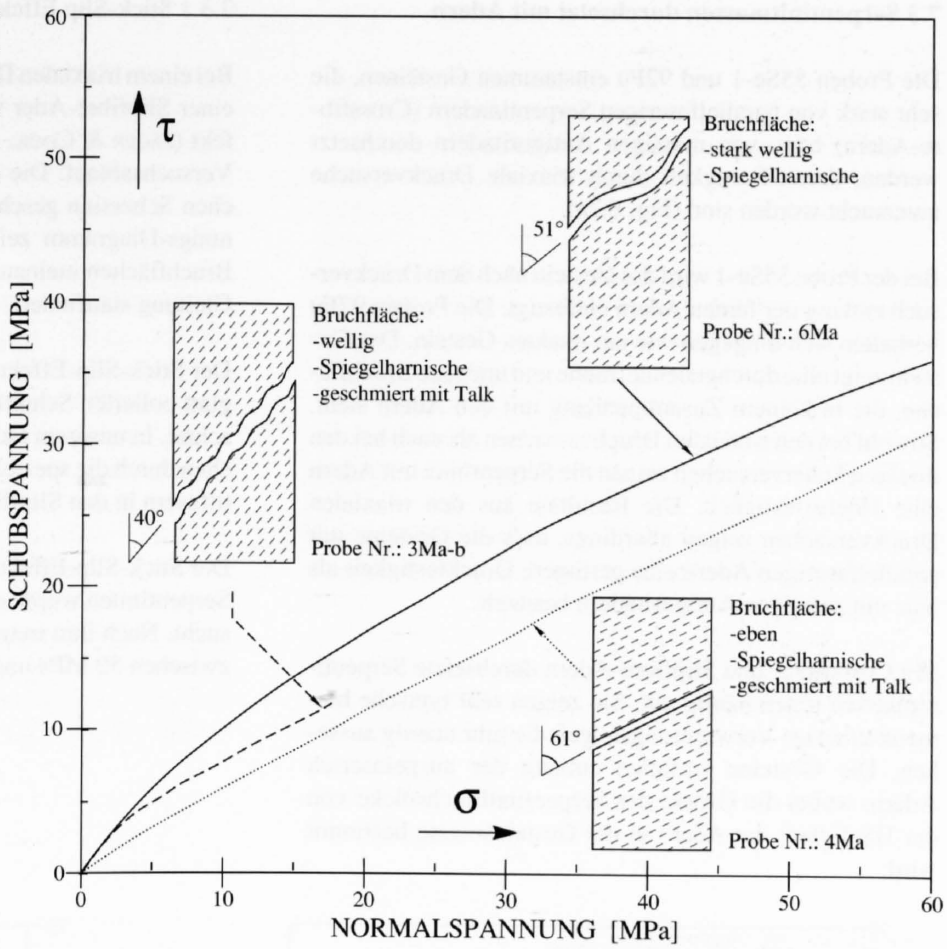
c)



d)

Figur 7.3: *Typische Bruchflächen bei intakten Serpentiniten:*
a) Pyroxenhaltiger Serpentinit 69To-1 *b) Malenco-Serpentinit 75Po-1*
c) Malenco-Serpentinit 75Po-2 *d) Feinkörniger Peridotit 65To-2*

Fig. 7.4: Übertragung der Resultate von traxialen Druckversuchen auf ein τ-σ-Diagramm am Beispiel der vertalkten Serpentinite. Die Figur zeigt schematisch die Geometrie der Gleitharnische.



dass der Scherweg beim triaxialen Druckversuch nicht entlang einer durchgehenden, ebenen Bruchfläche stattfindet. Ein Vergleich zwischen den beiden Festigkeitskurven zeigt eine grössere Bilinearität bei den triaxialen Druckversuchen als bei den direkten Scherversuchen.

Proben 3Ma-b, 4Ma und 6Ma

Diese Proben stellen die vertalkten Serpentinite dar. Die Probe 4Ma war bereits vor dem Einbau in die Triaxzelle entlang eines ebenen Spiegelharnisches parallel zur S-Fläche getrennt. Die Proben 3Ma-b und 6Ma sind nach dem Triaxversuch entlang welliger Spiegelharnische parallel zur S-Fläche gebrochen. Die Scherspannung τ und die Normalspannung σ auf den Trennflächen wurden direkt aus den σ_1-σ_3-Diagrammen von Triaxialversuchen (vgl. 6.3.2) durch die Formeln:

$$\sigma = \sigma_m - R \cos 2\alpha \qquad 7.1$$

$$\tau = R \sin 2\alpha \qquad 7.2$$

berechnet und in einem τ-σ-Diagramm aufgetragen, wobei $\sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$ und $R = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$ sind. Die erhaltenen Grenzkurven können auch sehr schön durch eine Exponentialfunktion:

$$\tau = a\,\sigma^b \qquad 7.3$$

dargestellt werden (MURELL, 1965). So erhalten wir für:

Probe Nr.	a	b	r
4Ma	0.71	0.92	0.99
3Ma-B	1.54	0.73	0.99
6Ma	2.01	0.71	0.99

wobei r = Korrelationskoeffizient ist.

Auf dem ebenen Spiegelharnisch (Probe 4Ma) erhalten wir Reibungswinkel zwischen 25° und 29° für die Restscherfestigkeit, welche mit den Resultaten an ähnlichen Spiegelharnischen aus den direkten Scherversuchen gut übereinstimmt. Bei den Proben 3Ma-b und 6Ma können wir eine zunehmende Bilinearität der Grenzkurven für die Restfestigkeit mit steigender Unebenheit beobachten, wobei die beiden Kurven in den grösseren Normaldruckbereichen fast parallel zur Grenzkurve der Probe 4Ma verlaufen (gleiche Reibungswinkel auf den Trennflächen).

7.3 Serpentinitmassen durchsetzt mit Adern

Die Proben 55Se-1 und 92Fu entstammen Gesteinen, die sehr stark von parallelfaserigen Serpentinadern (Crossfibre-Adern) bzw. von massigen Antigoritadern durchsetzt werden, deren Festigkeit durch triaxiale Druckversuche untersucht worden sind (Fig. 6.7a).

Bei der Probe 55Se-1 wird das Gestein nach dem Druckversuch entlang der feinen Adern entfestigt. Die Proben 92Fu verhalten sich hingegen wie ein intaktes Gestein. Das Gestein zeigt eine durchgehende, rauhe und unebene Bruchfläche, die in keinem Zusammenhang mit den Adern steht. Sowohl bei den triaxialen Druckversuchen als auch bei den direkten Scherversuchen zeigen die Serpentinite mit Adern eine Höchstfestigkeit. Die Resultate aus den triaxialen Druckversuchen zeigen allerdings, dass die Gesteine mit parallelfaserigen Adern eine geringere Druckfestigkeit als jene mit massigen Antigoritadern besitzen.

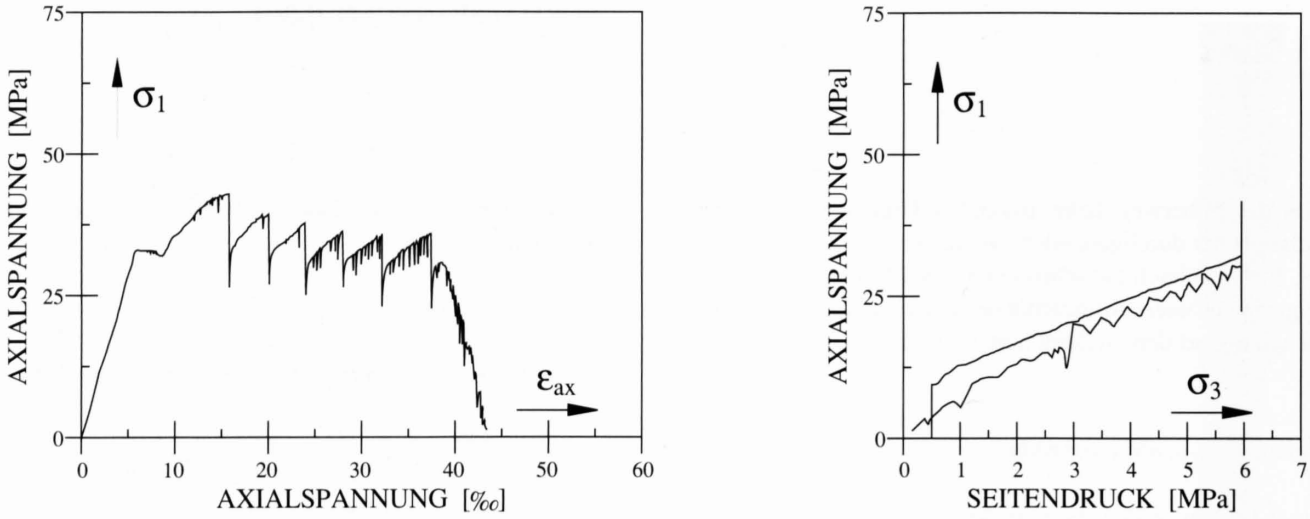
Mit Crossfibre- und Slipfibre-Adern durchsetzte Serpentinitmassen treten häufig auf. Sie zeigen sehr typische blumenkohlartige Verwitterungshügel, die sehr massig aussehen. Die Gesteine zerfallen entlang der ausgefaserten Adern, wobei die Grösse der Serpentinitbruchstücke von der Häufigkeit der Adern in der Gesteinsmasse bestimmt wird.

7.3.1 Stick-Slip Effekt

Bei einem triaxialen Druckversuch mit Abscherung entlang einer Slipfibre-Ader wurde der sogenannte Stick-Slip-Effekt (Jäger & Cook, 1976) beobachtet. Fig. 7.6 zeigt den Versuchsablauf. Die Ader wurde gegen ihren ursprünglichen Schersinn geschert. Das Axialspannungs-/Axialdehnungs-Diagramm zeigt, wie in periodischen Folgen die Bruchflächen ineinander verkeilt werden und danach eine Gleitung stattfindet.

Der Stick-Slip-Effekt wurde von Jäger & Cook (1976) an glatt polierten Schnittflächen an Granit und Gabbro beobachtet. In unserem Fall könnte das Verkeilen der Bruchflächen durch die spezielle räumliche Anordnung der Chrysotilfasern in den Slipfibre-Adern zustandekommen.

Der Stick-Slip-Effekt an glatt polierten Schnittflächen von Serpentiniten wurde eingehend von Aldheid (1981) untersucht. Nach ihm treten sie bei sehr grossen Seitendrücken zwischen 50 MPa und 150 MPa auf.



Figur 7.5: Triaxialer Druckversuch mit Stick-Slip Effekt; Probe 65To-1-1i; weitere Erläuterungen siehe Text.

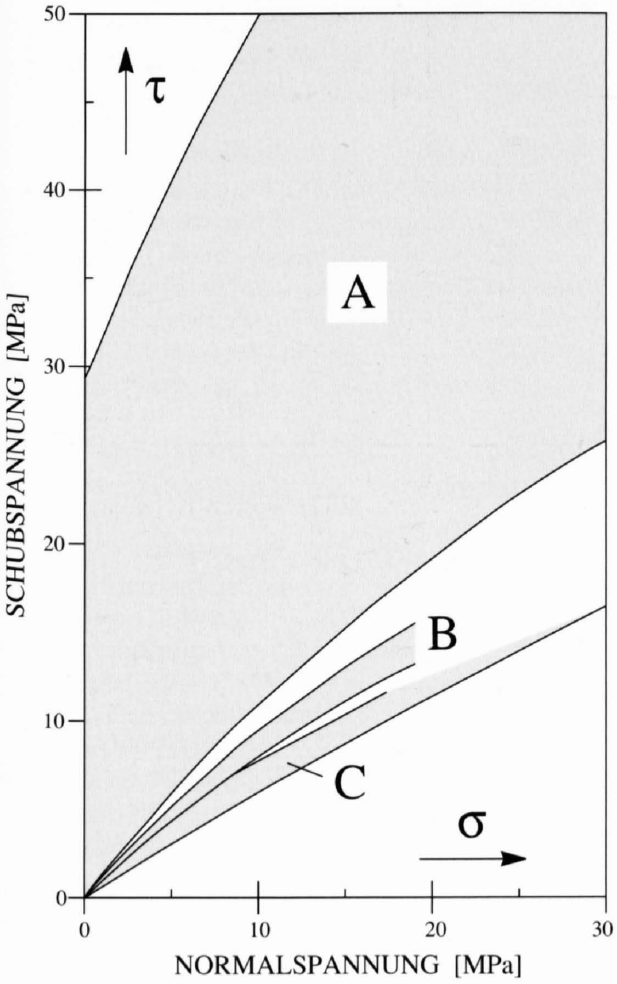
8 SCHLUSSFOLGERUNG

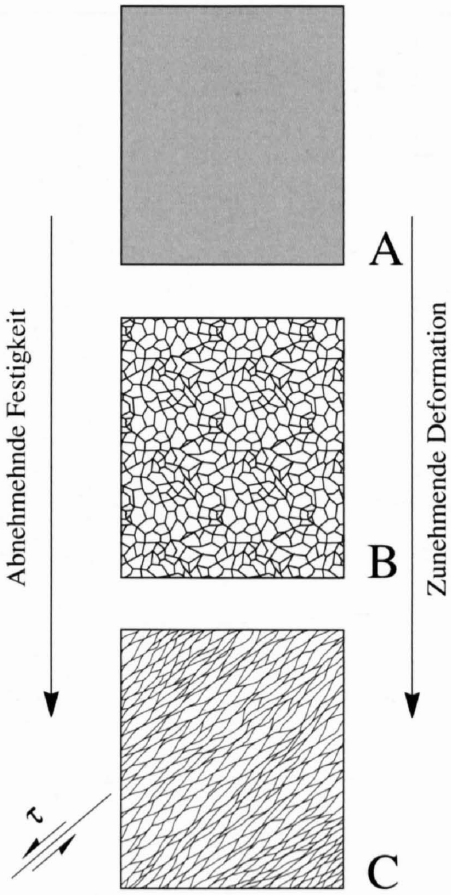
Bei der vorliegenden Arbeit wurden die felsmechanischen Eigenschaften der verschiedenen Serpentinittypen und der häufig auftretenden Diskontinuitätsflächen im Labor untersucht. Aufgrund der komplizierten Petrographie von Serpentiniten und der Grösse der Prüfkörper (Auftreten von verschiedenen Diskontinuitätsflächen) ist es nicht möglich, im Detail den Einfluss der petrographischen Gegebenheiten auf die felsmechanischen Eigenschaften von intakten Serpentiniten zu untersuchen. Aus den Untersuchungen von ROST (1960b), RALEIGH & PATERSON (1965), MURELL & ISMAIL (1976) und ALDHEID (1981) an intakten und vorwiegend kleinen Serpentinitproben kann man bei Raumtemperatur auf mittlere bis sehr hohe Druckfestigkeiten im Sinne von BIENIAWSKI (1967; vgl. Kap. 6.2.) schliessen. Aus unseren Untersuchungen können wir eine Zunahme bei den Druckfestigkeiten der reinen und der pyroxenhaltigen Serpentinite bei steigender Metamorphose beobachten. In Fig. 8.1 ist der Bereich A dargestellt, in welchem alle Grenzkurven der von uns untersuchten intakten Serpentinite liegen.

Aus ingenieurgeologischer Sicht muss der tektonischen Entfestigung der intakten Serpentinitgesteine durch verschiedene Diskontinuitäten und Scherflächen ein grosses Gewicht beigemessen werden. Diese können die Festigkeitseigenschaften der Felsmassen in hohem Masse beeinträchtigen. Sie bilden in den meisten Serpentinitmassen ein unregelmässiges Netz von Bruchflächen und Rutschharnischen (Bereich B). In den stärker deformierten Scherzonen bilden sie ein Parallelgefüge aus flaserigen Bruchstükken (Bereich C). Die bodenmechanischen Versuche zeigen, dass die Scherfestigkeit mit abnehmender Korngrösse ebenfalls abnimmt. Dies heisst: Je feiner die flaserigen Bruchstücke tektonisch zerkleinert sind, desto niedrigere Scherfestigkeiten zeigen diese Scherhorizonte.

Die tiefsten Scherparameter wurden entlang der typischen Rutschharnische und Spiegelharnische in den Serpentinitmassen gemessen. Sie weisen in trockenem Zustand einen Reibungswinkel zwischen 13° und 30° für die Restfestigkeit auf. Es sei in diesem Zusammenhang auf die wichtige Rolle dieser Schwächezonen bei den grossen tektonischen Verschiebungen hingewiesen.

Nach unserer Erfahrung wirkt die Aderbildung heilend auf die entfestigten Felsmassen.





Figur 8.1: Einfluss der tektonischen Entfestigung auf die Serpentinitmassen.

LITERATURVERZEICHNIS

ALDHEID, H.-J. (1981): Untersuchung von Bruch und Scherprozessen im Granit und Serpentinit bei hohen Drucken und Temperaturen. Berichte des Institutes für Geophysik der Ruhr-Universität Bochum 10, 128.

ARGAND, E. (1916): Sur l'arc des Alpes occidentales. Eclogae geol. Helv. 14, 145-204.

ATTINGER, R.O. & KÖPPEL, J. (1983): Technical note. A new method to measure lateral strain in uniaxial and triaxial compression tests. Rock Mechanic and Rock Engineering 17, 73-78.

BARTON, N. (1973): Review of a new shear-strength criterion for rock joints. Eng. Geol. 7, 282-332.

BIENIAWSKI, Z.T. (1967): Engineering classification of jointed rock mass. Trans. S. African Inst. Civ. Engineers 15/12, 335-344.

BISHOP, A.W., GREEN, G.E., GARGA, V.K., ANDERSEN, A. & BROWN, J.D. (1971): A new ring shear apparatus and its application to the measutements of residual strength. Geotechnique 21.

BRONGNIART, A. (1827): Classification et Caractères Mineralogiques des Roches Homogènes et Hétérogènes. Levrault, Paris.

BUCHER, K. & PFEIFER, H.-R. (1973): Über Metamorphose und Deformation der östlichen Malenco-Ultramafitite und deren Rahmengesteine (Provinz Sondrio, N-Italy). Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. 53, 232-241.

COUMANTAKIS, J. (1982): Comportement des péridotites et des serpentinites de la Grèce en travaux publics et leur propriétés physiques et mécaniques. Bulletin of the Internation Association of Engineering Geology No. 25, 53-60

DEER, W.E., HOWIE, R.A. & ZUSSMAN, J. (1980): An introduction to the rock-forming minerals. Longman, 528.

DEER, E.J. & MILLER, R. P. (966): Engineering classification and index properties for intact rock. U.S. Air Force Systems Command, Air Force Weapons Lab., Kirtland Air Force Base, New Mexico, TR/AFWL-TR-65-116.

DE ROEVER, W.P. (1956): Sind die alpinotypen Peridotitmassen vielleicht verfrachtete Bruchstücke der Peridotitschale? Geol. Rdsch. 46, 137-146.

DEUTSCHER NORMENAUSSCHUSS (DNA) (1965): DIN 52 102. Prüfung von Naturstein. Bestimmung der Dichte, Rohdichte, Reindichte, Dichtigkeitsgrad, Gesamtporosität. Beuth Vertrieb GmbH, Berlin.

DIETRICH, V. (1969): Die Ophiolithe des Oberhalbsteins (Graubünden) und das Ophiolithmaterial der ostschweizerischen Molasseablagerungen, ein petrographischer Vergleich. Diss. ETH Zürich, 179.

—(1970): Die Stratigraphie der Platta-Decke, Eclogae geol. Helv. 63, 631-671.

—(1976): Plattentektonik in den Ostalpen: Eine Arbeitshypothese. Geotekt. Forsch. 50, 1-84.

DIETRICH, V. & PETERS, T. (1971): Regionale Verteilung der Mg-Phylosilikate in den Serpentiniten des Oberhalbsteins. Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. 51, 329-348.

DUNGAN, M.A. (1979a): Bastit pseudomorphs after orthopyroxene, clinopyroxene and tremolite. Canadian Mineralogist, 729-740.

—(1979b): A mikroprobe study of antigorite and some serpentine pseudomorphs. Canad. Mineralogist 17, 771-784.

FAUST, G.T. & FAHEY, J.J. (1962): The Serpentine group minerals. U.S. geol. Surv. prof. Pap. 384-A, 1-91.

FRANKLIN, J.A. & HOEK, E. 1970): Developments in triaxial testing technique. Rock Mech. 2, 223-228.

GEES, R.A. (1955): Geologie von Klosters. Diss. Univ. Bern.

—(1956): Ein Beitrag zum Ophiolith-Problem behandelt an einigen Beispielen aus dem Gebiet von Kloster-Davos (Graubünden). Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. 36, 454-488.

GRUNAU, H. (1947): Geologie von Arosa (Graubünden) mit besonderer Berücksichtigung des Radiolarit-Problems. Diss. Univ. Bern, 109. ?

HAEFELI, R. (1938): Mechanische Eigenschaften von Lokkergesteinen. Schweizer Bauzeitung, Band III.

HAUG, E. (1909): Les géosynclinaux de la chaîne alpine pendant les temps secondaires. C. R. Acad. Sci. Paris, 148.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS (ISRM), Commission On Standardization Of Laboratory And Field Tests (1974): Suggested methodes for determining shear strength. Committee on Field Tests, Document No. 1.

—(1977a): Suggested method for petrographic description of rocks. Document No. 6.

—(1977b): Suggested methodes for the determining the uniaxial compressive strength of rock material. Document No. 1.

—(1977c): Suggested methodes for the determining the strength of rock materials in triaxial compression. Document No. 7.

—(1978): Suggested methodes for the quantitative description of discontinuities in rock masses. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 15/6, 319-368.

—(1983): Suggested methodes for determining the

strength of rock materials in triaxial compression: revised version. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 20/6, 283-290.

JÄGER, J.C. (1969): Behaviour of closely jointed Rock. Proc. eleventh symp. on rock mechanics, California, 57-68.

JÄGER, J.C. & COOK, N.G.W. (1976): Fundamentals of rock mechanics. John Wiley & Sons Inc., 585.

KOVARI, K. & TISA, A: (1975): Multiple failure state and strain controlled Triaxial Tests. Rock Mechanics 7, 17-33.

KOVARI, K., TISA, A. & ATTINGER, R.O. (1983): The concept of „continuous failure state" triaxial tests. Rock Mechanics and rock Engineering 16, 117-131.

KÜNDIG, R. (1982): Geologie und Petrographie der Bernina, Geologisch-Petrographische Untersuchungen der Ultrabasika der Platta-Decke und deren Rahmen-Gesteine in der Region Sils-Maria-Furtschellas-Surlej. Diplomarbeit ETH Zürich, 149.

Laubscher, H. (1969): Mountain building. Tectonophysics 7, 551-563.

LEMOINE, M. (1980): Serpentinites, gabbros and ophicalcites in the Piemont-Ligurian domain of the Western Alps: possible indicators of oceanic fracture zones and associated serpentinite protrusions in the Jurassic-Cretaceous Tethys. Arch. Sci. Genève 33, 105-115.

MEYER-PETER, E. (1954): Soil Mechanics and Foundation Problems of the Marmorera Earth Dam (Switzerland). Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau und Erdbau an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich Nr. 31, 302-311.

MURREL, S.A.F. (1965): The effect of triaxial stress-systems on the strength of rocks at atmospheric temperatures. R. astron. Soc. Geophys. J. 10/3, 231-281.

MURREL, S.A.F. & ISMAIL, I.A.F. (1976): The effect of decomposition of hydous minerals on the mechanical properties of rocks at high pressures and temperatures. Tectonophysics 31, 207-258.

OBERT, L., WINDES, S.L. & DUWALL, W.I. (1946): Standardized tests for determining the physical properties of mine rock. U.S. Bureau of Mines Repl. of Investigation No. 3891.

ODDSSON, B. (1984): Geologie und geotechnisches Verhalten der jungen Vulkanite Islands mit besonderer Berücksichtigung der petrographischen Einflüsse. Diss. ETH Zürich, 239.

Penrose Field Conference on Ophiolites (1972). Geotimes, 17, 24-25.

PERETTI, A. (1988): Occurrence and stabilities of opaque Minerals in the Malenco Serpeninite (Sondrio, Northern Italy). Diss. ETH Zürich, 182.

PETERS, T. (1963): Mineralogie und Petrographie des Totalpserpentins bei Davos. Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. 43, 531-685.

RALEIGH, C.B. & PATERSON, M.S. (1965): Experimental deformation of serpentinite and its tectonic implications. J. geophys. Res. 70/16, 3965-3985.

ROST, F. (1949): Das Serpentinit-Gabbro-Vorkommen von Wurlitz und seine Mineralien (Grünschieferzone der Münchberger Gneismasse). Heidelberger Beitr. Min. Petr. 1, 626-688.

—(1960a): Die Serpentinite der Münchberger Gneismasse und ihre Mineralien. Der Aufschluss 8, 64-70.

—(1960b): Die Talklagerstätten der Münchberger Gneissmasse. Der Aufschluss 8, 136-151.

SCHWEIZERISCHE NORMENVEREINIGUNG (SNV) (1965a): SNV Norm 670 808. Prüfsiebe, Anforderungen. Schweizer Strassenfachleute (VSS), Zürich.

—(1965b): SNV Norm 870 816. Gesteinsmaterialien. Schlammversuch nach der Aräometermethode. VSS, Zürich.

—(1972): SNV Norm 870 812a. Mineralische Baustoffe und Lockergesteine. Trockensiebung. VSS, Zürich.

—(1979): SNV Norm 670 810b. Mineralische Baustoffe und Lockergesteine. Siebanalysen, allg. Grundsätze. VSS, Zürich.

STAUB, R. (1922): Über die Verteilung der Serpentine in den alpinen Ophioliten. Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. 52, 78-199.

STEINMANN, G. (1905): Die geologische Bedeutung der Tiefsee-Absätze und der ophiolitischen Massengesteine. Geochim. cosmochim. Acta 41, 44-65.

—(1925): Gibt es fossile Tiefseeablagerungen von erdgeschichtlicher Bedeutung? Geol. Rdsch. 16, 435-468.

—(1927): Die ophiotithischen Zonen in den mediterranen Kettengebirgen. 14th Int. Geol. Congr. Madrid 2, 638-667.

SWANSON, R.G. (1981): Sample examination manual. Sample examination manual, Methods in exploration series, published by: The American Association of Petroleum Geologists, Tusla, Oklahama 74101, USA, 25.

TISA, A. & KOVARI, K. (1984): Continuos failure state direct shear tests. Rock Mechanics and Rock Engineering 17/2, 83-95.

TRÖGER, W. E. (1969): Optische Bestimmung der gesteinsbildenden Minerale. Teil 2, 2. Aufl., E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 822.

WEISSERT, H.J. & BERNOULLI, D. (1985): A transform margin in the Mesozoic Tethys: evidence from the Swiss Alps. Geol. Rdsch. 74/3, 665-679.

WHITTAKER, E.J.W. & ZUSSMAN, J. (1956): The charakterization of serpentine minerals by X-ray diffraction. Mineral. Mag. 31, 107-126.

—(1977): An idealized model for Serpentine textures after olivine. Canad. Mineralogist 15, 446-458.

WICKS, F.J. & WHITTAKER, E.J.W. (1977): Serpentine textures and serpentinization. Canad. Mineralogist 15, 459-488.

WICKS, F.J., WHITTAKER, E.J.W. & ZUSSMAN, J. (1977): An idealized Model for Serpentine textures after Olivine. Canad. Mineralogist 15, 446-458.

WYLLIE, P.J. (1967): Ultramafic and Related Rocks. Wiley, New York, 464.

ZINGG, T. (1935): Beiträge zur Schotteranalyse. Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. 15, 39-140.

ANHANG

Anhang A: Koordinaten der untersuchten Gesteinsproben

PROBE Nr.	KOORDINATEN
3Ma	767'845/152'830
4Ma	767'845/152'830
5Ma	767'845/152'830
6Ma	767'845/152'830
7Ma	767'845/152'830
10Po	799'870/162'600
34Ma-1	769'182/150'822
39Ma	769'182/150'822
40Mu	768'120/150'522
44Mu	768'120/150'522
50Ma	769'182/150'822
51Mu	768'120/151'522
53Se-1	769'455/144'060
55Se-1	769'515/144'120
55Se-2	769'510/144'120
55Se-3	769'515/144'120
58Ma-1	768'220/151'460
60Ma-1	769'090/150'780
61Ma-1	769'121/152'045
61Ma-2	769'121/152'045
63Su-1	770'060/154'030
63Su-3	770'060/154'030
64To-1	782'010/191'120
64To-2	782'010/191'127
65Ma-5	769'050/152'603
65To-1	781'930/191'340
65To-2	781'930/191'340
65To-4	781'930/191'345
66To-1	782'390/191'560
67To-1	782'390/191'409
69To-1	782'770/191'000
70To	783'492/190'830
73To-1	783'530/190'670
73To-2	783'530/190'670
73To-3	783'530/190'670
75Po-1	799'870/131'076
75Po-2	799'870/131'076
81En-1	776'120/144'170
83Ma	769.182/150.822
83Se	770'835/140'590
91Fu	780'010/143'870
92Fu	780'010/143'870
93To	780'525/189'610

Anhang B: Resultate der triaxialen Druckversuche

Die ermittelten Festigkeitsparameter aus den triaxialen Druckfestigkeiten sind in den folgenden Tabellen dargestellt.

Reine Serpentinite

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
55Se-l-lb	0.5-2	59.53	8.62	0-2	63.65	0.00
	2-4	57.86	9.53	2-4	51.55	3.50
	4-6	51.77	14.05	4-6	49.63	4.29
	6-8	45.07	19.82	6-8	47.75	5.32
Hauptbruchfläche: uneben, rauh; Bruchfläche hauptsächlich durch die feinen Crossfibre-Adern.						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
55Se-1-1c	0.5-2	63.62	9.88	0-2	56.48	0.00
	2-4	48.99	19.90	2-4	47.90	1.65
	4-6	48.66	20.17	4-6	45.92	2.26
	6-8	47.24	21.51	6-8	43.91	3.11
	8-10	46.05	22.79	8-10	42.92	3.63
	10-12	34.15	36.79	10-12	41.76	4.36
Hauptbruchfläche: wie bei 55Se-1-1b; starke Entfestigung entlang den Adern.						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
55Se-1-2b				0-2	56.94	0.00
				2-4	49.38	1.50
				4-6	44.00	3.10
				6-8	37.71	5.77
				8-10	33.72	7.69
Hauptbruchfläche: Wie bei 55Se-1-lb; auf der Bruchfläche beobachtet man viele Bastite.						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
55Se-1-2d	0-2	61.53	5.84	0-2	64.97	0.00
	2-4	57.47	7.82	2-4	54.74	3.31
	4-6	48.45	13.81	4-6	51.61	4.77
Keine Hauptbruchfläche: die Probe zerfällt entlang den Crossfibre-Adern in mehrere Bruchstücke; Oberflächen rauh, uneben.						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
58Ma-1-2d				0-2	60.09	0.00
	2-3	44.70	8.32	2-4	48.32	2.71
				4-6	48.92	2.50
				6-8	43.72	4.97
				8-10	35.96	9.25
				10-12	28.78	13.66
Hauptbruchfläche: z. grössten T. Rutschharnische (mit Edelserpentin parallel zur Scherrichtung) mit Materialbrücke (eben, rauh).						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
58Ma-1-2i	1.5-2	47.39	6.93	0-2	63.37	0.00
	2-4	47.39	6.93	2-4	53.18	2.94
	4-6	46.32	7.40	4-6	46.86	5.56
	6-8	45.67	7.77	6-8	44.99	6.55
	8-9	44.85	8.33	8-9	36.81	11.58
Keine Hauptbruchfläche: Bruchstücke zum grössten Teil mit Rutschharnischen (bedeckt mit Chrysotilfasern, sehr wenig rauhe Bruchflächen.						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r-
58Ma-1-3c				0-2	57.27	0.00
	2-4	47.75	17.70	2-4	49.70	1.53
	4-6	35.68	26.48	4-6	47.09	2.39
				6-8	41.49	4.82
Hauptbruchfläche: uneben (eckig), Bruchflächen: wellig, hinter den Wellen parallelfaseriger Chrysotil.						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
60Ma-1				0-2	50.72	0.00
				2-4	40.36	1.47
				4-6	37.98	2.01
				6-8	33.92	3.28
Keine Hauptbruchfläche: Bruchflächen entlang den Rutschharnischen, bedeckt mit Schuppen und Fasern aus Serpentinmineralien.						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
60Ma-la				0-2	49.94	0.00
				2-4	39.89	1.38
				4-6	36.58	2.11
				6-8	31.78	3.55
				8-9	23.94	4.22
Keine Hauptbruchfläche: Wie bei 60Ma-1.						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
60Ma-lb				0-2	46.16	0.00
				2-4	36.58	1.12
				4-6	31.97	2.01
				6-8	27.35	3.21
Hauptbruchfläche: wellig, mit Rutschharnischen bedeckt mit Schuppen und Fasern aus Serpentinmineralien.						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
81En-1-1c	0.5-2	44.47	5.75	0-2	60.55	0.00
	2-4	40.24	6.30	2-4	45.50	3-48
	4-6	37.01	7.39	4-6	43.34	4.18
	6-8	34.90	8.28	6-8	41.16	5.12
Hauptbruchfläche: durch Slipfibre-Ader, die parallelen Chrysotilfasern sind nicht parallel zur Scherrichtung.						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
81En-1-ld	1-2	74.99	7.52	0-2	62.38	0.00
	2-3	72.70	10.89	2-3	48.07	3.73
Hauptbruchfläche: uneben, rauh						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
81En-1-3a				0-2	67.51	0.00
	2-4	53.32	19.67	2-4	55.54	4.62
	4-5	50.94	21.86	4-5	51.72	6.63
Keine Hauptbruchfläche: Die Probe zerfällt in mehrere Bruchstücke: Bruchflächen sehr rauh und uneben.						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
81En-1-3b				0-2	60.83	0.00
				2-4	52.34	2.11
				4-6	48.39	3.62
				6-8	44.46	5.57
				8-10	41.05	7.41
Bruchflächen durch 2 sich schneidende (nicht durchgehende) Slipfibre-Adern; Bruchflächen uneben und rauh; frühzeitiger Bruch: bei Seitendruck = 0.75 MPa erreicht der Axialdruck einen Wert von 110.64 MPa.						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
81En-lx				0-2	69.23	0.00
	2-4	61.02	16.81	2-4	58.44	4.87
	4-6	52.24	26.64	4-6	54.09	7.53
	6-8	51.55	27.50	6-8	51.17	9.75
				8-9	45.50	14.72
Keine Hauptbruchfläche: die Probe zerfällt in mehrere Bruchstücke. Bruchstücke sehr rauh und uneben.						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
92Fu-1b	0.5-2	46.93	15.94	0-2	70.18	
	2-4	41.27	19.00	2-4	52.74	8.08
	4-6	39.64	20.05	4-6	47.83	10.85
	6-8	35.84	22.88	6-8	41.16	15.33
Keine Hauptbruchfläche: Bruchflächen z.T. durch Antigoritadern.						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
92Fu-lc.	0.5-2	66.34	10.78	0-2	62.03	00
	2-4	61.14	15.23	2-4	49.25	3.30
	4-6	54.44	22.42	4-6	47.54	3.93
Hauptbruchfläche: uneben, rauh, parallel zu Antigoritadern.						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
92Fu-ld	1-2	58.71	19.28	0-2	65.18	0.00
	2-4	57.51	20.35	2-4	52.54	4.05
	4-6	57.80	20.03	4-6	50.06	5.16
	6-7.5	57.80	20.03	6-7.5	46.92	6.97
Hauptbruchfläche: uneben, rauh, parallel zu Antigoritadern.						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
92Fu-1e	1-2	57.24	21.27	0-2	68.04	0.00
	2-4	57.24	21.27	2-4	56.73	4.54
Hauptbruchfläche: uneben, rauh, parallel zu Antigoritadern.						

Pyroxenhaltige Serpentinite

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
55Se-2-2c				0-2	69.26	0.00
	2-4	60.20	20.24	2-4	60.74	3.97
	4-6	59.71	20.85	4-6	58.68	5.35
	6-7	57.41	24.23	6-7	54.06	9.33
Keine Hauptbruchfläche: viele Risse parallel zur Probenachse.						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
55Se-2-2d				0-2	67.69	0.00
	2-4	54.99	39.32	2-4	61.28	2.69
	4-6	53.62	41.47	4-6	53.34	7.55
	6-8	52.47	43.50	6-8	45.83	12.95
Hauptbruchfläche: uneben, rauh.						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
65To-1-1a				0-2	73.92	0.00
	2-4	67.66	9.74	2-4	56.42	11.83
	4-7	67.55	9.89	4-7	46.03	19.61
Keine Hauptbruchfläche: Die Probe wird zertrümmert.						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
65To-1-1b				0-2	64.76	0.00
				2-4	49.60	4.62
	3-6	61.54	19.04	4-6	48.21	5.20
	6-8	60.44	20.77	6-8	41.27	8.87
	8-9.5	59.44	22.55	8-9.5	21.41	20.78
Hauptbruchfläche: parallel zur Serpentin-Ader (massig): eben, glatt und rauh.						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
65To-1-1i	0.5-2	49.09	1.05	0-2	45.58	0.00
	2-4	45.50	1.65	2-4	39.15	0.75
	4-6	42.64	2.44	4-6	38.38	0.91
Hauptbruchfläche entlang einer Slipfibre-Ader.						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
65To-1-1h				0-2	68.53	0.00
	2-4	66.53	18.46	2-4	58.71	4.22
	4-6	59.30	29.83	4-6	54.36	6.82
	6-8	44.41	55.27	6-8	48.32	11.25
Keine Hauptbruchfläche: Bildung von mehreren Rissen.						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
69To-1-1a	1.5-2	66.12	4.48	0-2	64.64	0.00
	2-4	55.51	10.32	2-4	56.15	2.72
	4-6			4-6	52.79	4.34
	6-7			6-7	49.51	6.39
Hauptbruchfläche: uneben, rauh.						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
69To-1-1c	1.5-2	57.92	10.65	0-2	58.50	0.00
	2-4	55.78	11.88	2-4	49.25	1.98
	4-6	54.74	12.68	4-6	8.45	2.25
	6-7	49.51	17.54	6-7	41.60	5.36
Hauptbruchfläche: uneben, rauh, starke Zertrümmerung und Pulverisierung entlang der Bruchfläche.						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
69To-1-1d				0-2	56.66	0.00
				2-4	47.09	1.84
				4-6	45.67	2.27
				6-8	42.23	3.70
Hauptbruchfläche: eben, rauh.						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
69To-1-2c	0.5-3	54.95	1.67	0-2	58.35	0.00
				2-3	47.46	2.28
Keine Hauptbruchfläche: 3 Bruchstücke, rauh und uneben.						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
73To-1-1c	0.5-2	47.33	5.07	0-2	64.46	0.00
	2-4	46.40	5.31	2-4	42.36	6.34
	4-6	39.77	7.82	4-6	36.87	8.30
	6-8	36.18	9.41	6-8	35.22	9.03
	8-10	36.18	9.41	8-10	31.37	11.03
Hauptbruchfläche: glänzend, leicht treppenartig (Bruch gegen die Treppen).						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
73To-1-2b				0-2	66.09	0.00
	2-4	50.66	7.25	2-4	49.12	5.63
	4-6	48.18	8.49	4-6	47.32	6.41
Bruch entlang Rutschharnischen: glänzend, treppenartig, Edelserpentin und Materialbrücke.						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
73To-1-2d	0.5-2	58.97	5.56	0-2	62.85	0.00
	2-4	46.94	10.48	2-4	50.54	3.36
	4-6	43.91	12.07	4-6	49.32	3.85
	6-8	38.38	15.54	6-8	46.08	5.54
Keine Hauptbruchfläche: mehrere Rutschharnische.						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
73To-1-2g	0.5-2	52.84	9.89	0-2	60.02	0.00
	2-4	50.72	10.86	2-4	49.44	2.40
	4-6	47.02	13.08	4-6	49.44	2.40
	6-8	37.43	19.89	6-8	48.72	2.76
Keine Hauptbruchfläche: mehrere Rutschharnische und Risse.						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
73To-1-2g	0.5-2	52.84	9.89	0-2	60.02	0.00
	2-4	50.72	10.86	2-4	49.44	2.40
	4-6	47.02	13.08	4-6	49.44	2.40
	6-8	37.43	19.89	6-8	48.72	2.76
Keine Hauptbruchfläche: mehrere Rutschharnische und Risse.						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
73To-1-2i	1-2	59-92	8.26	0-2	61.61	0.00
	2-4	51.17	12.87	2-4	55.15	1.72
	4-6	47.09	15.59	4-6	53.73	2.33
	6-8	43.43	18.46	6-8	52.34	5.06
	8-10	41.57	20.11	8-10	49.80	5.06
	10-11	38.77	22.87	10-11	47.17	7.32
Hauptfläche: sehr rauh und uneben.						

Feinkörnige Peridotite

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
65To-2-3g				0-2	56.73	0.00
	2-4	43.04	31.25	2-4	47.00	1.71
Hauptbruchfläche: uneben, glatt (sehr feinkörnige massige Chrysotilader) und rauh (durch das Gestein).						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
65To-2-4a				0-2	67.18	0.00
	2-4	57.21	20.22	2-4	57.64	3.68
	4-6	56.90	20.56	4-6	54.61	5.36
	6-8	56.51	21.06	6-8	52.24	7.05
Die Probe bleibt intakt: viele Risse parallel zur Probenachse.						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
65To-2-4b	1.5-2	62.27	14.10	0-2	65.88	0.00
	2-4	62.27	14.10	2-4	58.23	2.72
	4-6	54.44	22.62	4-6	55.74	4.07
	6-7	51.39	26.36	6-7	52.94	6.06
Keine Hauptbruchfläche: 2 Keile auf beiden Seiten und viele Bruchflächen parallel zur Probenachse in der Mitte der Probe.						

Ophicalcite

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
53Se-1-1a	0.5-2	49.58	7.30	0-2	67.14	0.00
	2-4	49.06	7.58	2-4	50.25	6.08
	4-6	48.04	8.07	4-6	46.24	7.92
	6-8	41.92	11.77	6-8	45.50	8.35
	8-10	41.24	12.24	8-10	37.68	13.62
Hauptbruchfläche: uneben, rauh, viele Risse in den Serpentinit-Bereichen.						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
53Se-1-1b	1-2	53.03	4.35	0-2	61.78	0.00
	2-4	47.02	6.11	2-4	44.99	4.14
	4-6	44.37	7.21	4-6	42.74	4.90
	6-8	42.64	8.10	6-8	42.74	4.90
Hauptbruchfläche: eben, rauh.						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
53Se-1-2a	1-2	46.86	15.91	0-2	58.91	0.00
	2-4	45.16	16.82	2-4	50.31	1.87
	4-6	44.09	17.52	4-6	50.31	1.87
	6-8	43.52	17.96	6-8	48.39	2.83
	8-10	43.31	18.15	8-10	47.67	3.29
	10-12	38.82	22.55	10-12	44.95	5.29
Keine Hauptbruchfläche: Bruchflächen parallel zur Bänderung, gekurvt, rauh.						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
53Se-1-2c				0-2	64.08	0.00
				2-6	50.60	4.55
				6-8	48.15	6.34
				8-10	47.29	7.07
Keine Hauptbruchfläche; Bruchflächen: unregelmässig, rauh, uneben.						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
53Se-1-2e	0.5-2	45.44	12.69	0-2	57.44	0.00
	2-4	43.34	13.61	2-4	47.82	1.93
	4-6	42.64	13.99	4-6	46.32	2.41
	6-8	39.32	16.12	6-8	45.25	2.87
	8-10	33.29	21.18	8-10	44.70	3.18
Hauptbruchfläche: eben, rauh.						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
53Se-1-xa	0.5-2	54.90	7.13	0-2	63.69	0.00
	2-4	55.74	8.84	2-4	55.07	2.58
	4-6	48.45	13.47	4-6	54.09	2.65
	6-8	45.50	15.72	6-8	52.94	3.92
	8-10	40.45	20.10	8-10	51.64	4.95
	10-11	34.74	25.53	10-11	48.32	8.02
Keine Hauptbruchfläche: Bruchflächen: eben, glänzend, z.T. mit Calcit						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
64To-1-1c	0.5-2	51.03	13.50	0-2	52.79	0.00
	2-4	48.93	14.61	2-4	47.68	0.83
	4-6	41.70	19.41	4-6	47.39	0.92
	6-8	39.40	21.18	6-8	46.86	1.14
	8-10	35.81	24.26	8-10	43.41	2.97
Hauptbruchfläche: rauh und uneben.						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
64To-1-1e	0.5-2	57.56	11.61	0-2	53.70	0.00
	2-4	48.93	16.70	2-4	45.75	1.32
	4-6	33.75	27.70	4-6	45.42	1.41
	6-8	27.12	33.20	6-8	44.37	1.83
Hauptbruchfläche: rauh und uneben.						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
64To-1-2d	0.5-2	41.31	15.21	0-2	59.84	0.00
	2-4	39.64	18.64	2-4	49.25	2.42
	4-6	37.55	19.83	4-6	48.11	2.82
	6-8	36.58	20.53	6-8	45.67	3.98
	8-10	36.11	21.04	8-10	42.51	5.81
				10-12	39.45	7.84
Hauptbruchfläche: rauh und uneben.						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
64To-1-2f	0.3-2	59.24	6.90	0-2	57.83	0.00
	2-4	47.46	12.34	2-4	50.66	1.50
	4-6	40.01	16.65	4-6	48.39	2.28
	6-8	37.71	18.19	6-8	44.73	3.97
	8-9	35.32	20.00	8-9	41.10	5.99
Hauptbruchfläche: rauh und uneben.						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
66To-1-1a				0-2	61.63	0.00
	2-4	46.40	18.76	2-4	55.27	1.70
	4-6	41.60	22.25	4-6	52.54	2.87
	6-8	39.89	23.67	6-8	51.72	3.36
	8-10	37.95	25.46	8-10	50.29	4.41
Eine grobkörnige Calcit-Ader, aber die Probe bricht durch Serpentinit-Bereiche.						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
66To-1-1e	0.5-2	54.25	15.35	0-2	62.40	0.00
	2-4			2-4	55.03	2.05
	4-6			4-6	51.39	3.63
	6-8			6-8	48.39	5.33
Hauptbruchfläche: Calcitader, rauh und uneben						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
66To-1-3a	0.5-2	56.75	10.01	0-2	57.47	0.00
	2-4	48.93	14.10	2-4	50.54	1.43
	4-6	44.09	17.25	4-6	47.24	2.54
	6-8	44.09	17.25	6-8	46.16	3.03
	8-9.5	43.81	17.49	8-10	45.36	3.49
Hauptbruchfläche: rauh und uneben.						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
66To-1-3b	0.3-2	49.26	9.99	0-2	60.30	0.00
	2-4	38.90	14.25	2-4	52.03	1.99
	4-6	36.14	15.65	4-6	45.67	4.33
	6-8	35.38	16.10	6-8	42.21	5.88
	8-10	32.31	18.17	8-10	42.21	5.88
	10-12	31.65	18.67	10-12	42.18	5.97
	12-13	30.41	19.69	12-13	39.02	8.38
Hauptbruchfläche entlang einer Slipfibre-Ader aus Chrysotil und Calcit, Bruchfläche: treppenartig, bedeckt z.T. mit parallelfaserigem Chrysotil.						

Ophidolomite

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
63Su-3-1a	1.5-3	41.3	11.73	0-2	63.94	0.00
				2-4	42.44	5.96
				4-6	33.58	9.05
				6-8	29.37	10.83
				8-10	23.73	13.60
				10-11	5.22	24.26
Hauptbruchfläche entlang Rutscharnisch: glatt, eben, mit Edelserpentin.						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
63Su-3-1d	1.5-2.5	50.72	4.51	0-2	59.76	0.00
				2-4	51.39	1.94
				4-6	48.32	3.07
				6-8	47.09	3.67
				8-10	45.39	4.70
Keine Hauptbruchfläche: mehrere Bruchstücke, glatt, mit Edelserpentin.						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
63Su-3-1i	0.5-2	55.20	9.04	0-2	65.79	0.00
	2-4	46.71	12.97	2-4	50.25	5.09
	4-6	40.71	16.46	4-6	46.08	6.89
	6-8	31.57	22.64	6-8	43.34	8.37
	8-10	31.57	22.64	8-10	40.56	10.14
	10-11	25.89	27.41	10-11	38.77	11.44
Keine Hauptbruchfläche: Bruchstücke z. grössten T. mit rauhen Oberflächen, sonst mit Rutschharnischen.						

Karbonatführende Serpentinite

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
55Se-3-1a	1-2	43.62	26.23	0-2	66.82	0.00
	2-4	41.49	27.82	2-4	52.74	5.05
	4-6	43.43	26.16	4-6	50.48	6.13
	6-7	35.27	34.05			
Hauptbruchfläche: treppenartig, rauh, durch Crossfibre-Ader und dazwischen liegende Materialbrücke.						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ	c_r
55Se-3-1b	1.5-2	49.38	21.52	0-2	66.36	0.00
	2-4	45.42	24.39	2-4	55.96	3.72
	4-5	40.24	28.80	4-5	55.35	4.04
Hauptbruchfläche: durch vorhandene Risse, treppenartig, sehr rauh.						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
55Se-3-1c				0-2	64.90	0.00
	2-4	55.35	20.32	2-4	55.81	2.95
	4-6	52.69	23.00	4-6	52.84	4.39
	6-8	52.39	23.35	6-8	51.59	5.09
	8-10	52.06	23.79	8-10	51.59	5.09
Hauptbruchfläche: uneben, rauh, Probe zerfällt in mehrere Stücke.						

Vertalkte Serpentinite

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
4Ma				0-2	67.90	0.00
				2-4	43.91	8.81
				4-6	38.64	11.11
				6-8	36.44	12.27
				8-9	19.40	22.67
				10-12		
Schon vorhandene Bruchfläche parallel zur S-Fläche: eben, Spiegelharnisch, mit Talk geschmiert.						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
6Ma				0-2	66.79	0.00
				2-4	39.52	9.05
				4-6	33.41	11.47
				6-8	29.16	13.48
				8-10	10.06	24.19
Hauptbruchfläche: wellig, Spiegelharnisch, mit Talk geschmiert.						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
3Ma-B				0-2	48.73	0.00
				2-4	32.34	2.06
	1.5-6	22.02	6.47	4-6	31.20	2.28
	6-8	14.20	8.76	6-8	28.72	2.93
Hauptbruchfläche: parallel zur S-Fläche, Spiegelharnisch, wellig.						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
5Ma-A				0-2	60.52	0.00
	2-4	45.42	20.18	2-4	51.82	2.11
	4-6	30.21	31.67	4-6	44.18	4.90
	6-8	18.77	41.75	6-8	39.52	7.02
Hauptbruchfläche: parallel zur S-Fläche, rauh, treppenartig, mit Talkfüllung.						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
5Ma-B				0-2	71.22	0.00
	2.5-4	56.87	9.19	2-4	50.19	10.52
	4-6	47.17	15.89	4-6	47.90	11.85
	6-8	44.28	18.18	6-8	46.58	12.69
	8-9	39.47	22.50	8-9	46.58	12.69
Hauptbruchfläche: parallel zur S-Fläche, rauh, treppenartig, mit Talkfüllung.						

Serpentinit mit Talkadern

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
91Fu-1a	0.5-2	55.98	4.79	0-2	57.80	0.00
	2-4	47.61	7.64	2-4	48.93	1.83
	4-6	38.38	11.83	4-6	45.67	2.88
	6-8	29.37	16.66	6-8	43.43	3.85
	8-10	27.56	17.77	8-10	41.24	5.02
Hauptbruchfläche: uneben, rauh, z. T. durch Talkader (leicht verwittert).						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
91Fu-1b	0.5-2	45.66	11.81	0-2	64.04	0.00
	2-4	36.14	15.81	2-4	53.60	3.15
	4-6	34.25	16.78	4-6	49.44	4.96
	6-8	28.21	20.12	6-8	42.02	9.0
Wie bei 91Fu-1a, aber die Bruchfläche ist frisch.						

Malenco-Serpentinite

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
75Po-1-1a				0-2	63.47	0.00
				2-4	54.31	2.69
	4-6	46.24	39.55	4-6	50.06	4.54
Bildung von 2 keilförmigen Bruchstücken: die Bruchflächen sind rauh und uneben.						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
75Po-1-1c				0-2	62.50	0.00
	3-4	55.39	29.19	2-4	49.44	1.87
	4-6	54.31	30.57	4-6	46.78	2.75
	6-8	49.70	37.30	6-8	46.32	2.97
	8-9	36.81	57.77	8-9	41.76	5.53
Hauptbruchfläche: uneben, rauh.						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
75Po-1-2d				0-2	61.54	0.00
	2.5-4	61.17	19.73	2-4	49.70	2.97
	4-6	58.80	22.72	4-6	46.86	4.01
	6-7	56.30	26.40	6-7	40.71	6.93
Hauptbruchfläche: uneben, rauh.						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
75Po-1-2f				0-2	70.50	0.00
	3-4	59.22	19.46	2-4	55.07	7.48
	4-6	54.05	25.34	4-6	53.64	8.35
	6-8	52.19	27.75	6-8	49.01	12.58
	8-9	46.66	35.68	8-9	49.01	12.58
Hauptbruchfläche: uneben, rauh.						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
75Po-1-2f				0-2	70.50	0.00
	3-4	59.22	19.46	2-4	55.07	7.48
	4-6	54.05	25.34	4-6	53.64	8.35
	6-8	52.19	27.75	6-8	49.01	12.58
	8-9	46.66	35.68	8-9	49.01	12.58
Hauptbruchfläche: uneben, rauh.						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
75Po-2-1c				0-2	60.86	0.00
	3-4	50.36	18.55	2-4	52.44	2.10
	4-6	46.08	22.01	4-6	50.00	3.05
	6-8	35.53	31.76	6-8	48.04	4.07
	8-10	31.75	35.61	8-10	46.99	4.75
Hauptbruchfläche: uneben, rauh.						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
75Po-2-1d				0-2	62.12	0.00
	2.5-4	55.85	21.47	2-4	55.35	1.90
	4-6	49.88	27.79	4-6	50.48	4.01
	6-7	48.45	29.49	6-7	47.61	5.60
2 einkeilende Bruchkörper; Bruchfläche: uneben, rauh						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
75Po-2-1e				0-2	63.89	0.00
	3.5-4	54.64	26.23	2-4	54.31	2.91
	4-6	54.64	26.23	4-6	51.45	4.20
	6-7	47.46	36.03	6-7	47.75	6.35
Hauptbruchfläche: rauh, uneben, viele Risse parallel zur Probenachse.						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
75Po-2-2c				0-2	66.31	0.00
	3.5-4	22.02	30.51	2-4	50.00	5.54
	4-6	22.59	30.06	4-6	45.50	7.52
	6-8	22.59	30.06	6-8	36.43	12.38
	8-10	22.59	30.06	8-10	32.30	14.90
Hauptbruchfläche: uneben, rauh.						

Probe Nr.	p	φ_p	c_p	p	φ_r	c_r
75Po-2-2d				0-2	59.00	0.00
	3-4	47.61	22.85	2-4	49.19	2.11
	4-6	45.07	25.02	4-6	45.83	3.24
	6-8	41.38	28.63	6-8	41 60	5.10
Hauptbruchfläche: durch Verfältelungsflächen: glänzend, wellig.						

Anhang C: Resultalte der direkten Scherversuche

Die ermittelten Resultate aus den direkten Scherversuchen mit kontiniuierlichen Bruchzuständen werden in den folgenden Tabellen dargestellt. Die Beschreibung der Diskontiniutätsflächen nach dem Bruchvorgang steht am Ende jeder Tabelle.

Aderbildung aus Serpentin-Mineralien

Probe 34Ma-A: Slipfibre aus Chrysotil + Calcit (in Richtung des ursprünglichen Schersinns).
Gastgestein: Ophicalcit

Normaldruckbereich	c_p	φ_p	c_r	φ_r
0-2	0.69	50.63	0.00	40.19
2-4	1.67	37.77	0.35	33.22
4-6	2.21	31.38	0.46	32.41
Bruchfläche: uneben, zum grössten Teil bedeckt mit langen, parallelen Chrysotilfasern (zum grössten Teil parallel zur Scherrichtung), stellenweise zermahlenes Calcitmaterial.				

Probe 34Ma-B: Slipfibre aus Chrysotil + Calcit (in entgegengesetzter Richtung des ursprünglichen Schersinns)
Gastgestein: Ophicalcit

Normaldruckbereich	c_p	φ_p	c_r	φ_r
0-2	0.45	58.55	0.00	47.98
2-4	1.89	41.83	0.23	44.27
4-6	2.51	36.69	0.67	41.51
Bruchfläche: z.T. durch Ader (vgl. 34Ma-A) und z.T. durch Gastgestein (uneben, mit Gleitharnischen)				

Probe 39To: Crossfibre aus Chrysotil
Gastgestein: Pyroxenhaltiger Serpentinit

Normaldruckbereich	c_p	φ_p	c_r	φ_r
0-2			0.00	44.78
2-4			0.24	41.18
4-6			0.52	39.52
6-8			1.21	34.99
8-10			1.56	33.02
Bruchfläche: treppenartig, glatt				

Probe 62Ma-B: Crossfibre aus Chrysotil
Gastgestein: Pyroxenhaltiger Serpentinit

Normaldruckbereich	c_p	φ_p	c_r	φ_r
0-2	1.51	53.37	0.00	46.67
2-4	1.90	48.99	0.35	41.67
4-6	2.97	41.51	0.82	37.78
Bruchfläche: uneben, rauh				

Probe 63Su-A: Slipfibre aus Chrysotil (in Richtung des ursprünglichen Schersinns)
Gastgestein: Pyroxenhaltiger Serpentinit

Normaldruckbereich	c_p	φ_p	c_r	φ_r
0-2	0.00	54.56	0.00	46.40
2-4	0.30	51.56	0.32	40.69
4-5	0.80	49.72	0.49	40 34
Bruchfläche: uneben, rauh				

Probe 91Fu-E: Antigoritader z.T. mit Talk und Calcit
Gastgestein: Antigoritserpentinit

Normaldruckbereich	c_p	φ_p	c_r	φ_r
0-2	0.06	46.69	0.00	34.41
2-4	0.40	41.83	0.22	29.68
4-6	1.10	35.94	0.43	28.15
Bruchfläche: eben, glatt				

Talkader

Probe 90Fu-A: ca. 3mm dick; massiger Talk
Gastgestein: Talkhaltiger Serpentinit

Normaldruckbereich	c_p	φ_p	c_r	φ_r
0-2			0.00	23.27
2-4			0.21	18.00
4-5			0.41	14.57
Die massige Aderfüllung zerfällt in ca. 2 mm grosse, augenförmige Bruchstücke. Die Kontaktfläche Gestein/Ader ist eben und rauh.				

Klüfte ohne Gleitharnische und ohne Mineralneubildung

Probe 10Po: parallel zur S-Fläche, leicht uneben, glatt
Gastgestein: Malenco-Serpentinit

Normaldruckbereich	c_p	φ_p	c_r	φ_r
0-2			0.00	37.41
2-4			0.13	34.21
4-6			0.48	31.17
6-8			0.76	29.25
8-10			0.97	27.25
Bruchfläche: zermahlene Punktstellen, sonst keine Änderung				

Probe 40Mu: eben, glatt
Gastgestein: reiner Serpentinit

Normaldruckbereich	c_p	φ_p	c_r	φ_r
0-2			0.00	38.66
2-4			0.21	34.99
4-6			0.47	32.00
6-8			0.85	29.89
Bruchfläche: zermahlene Punktstellen, sonst keine Änderung				

Probe 44Mu: eben, glatt
Gastgestein: reiner Serpentinit

Normaldruckbereich	c_p	φ_p	c_r	φ_r
0-2			0.00	36.25
2-4			0.11	34.99
4-6			0.33	32.24
6-8			0.70	29.54
8-10			1.06	27.32
Bruchfläche: zermahlene Punktstellen, sonst keine Änderung				

Probe 63Su-A: Kluft mitten durch eine dichte Serpentinader, eben, glatt
Gastgestein: Pyroxenhaltiger Serpentinit

Normaldruckbereich	c_p	φ_p	c_r	φ_r
0-2			0.00	37.23
2-4			0.15	33.62
4-6			0.36	31.38
Bruchfläche: zermahlene Punktstellen, sonst keine Anderung				

Spiegelharnische (mit Rutschharnischen)

Probe 24Lo: S-Flächen, uneben
Gaststein: stark mylonitisierter Ophicalcit

Normaldruckbereich	c_p	φ_p	c_r	φ_r
0-2			0.00	26.10
2-4			0.18	22.05
4-6			0.32	19.79
6-8			0.71	16.96
8-10			1.31	13.22
Bruchfläche: Bruch findet entlang mehreren parallelen Flächen statt; fein zermahlenes Calcitmaterial auf sehr glatten Spiegelharnischen				

Probe 50Ma-A: leicht uneben
Gastgestein: reiner Serpentinit

Normaldruckbereich	c_p	φ_p	c_r	φ_r
0-2			0.00	28.80
2-4			0.10	26.50
4-6			0.30	24.20
6-8			0.85	22.10
Bruchfläche: keine Änderung				

Probe 50Ma-B: wie Probe 50Ma-A

Normaldruckbereich	c_p	φ_p	c_r	φ_r
0-2			0.00	28.59
2-4			0.06	28.37
4-6			0.30	25.41
6-8			0.67	22.78
8-10			1.47	16.17
Bruchfläche: keine Änderung				

Probe 51Mü-A: eben
Gastgestein: reiner Serpentinit

Normaldruckbereich	c_p	φ_p	c_r	φ_r
0-2			0.00	30.96
2-4			0.11	29.25
4-6			0.21	27.02
Bruchfläche: keine Änderung				

Rutschharnische mit Edelserpentin

Probe 93To-A: leicht uneben in Richtung des ursprünglichen Schersinns (parallel zu den Edelserpentin-Fasern)
Gastgestein: Pyroxenhaltiger Serpentinit

Normaldruckbereich	c_p	φ_p	c_r	φ_r
0-2			0.00	27.47
2-4			0.12	24.23
4-6			0.23	23.02
Bruchfläche: keine Änderung				

Probe 93To-B: Dieselbe Probe wird in entgegengesetzter Richtung des ursprünglichen Schersinns geschert.

Normaldruckbereich	c_p	φ_p	c_r	φ_r
0-2			0.00	35.75
2-4			0.12	31.59
4-6			0.24	30.33
Bruchfläche: die Edelserpentine werden zermahlen				

Rutschharnische mit Serpentinschuppen

Probe 60Ma: eben, bedeckt mit feinen Serpentinschuppen
Gestein: stark kataklastisch deformierter reiner Serpentinit

Normaldruckbereich	c_p	φ_p	c_r	φ_r
0-2			0.00	27.02
2-4			0.16	22.78
4-6			0.47	19.29
Bruchfläche: keine Änderung				

Probe 60Ma-A: Probe 60Ma wird in entgegengesetzte Richtung von vorher geschert.

Normaldruckbereich	c_p	φ_p	c_r	φ_r
0-2			0.00	25.64
2-4			0.13	21.55
4-6			0.37	20.81
Bruchfläche: keine Änderung				

Probe 83Ma: Treppenartig, bedeckt mit sehr feinen Serpentinschuppen in Richtung des ursprünglichen Schersinns geschert
Gastgestein: stark zerklüfteter reiner Serpentinit

Normaldruckbereich	c_p	φ_p	c_r	φ_r
0-2			0.00	26.33
2-4			0.00	26.33
4-6			0.05	23.02
Bruchfläche: keine Änderung				

Probe 83Ma-A: es wird in entgegengesetzte Richtung zu Probe 83Ma (gegen die Treppen) geschert.

Normaldruckbereich	c_p	φ_p	c_r	φ_r
0-2			0.00	34.02
2-4			0.15	30.33
4-6			0.42	28.37
6-7			0.73	25.17
Bruchfläche: die Vertiefungen vor den Treppen werden mit Schuppen gefüllt; sonst keine Änderung				