Zeitschrift: Bulletin für angewandte Geologie

Herausgeber: Schweizerische Vereinigung der Petroleum-Geologen und –Ingenieure; Schweizerische Fachgruppe für Ingenieur-Geologie

Band: 3 (1998)

Heft: 2

Artikel: Scherdeformationen an glazialen Lockergesteinen : in der Natur und im Laborversuch

Autor: Müller, Benjamin U.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-220735

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 04.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Bull. angew. Geol.	Vol. 3	Nr. 2	183-197	Dezember 1998

Scherdeformationen an glazialen Lockergesteinen - In der Natur und im Laborversuch

mit 8 Figuren und 3 Tabellen

BENJAMIN U. MÜLLER*

Zusammenfassung

Um für die Modellierung subglazialer Sedimentgenese präzisere Werte zur Scherfestigkeit erhalten, wurden mittels Kreisring-Scherversuchen an Grundmoränenmaterial subglaziale Sediment-Deformationen simuliert. Dabei hat es sich gezeigt, dass die im Laborversuch entstehenden Scherflächen trotz langer Scherwege von meist über 100 mm im Sedimentdünnschliff nicht erkennbar sind. Dies obwohl auf den Scherflächen deutliche Rutschharnische sichtbar sind. REM-Untersuchungen zeigen nun, dass solche Scherflächen im Extremfall oft nur 2 - 5 µm dick sind und nur aus 1 - 2 Lagen von Bodenteilchen bestehen, die durch den Schervorgang in der Scherfläche ausgerichtet worden sind. In der Natur scheinen solche discrete shears meist bedeutend mächtiger zu sein, sind sie doch im Dünnschliff meist gut sichtbar.

Resumé

Afin de quantifier de manière plus précise des modèles de la génèse des sédiments subglaciales, des moraines de fond ont étés testées dans un Kreisring-Schergerät. Les structures de déformation obtenues par ces tests ne sont pas visibles sur des lame-minces de ces sédiments et cela mème si les sédiments étaient déformées sur des distances plus de 100 mm. Cela est également le cas bien que des striations macroscopiques soient observées sur la plaine de déformation. Des analyses SEM ont montré que les horizons de déformation artificielles ne presentent même dans les cas extrèmes qu'une épaisseur de seulement 2 à 5 µm et qu'ils sont composés de seulement 1 à 2 couches de particles de sol orientées par les tests. En cas des déformations naturelles ces «discrete shears» doivent être beaucoup plus épaisses puisqu'elles sont souvent visibles dans des lames-minces.

1. Einleitung

Einer der in der quartären Sedimentforschung zur Zeit am intensivsten diskutierten Problemkreise ist mit Sicherheit die subglaziale Sedimentgenese und -deformation (z.B. Boulton 1996).

Der Einfluss der Lockergesteinsunterlage auf die Gletscherdynamik wird gerade von Forschern auf dem nordamerikanischen Kontinent, wo nicht alle Fluktuationen des letzteiszeitlichen Eisschildes auf klimatische Vorgänge zurückgeführt werden können (Clark 1995), sehr unterschiedlich beurteilt. Direkte Messungen von Deformationen an der Gletscherbasis des Storglaciären (Schweden) scheinen ei-

* Geologisches Institut der Universität Bern, Quartärgeologie, Baltzerstrasse 1, CH-3012 Bern

nerseits die Wichtigkeit der subglazialen Sedimentdeformation bei kurzfristigen Beschleunigungen des Gletschers zu relativieren (Iverson et al. 1995). Andererseits bleibt bei 'surges' und surge-ähnlichem Verhalten von Gletschern immer noch unklar welche Rolle Lockergesteinsdeformationen an der Gletschersohle spielen. Dies ist insofern nicht weiter verwunderlich, da der allfällige Einfluss einer Lockergesteinsunterlage bei diesen gletscherdynamischen Extremereignissen bisher noch nicht oder nur ungenügend berücksichtigt worden ist. Die meisten 'surges' werden in der Literatur mit veränderten Porenwasserdrücken an der Gletscherbasis in Verbindung gebracht. Dass diese aber in einer direkten Wechselwirkung mit den Lockergesteinen an der Gletscherbasis stehen, wurde nach unserem Erachten bisher zu wenig in die gemachten Betrachtungen miteinbezogen.

Aus diesen Ausführungen wird klar, dass einer der Schlüssel zum besseren Verständnis der Eisdynamik heutiger und vergangener Gletschersysteme in den Eigenschaften der Gletscherunterlage (Fest-/ und Lockergesteine) und den durch gletscherdynamische Prozesse neu gebildeten Gletscherbasisablagerungen (Grundmoränen bzw. «lodgement / deformation tills») liegt. Um zu allgemeingültigeren Modellen der glazialen Erosions- und Sedimentationsmechanismen zu kommen, die auch die komplexen Verhältnisse in den Alpen beschreiben können, müssen unserer Meinung nach noch bedeutend mehr Felddaten zu diesem Thema erhoben werden. Neben dem Sammeln von allgemeinen Daten zu Anzahl und Ausdehnung sowie Geschwindigkeit der quartären Vereisungen in den Alpen (Graf 1993, Müller 1995, Schlüchter & Röthlisberger 1995, Dick et al. 1996) wird in der Gruppe Quartärgeologie an der Universtät Bern seit Anfang 1996 schwerpunktmässig zum Thema Genese und Deformation glazialer Sedimente geforscht. Ein wichtiger Teil der aktuellen Untersuchungen besteht dabei aus Scherversuchen an subglazialen Ablagerungen in verschiedenen Schergeräten.

2. Ziele

In diesem Artikel soll einerseits die Stossrichtung des Projekts «Geotechnische Eigenschaften glazialer Sedimente» aufskizziert werden, dazu sollen bereits erste Resultate präsentiert werden. Es wird hierbei auf eine methodische Problematik eingegangen, die den Praktiker gleichermassen wie den Forscher interessieren dürfte, nämlich auf die Vergleichbarkeit der im Labor-Scherversuch geschaffenen Deformationsstrukturen mit natürlichen glazigenen Strukturen. Nur wenn diese einigermassen vergleichbar sind, können wir annehmen, dass unsere Laborresultate auch auf die Praxis übertragbar sind. Dies soll durch eine detailierte Deformationsanalyse mittels Dünnschliffanalysen und REM-Aufnahmen an natürlich deformierten bzw. im Kreisring-Schergerät abgescherten Probekörpern erreicht werden.

3. Methoden

Am Anfang unserer Untersuchungen stand die Suche nach Profilen mit makroskopisch sichtbaren Deformationen in einer gut definierten lithologischen Umgebung. Um sicher zu sein, nur «echte» subglaziale Ablagerungen mit primären bzw. synsedimentären Deformationen zu beproben, wurde bereits im Feld eine sorgfältige Sedimentansprache vorgenommen.
Wo immer möglich wurden zwecks Bestimmung des Raumgewichtes und um

Scherversuche an ungestörtem Material durchführen zu können ungestörte Proben entnommen.

Im Labor (Strassenbaulabor des Kt. Bern, bzw. Geotechnisches Labor der Universtät Bern) wurden flankierend zu den Scherversuchen folgende geotechnische Kenngrössen ermittelt:

Feucht-/ und Trockenraumgewichte
Natürliche Wassergehalte
Korngrössenzusammensetzung
Plastizitäten

Darauf basierend wurden der Liquiditätsindex und die Porosität berechnet.

Die tonmineralogische Zusammensetzung der Proben wurde an der Universität Neuenburg an einem Scintag-Röntgendiffraktometer bestimmt. Dr. Thierry Adatte sei an dieser Stelle herzlich für die angenehme Zusammenarbeit gedankt. Der Karbonatgehalt wurde coulometrisch im Labor der Universität Bern (H. Haas) bestimmt.

Der eigentliche Versuchsschwerpunkt lag aber in der Bestimmung der Schereigenschaften der entnommenen Proben. Zu diesem Zweck wurde ein Kreisringschergerät der Firma Wille Geotechnik der neuesten Generation verwendet. Dieses vollständig elektromechanisch betriebene und EDV-gesteuerte Gerät entspricht bereits dem definitiven Entwurf der neuen DIN-Norm (18137, Teil 3) vom Oktober 1995.

Dieses in der Schweiz bisher einmalige Gerät besitzt einige neue Konstruktionsmerkmale, die eine im Vergleich zu älteren Geräten bedeutend einfachere Handhabung erlauben und die eine bessere Reproduzierbarkeit der Versuche versprechen. So erlaubt die elektromechanische Steuerung eine stufenlose Regelung aller Versuchsparameter, sowie eine online-Überwachung des laufenden Versuches. Der Schertopf sowie alle beweglichen Teile sind in rostfreiem Edelstahl gearbeitet, was zu einer besseren Stabilität des Gerätes auch unter hohen Kräften führt. Zudem erlaubt es die Konstruktion, die Probe unter Wasser zu setzen und somit den Scherversuch unter vollständiger Wassersättigung ablaufen zu lassen. Die Probenfläche beträgt 50 cm^2 (Ø: 96 mm aussen, 50 mm innen), die Dicke kann zwischen 18 und 14 mm variiert werden. Die maximal möglichen Scher-/ bzw. Normalkräfte betragen 500 kN/m^2. Der mögliche Scherweg ist prinzipbedingt im Ringschergerät unbegrenzt, was auch der ausschlaggebende Grund für die Wahl dieses Gerätetyps war. Dies auch unter der Annahme, dass die meisten in der Natur gefundenen Scherflächen zu ihrer Bildung längere Scherwege (> 2 cm) benötigten, speziell wenn die Defomation zur Ausbildung von Rutschharnischen führt. Restscherfestigkeiten können nur in Kreisring-Schergeräten verlässlich bestimmt werden (Bucher 1975, Scheffler 1986), da im Kastenschergerät oder erst recht im Triaxialschergät nur sehr kurze Scherwege gefahren werden können.

Grundmoränenproben mit ihrer charakteristischen diamiktischen Textur können trotz einem neu entwickelten, raffinierten Einbauwerkzeug nur in den allerseltensten Fällen ungestört in die geforderte Ringform gebracht und eingebaut werden. Deshalb wurde aufgrund der Resultate von Holtz & Ellis (1961), sowie Maha (1994) entschieden, gestörte, bzw. aufbereitete Proben zu verwenden. Bei Kiesge-

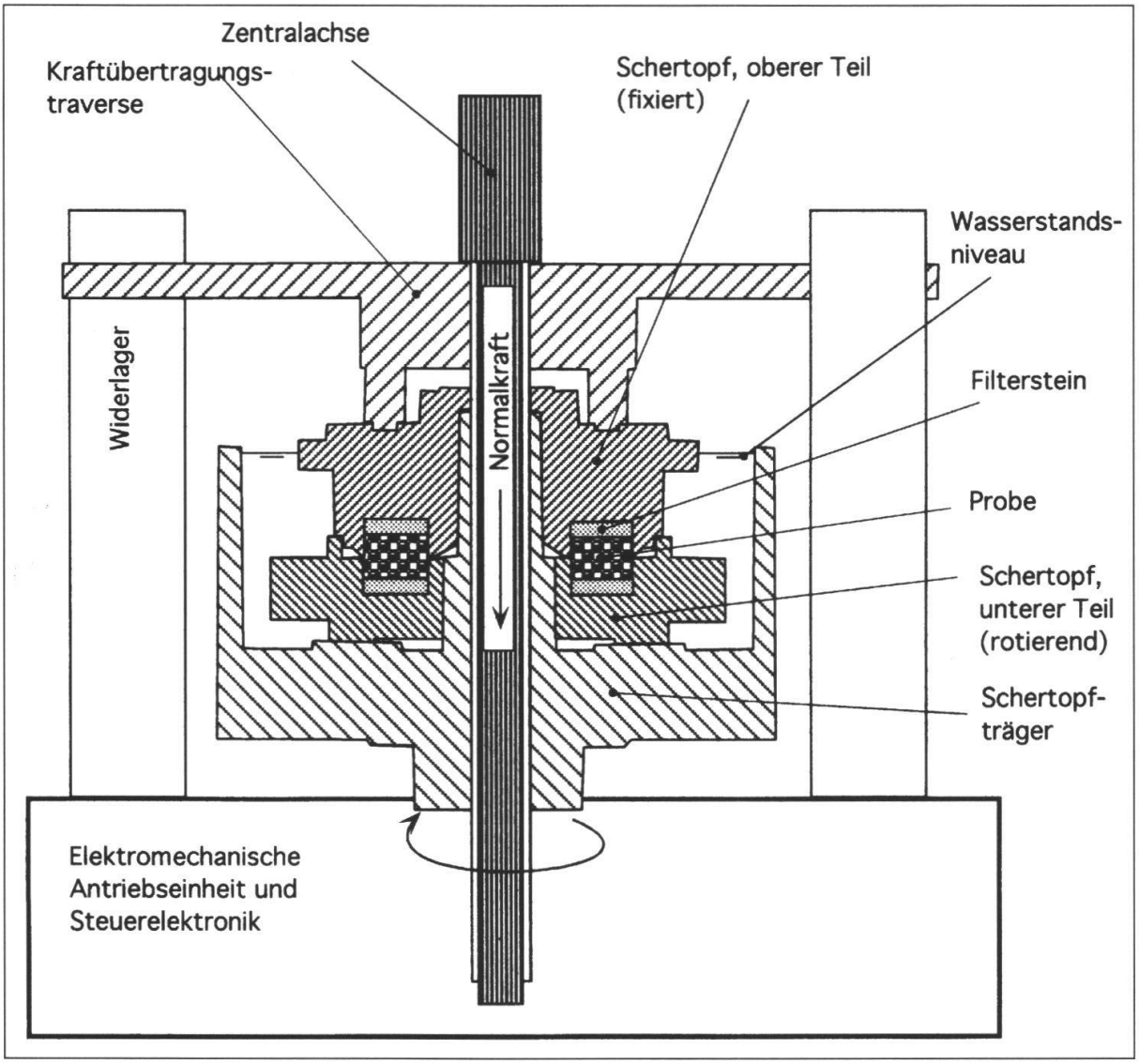

Fig. 1: Schematische Schnittzeichnung durch den Schertopf des Kreisring-Schergerätes Typ Wille

halten von weniger als 40% in einer diamiktischen Probenzusammensetzung ist gemäss diesen Autoren kein Einfluss dieser Fraktion auf die Schereigenschaften des getesteten Sediments zu erwarten. Einzelne feinkörnige Moränenproben konnten erfolgreich ungestört eingebaut werden, was vor allem in methodischer Hinsicht sehr interessante Vergleiche zwischen gestörtem und ungestörten Proben zulässt (Müller 1999).

Da die allermeisten der beprobten Sedimente weniger als 40 % Kiesfraktion enthielten, wurde für die Scherversuche nur die Fraktion < 0.5 mm verwendet. Um die Eigenschaften der Tonmineralien nicht zu verändern, wurden die Proben vor der Trockensiebung nur bei 50 ° C getrocknet (72 Std.). Das so gewonnene Pulver wurde trocken in den Schertopf eingerieselt, leicht kompaktiert und mit Wasser gesättigt. Andere Arten des Probeneinbaus (mit definiertem Wassergehalt, z.B. bei w_l oder w_p) haben sich nicht bewährt, da es sich als schwierig erwies, im feuchten Zustand homogene Mischungen zu erzielen, und diese dann in genügender Qualität einzubauen. Da die Probe während des Versuches so oder so immer unter Wasser

gesetzt wird kann der Wassergehalt problemlos nach dem Einbau definiert werden. Er kann während der ganzen Versuchsdauer (1 - 10 Tage) konstant gehalten werden.

Die Konsolidation der Proben erfolgt dann direkt im Schergerät, in verschiedenen Stufen, abhängig von den Plastizitätseigenschaften der Probe. Tabelle zeigt die Vorkonsolidationsstufen sowie die gewählten Schergeschwindigkeiten in Abhängigkeit vom Plastizitätsindex (Ip) gemäss DIN Norm 18137, Teil 3. Die jeweilige Konsolidationskraft wird dabei nicht von Anfang an voll aufgebracht, sondern sie wird kontinuierlich (10 kN/m^2 pro 10 min) erhöht. Es wird zur nächsten Konsolidationsstufe übergegangen, wenn die gemessene Setzung der Probe kleiner als 0.01 mm / 15 min beträgt. Nach vollendeter Konsolidation wird der Probe eine Entlastungszeit von 45 Minuten eingeräumt und zwar unter der Normalkraft des nachfolgenden Scherversuchs.

Plastizitätsindex Ip	**Konsolidationsstufen (kN/m^2)**	**Schergeschwindigkeit (mm/min)**
< 15	125 / 250 / 500	0.05
15 - 30	50 / 100 / 200 / 500	0.02
> 30	25 / 50 / 100 / 200 / 500	0.01

Tab. 1: Tabelle der gewählten Konsolidationsstufen und Schergeschwindigkeiten in Abhängigkeit vom Plastizitätsindex der Probe.

Die Schergeschwindigkeiten müssen im drainierten Versuch unbedingt so tief gehalten werden, dass immer eine genügende Drainage in der Scherfläche gewährleistet ist. Dies ist vor allem bei stark tonhaltigen Proben mit hohem Ip von grosser Wichtigkeit, da per Definition beim Direktscherversuch nur drainierte Scherfestigkeiten ermittelt werden.

Nach dem Überschreiten des Bruchpunktes kann die Schergeschwindigkeit theoretisch beliebig erhöht werden, da sie keinen Einfluss auf die Restscherfestigkeit zu haben scheint (Bucher 1975). Um die Proben aber nicht unnötig zu stören wurde in unserem Falle meist auf eine Variation der Schergeschwindigkeit verzichtet. Der Scherweg betrug in der Regel 50 mm, pro Probenserie wurde aber mind. eine Probe mit längerem Scherweg gefahren, um sicherzustellen, dass die Restscherfestigkeit wirklich erreicht wurde. Dabei wurden Scherwege bis zu 295 mm gefahren.

Nach Abschluss der Scherversuche wurde an den Probenkörpern der Wassergehalt, sowie die Feucht- und Trockenraumdichten gemessen, wenn es der Probenzustand zuliess. Stichprobenweise wurden Probenkörper geschnitten und es wurden Dünnschliffe zur mikromorphologischen Analyse davon hergestellt. Diese Verfahren wurde auch mit ungestörten Proben angewandt, um so einen Vergleich der Deformationsstrukturen zwischen Experiment und Natur anstellen zu können. Einzelne Probenkörper, die in der Scherfläche aufgebrochen werden konnten, wurden fotografiert und von den Harnischflächen wurden einzelne REM-Aufnahmen angefertigt. Mit den letzten beiden beschriebenen Massnahmen sollte die Mikromorphologie der Scherflächen untersucht werden.

4. Resultate der Scherversuche

4.1 Physikalische Eigenschaften der Sedimente

Es sollen in diesem Rahmen makro- und mikroskopische Defomationsanalysen von drei verschiedenen Sedimenttypen aus zwei unterschiedlichen glazialen Sedimentfolgen gezeigt werden. Einerseits sollen zuerst die im Labor mittels Scherversuch fabrizierten Scherflächen charakterisiert werden, andererseits sollen diese dann für einen Deformationstypen mit den natürlich gefundenen Deformationen verglichen werden.

Die folgenden drei Sedimenttypen wurden in die Untersuchungen miteinbezogen:

- ein basaler Deformationshorizont einer Grundmoräne des Weisstannentalgletschers aus dem Profil «Vorderes Schlössli» (LK: 749.125 / 211.750) bei Mels / SG (Müller, 1996). Proben VS-3, VS-12 und VS-13.
- ein diamiktisches, moränoides Sediment aus einer Bohrung in der Rutschmasse am Hohberg bei Schwarzsee / FR (Probe Hohberg, LK: 589.844 / 169.882).
- eine feinkörnige Gletscherseemoräne (water-lain till - dropstone clay facies) aus der Tongrube Rehag bei Bern (Proben Rehag 3b).

Um eine Wertung der gezeigten Deformationsstrukturen zu ermöglichen sollen in der Folge zuerst die Resultate der ausgeführtenScherversuche und die physikalischen Eckdaten der dazugehörigen Sedimente gezeigt werden (Figur 2, sowieTabellen 2 & 3).

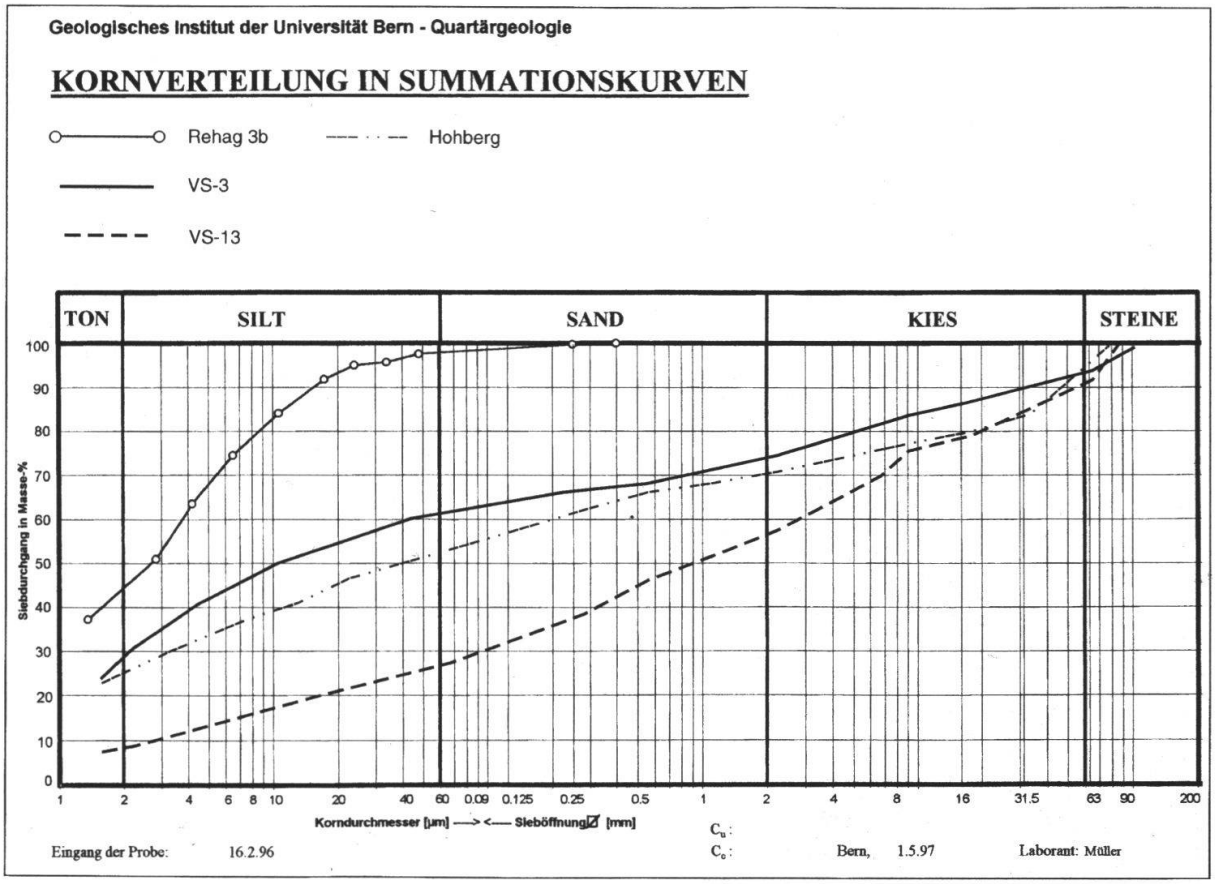

Fig. 2: Korngrössenverteilungen in Summationskurven nach SNV

Probe-Nr.	Winkel der inneren Reibung (Bruch) (°)	Kohäsion (Bruch) (kN/m²)	Winkel der inneren Reibung (Restscher-festigkeit) (°)	Kohäsion (Restscher-festigkeit) (kN/m²)	Brittleness-index (I_B) (%)
VS-3	24.0	11.8	20.6	1.1	22.2
VS-12	20.9	11.4	15.5	6.8	28.1
VS-13	20.6	23.7	17.8	-1.01 (?)	30.1
Hohberg	17.7	36.8	13.0	20.1	32.3
Rehag3b	21.6	99.8	20.8	57.9	78.5

Tab. 2: Resultate der Scherversuche

Proben-Nr.	Wassergehalt (%) nach dem Scherversuch (gesättigt)	Feuchtraum-gewicht (g/cm³) nach dem Versuch	Trockenraum-gewicht (g/cm³) nach dem Versuch	Fliessgrenze (%)	Ausroll-grenze (%)	Plastizitäts-index (Ip)
VS-3	23.4	2.29	1.86	25.3	16.1	9.2
VS-12	17.4	2.32	1.91	24.5	15.0	9.5
VS-13	17.0	2.36	1.95	24.0	15.1	8.8
Hohberg	17.5	2.38	2.01	46.3	16.0	30.3
Rehag3b	15.0	2.1	n.m.	40.0	17.4	22.6

Tab. 3: Geotechnische Kenngrössen der gescherten Proben in Bezug auf den Scherversuch.

4.2 Diskussion der Scherversuchsresultate

Die Resultate der Scherversuche entsprachen im Grossen ganzen unseren Erwartungen. Da alle ausgewählten Proben einen relativ hohen Anteil an Tonfraktion aufweisen, waren die relativ hohen I_B (brittleness index) keine Überraschung. Aus denselben Gründen liegen auch die Winkel der inneren Reibung recht tief. Erstaunlich waren in diesem Zusammenhang nur die kleinen Winkel der inneren Reibung und die niedrigen Kohäsionen bei den Proben VS-3 und VS-12, da es sich gezeigt hat, dass die Sedimente vom Vorderen Schlössli (VS-3 - VS-13) keine echten Tonminerale enthalten, sondern vor allem Chlorit und andere Glimmer, die sich aber im Scherversuch - wohl wegen ihrer plattigen Form - ähnlich verhalten wie echte Tonminerale.

Die nach den Versuchen an den Probekörpern gemessenen Raumgewichte sind recht hoch, es kann also für die Versuche von überkonsolidierten Verhältnissen

ausgegangen werden, Verhältnisse wie sie in der Natur subglazial zu erwarten sind. Die nach dem Versuch gemessenen Wassergehalte sind entsprechend tief und liegen leicht über oder leicht unter der Ausrollgrenze.

Insgesamt kann also davon ausgegangen werden, dass die Simulation subglazialer Verhältnisse (Drucke, Wassergehalte usw.) während den für diese Arbeit durchgeführten Versuche erfolgreich war.

5. Natürliche Deformationen in ungestörten Sedimentproben

Die Suche nach natürlichen Scher- bzw. Deformationsstrukturen wurde schwerpunktmässig mittels Dünnschliffanalyse vorgenommen. Dabei wurden zahlreiche ungestörte Sedimentproben aus makroskopisch sichtbar deformierten, subglazialen Sedimentsequenzen entnommen und untersucht.

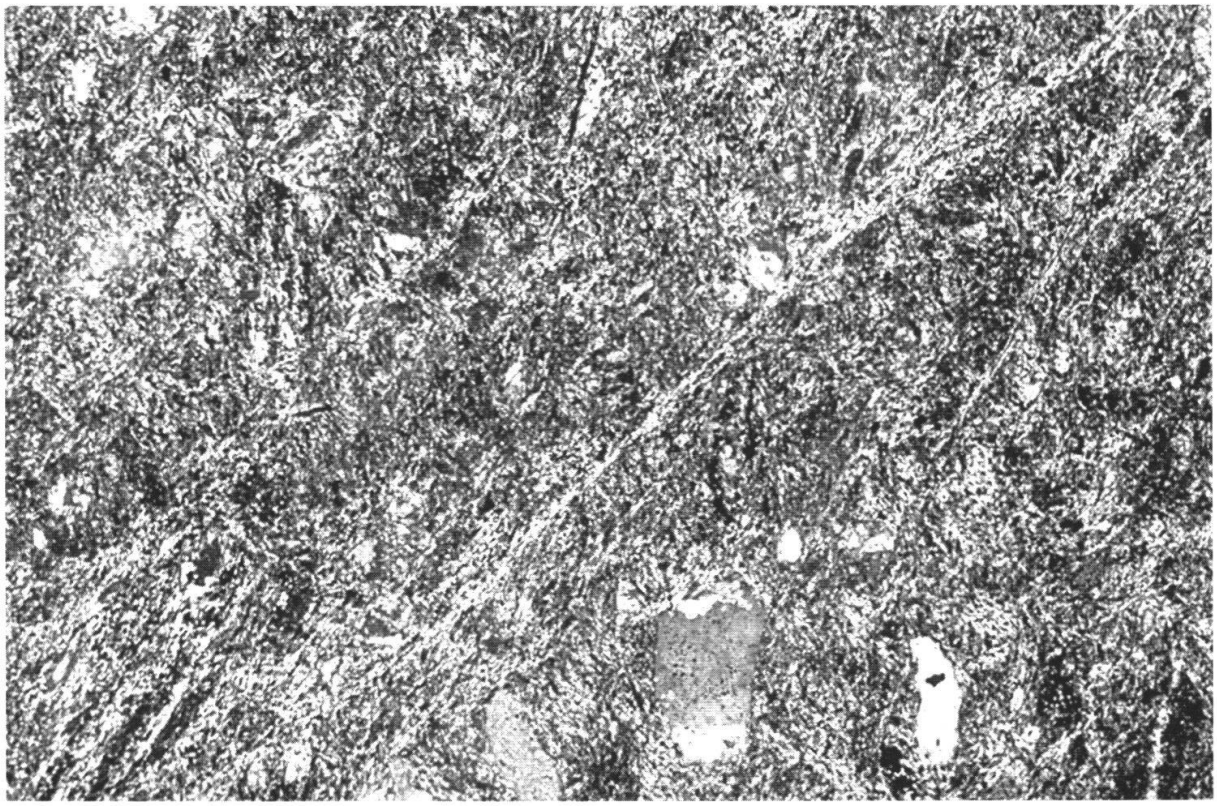

Fig. 3: Dünnschliffbild der Probe VS-3 mit in deutlich hellen (orangegelben) Farbtönen hervortretenden «discrete shears».

Bemerkenswerte Deformationen konnten im vorgängig erwähnten Profil am Vorderen Schlössli bei Mels/SG (Müller 1996) gefunden werden. Die untersten 10 - 15 cm der dort direkt über dem Fels anstehenden Grundmoräne des Weisstannental-Gletschers, sind schon von blossem Auge als stark deformiert zu erkennen. Rutschharnische ohne bevorzugte Einregelung durchziehen den ganzen Horizont in mm-Abständen. Das ganze Sediment erhält dadurch einen charakteristischen, matten Glanz. Die Dünnschliffe aus diesem basalen Horizont bestätigten den makroskopischen Eindruck. Es konnten sehr schöne Deformationsstrukturen gefunden werden. Figur 3 zum Beispiel zeigt in leuchtendem Orange (hell) sehr schöne «discrete

shears», also einfache Scherzonen. Orange Farbtöne (Hohe Doppelbrechung unter gekreuzten Nicols) lassen auf eingeregelte Tonteilchen entlang von Scherflächen im Sediment schliessen. Die Anordnung der Scherfläche lässt in den untersuchten Dünnschliffen keine bevorzugte Richtung erkennen, es können aber oft zwei parallele Scherflächen beobachtet werden.

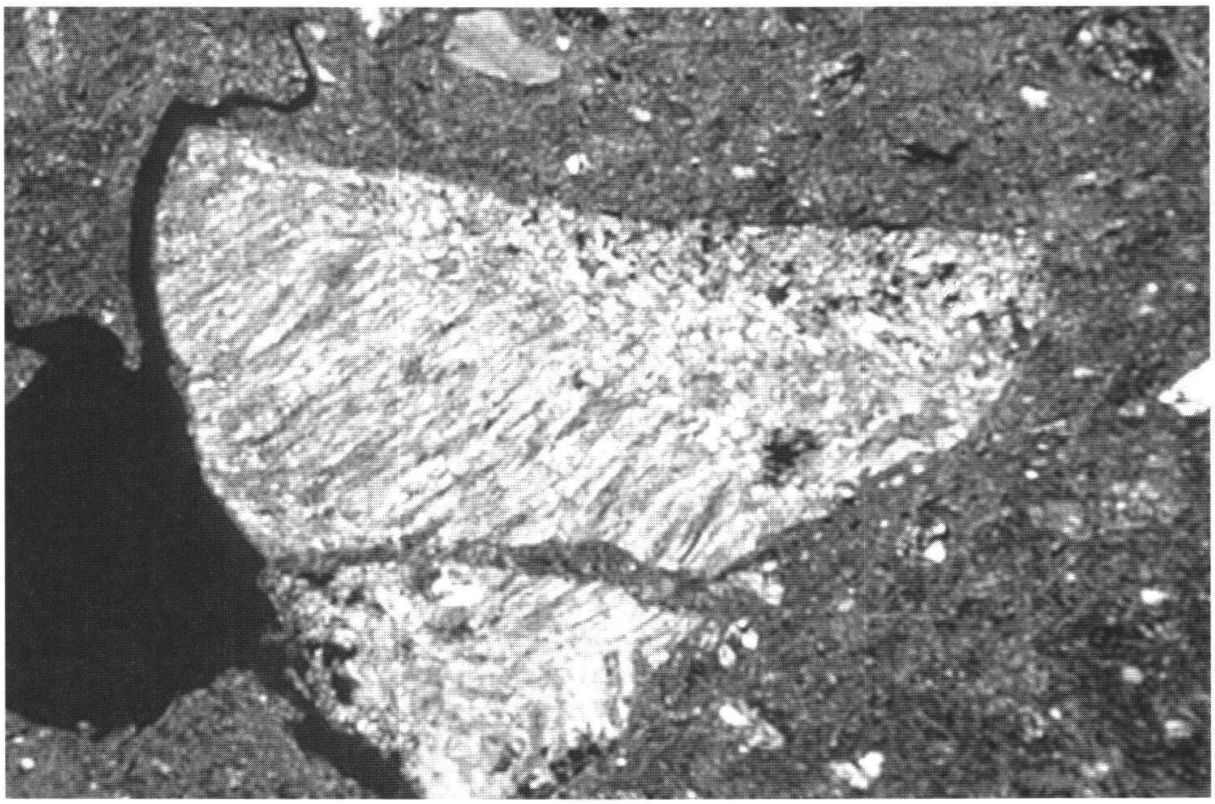

Fig. 4: Dünnschliffbild (VS-3) mit einem während des Deformationsprozesses zerbrochenen Korn

Ein weiteres Indiz für kräftige Spröddeformationen des vorliegenden Sedimentes sind zerbrochene Körner. Figur 4 zeigt ein solches Korn, dessen untere Ecke weggebrochen ist. Die in den Spalt eingedrungene Matrix beweist, dass es sich dabei um einen synsedimentären Vorgang während der voranschreitenden Deformation handelt. Spalten die beim trocknen und festigen des Sediments entstehen, also während der Schliffpräparation, füllen sich mit dem blau eingefärbten Kunstharz und nicht mit Matrix.
Weiter sind ab und zu ganze Bereiche der feinkörnigen Matrix zu finden, die eine recht hohe Doppelbrechung aufweisen. Ein solches «skelseptic plastic fabric» wäre aufgrund der makroskopischen Beobachtung, die auf eine umfassende plastische Deformation des Sediments schliessen lässt, zu erwarten.

Es existieren in der Literatur viele weitere Beschreibungen von Deformationsstrukturen, die wichtigsten, neben den bisher hier erwähnten, sind sicher Rotationsstrukturen bzw. Galaxy-Strukturen, die auf eine Rotation grösserer Komponenten (z.B. Sandkörner) schliessen lassen (Figur 5). Durch die rotative Bewegung grösserer Körner in der feineren Matrix werden die ans grössere Korn grenzenden Matrixbereiche «geschleppt».

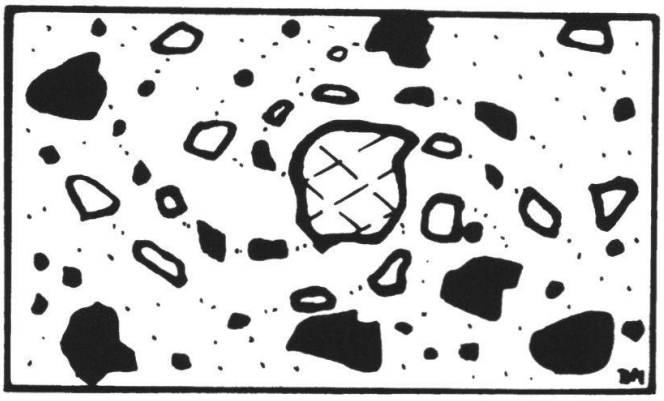

Fig. 5:
Schematische Skizze einer typischen Galaxy-Struktur (nach Van der Meer 1997)

Eine weitere interessante Beobachtung ist die in einzelnen Schliffen von der Lokalität «Vorderes Schlössli» stammenden sichtbare Einregelung der Grobkomponenten parallel der Fliessrichtung des Eises, die in ihrer Stärke und Richtung sehr gut den gemessenen Makrofabrics (Müller 1995) entspricht. Das sehr starke till-fabric ist denn auch das einzige Indiz für eine gewisse primäre Sedimentdeformation im oberen Teil der Moränensequenz am Vorderen Schlössli. Alle anderen Deformationsstrukturen können nur im untersten, basalen Teil der Moräne beobachtet werden.

5.1 Interpretation

Die gezeigten Beispiele von Deformationsstrukturen aus dem basalen Horizont der Grundmoräne des Weisstannengetschers (VS-3) lassen - wie schon der makroskopische Eindruck - auf intensive Deformation dieser Sedimente schliessen. Da die Hangenden 6 - 7 m der untersuchten, gleichaltrigen Grundmoräne des Weisstannengletschers keinerlei makroskopische oder mikroskopische Deformationen (ausser dem till-fabric) aufweist kann in diesem Fall von einer Grundmoräne (lodgement till) mit basalen Defomationshorizont gesprochen werden. Ob hier sogar die fazielle Zweiteilung der Moränensequenz in eine basale Deformationsmoräne (deformation till) und eine hangende Grundmoräne (lodgement till) angebracht wäre und was zu diesem abrupten Wechsel in der Sedimentgenese geführt hat, ist Gegenstand weiterer Untersuchungen (Müller 1999).

6. Künstliche Deformationsstrukturen in gescherten Probekörpern

Dieser Teil der vorliegenden Untersuchungen beschäftigt sich mit den Deformationsstrukturen, die an Probekörpern durchgeführt wurden, die im geotechnischen Labor am Geologischen Institut der Universität Bern prozessiert worden sind. Dabei wurde dasselbe Material verwendet, aus welchem die Schliffe für die Deformationsanalyse an ungestörten Proben hergestellt wurden.

6.1 Makroskopische Deformationsanalyse

Zuerst wurde nach jedem ausgeführten Scherversuch versucht, die Probenkörper in der Ebene der Scherfläche «aufzubrechen». Bei stark tonigen Sedimenten funktioniert das normalerweise recht gut, und es konnten bei Scherwegen zwischen 50 und 295 mm makroskopisch schon deutliche Ansätze einer Rutschstriemung oder sogar einer Rutschharnischbildung ausgemacht werden (Fig. 6).

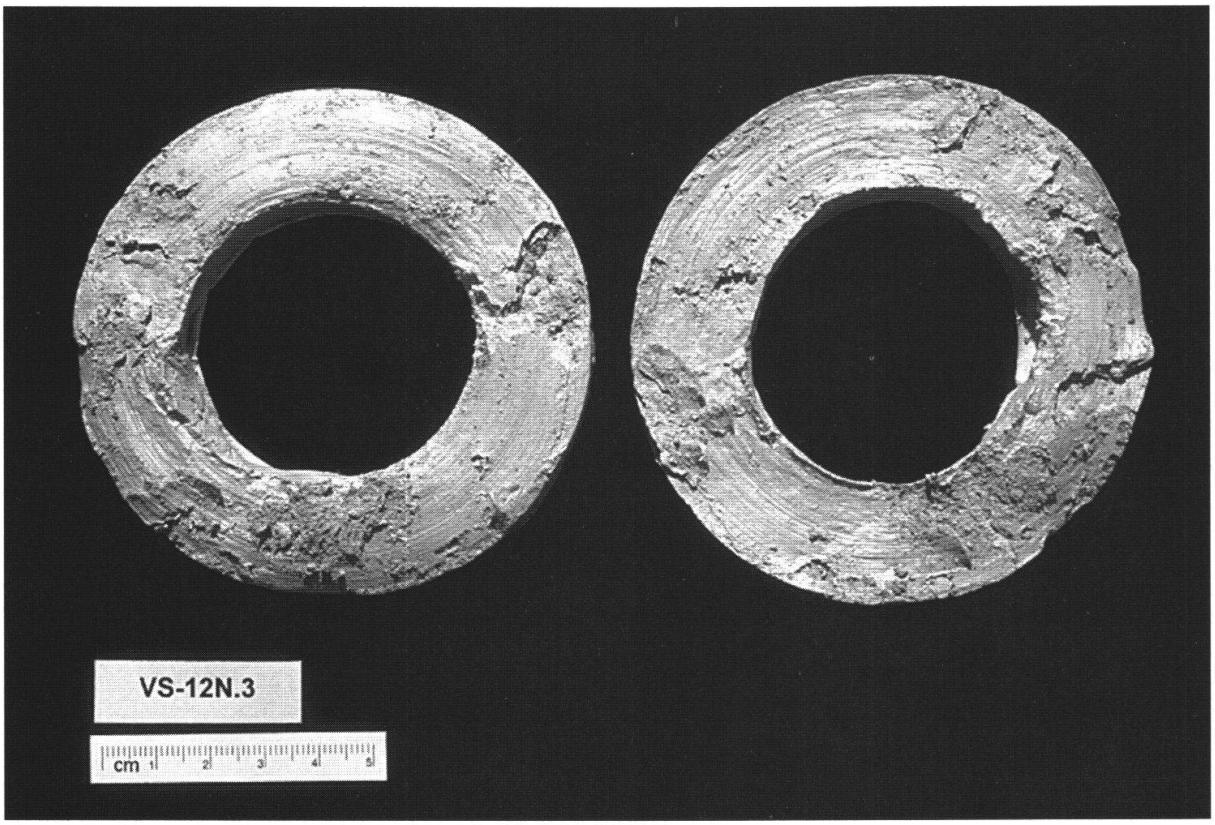

Fig. 6: Aufgebrochener Probenkörper mit Rutschharnischflächen.

Bei den eher sandigen Proben konnten die gescherten Probenkörper in der Regel nicht aufgebrochen werden, da es dort vermutlich auch nicht zur Ausbildung einer polierten Scherfläche kam. In diesen Fällen wurden die ganzen Probekörper gesägt, gefestigt und geschliffen.

6.2 Dünnschliffanalyse

Die Analyse von Dünnschliffen, der gescherten Probekörper zeitigte erstaunliche Resultate: Es konnten praktisch keine Spuren von Deformation ausgemacht werden, obwohl die Lokalisierung der Scherfläche in der Mitte des Probekörpers prinzipiell einfach sein sollte. Aus technischen Gründen wird die Ausbildung der Scherfläche im Kreisringschergerät von der Lage der Scherfuge des Schertopfes induziert. Die Scherfuge muss sich also an einem vorbestimmten Ort in der Probenmitte ausbilden, was einer der Nachteile aller Direktscherversuche ist.

In einzelnen Fällen konnte zwar eine Anreicherung von dunkleren Matrixmaterialien (Tonteilchen?) am Ort der vermuteten Scherfläche beobachtet werden, Indizien für Deformation im Sinne der vorgängig beschriebenen natürlichen Strukturen konnten aber in keinem Fall gefunden werden. Nicht einmal bei Proben mit deutlich ausgeprägten Rutschharnischen auf den Scherflächen konnten im Dünnschliff irgendwelche Deformationen erkannt werden. Diese Resultate werfen einige Fragen zur Vergleichbarkeit von Laborscherversuchen und natürlichen Scherdeformationen auf.

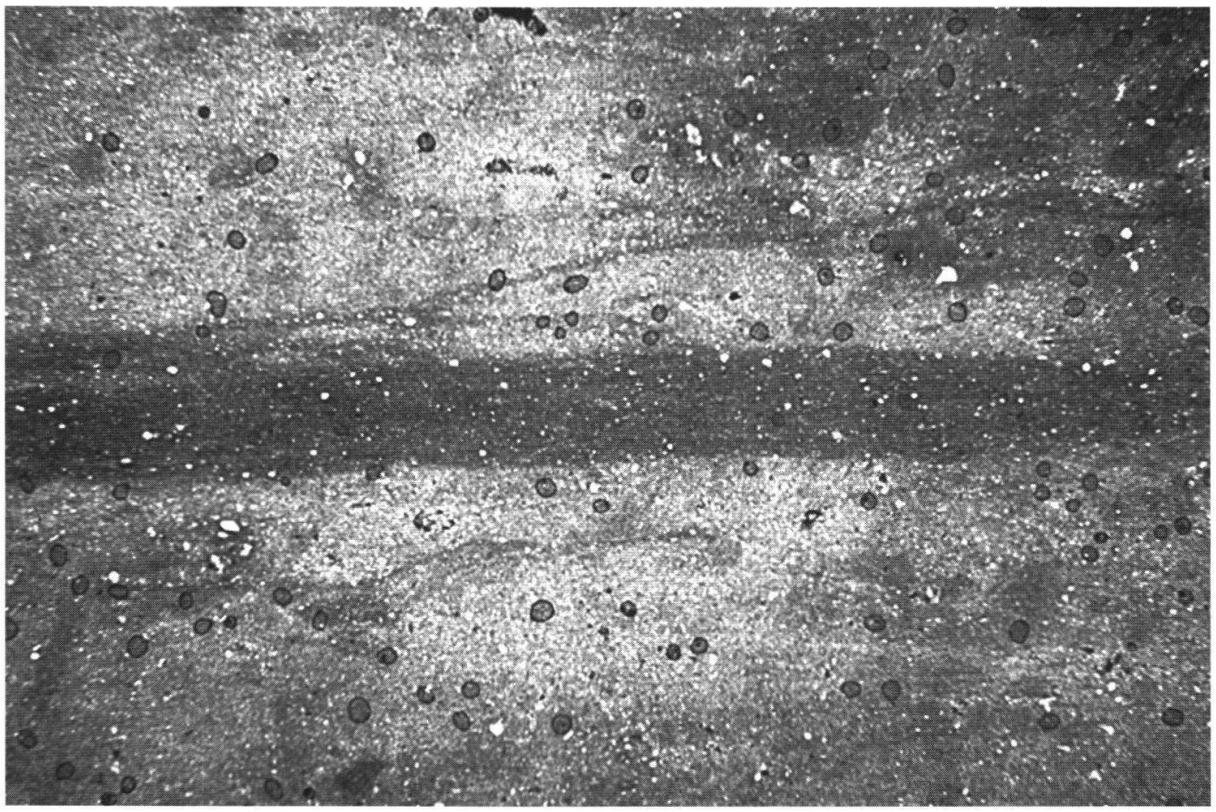

Fig. 7: Dünnschliffbild eines bis zur Restscherfestigkeit abgescherten Probekörpers mit Anreicherung dunklerer Matrixteilchen im Bereich der Scherfuge.

6.3 REM - Untersuchungen

Mittels REM-Aufnahmen an den von uns gescherten Probenkörper sollte nun die Diskrepanz zwischen natürlichen und künstlichen Deformationsstrukturen etwas erhellt werden.

Dabei zeigte es sich, dass in den untersuchten Probekörpern nur ausserordentlich dünne Scherzonen von einigen wenigen µm Dicke gefunden werden konnten. Es sind im Extremfall nur 1 - 2 Lagen von Teilchen die entlang der Scherfläche eingeregelt worden sind, im Normalfall vielleicht 4 - 6 Lagen. Bei Teilchengrössen im Ton- bis Feinsiltbereich ergibt das Dicken für den eingeregelten Bereich entlang der Scherfuge von 2 - 10 µm.

Unmittelbar neben diesen dünnen Scherfugen liegen die zumeist plattigen Teilchen schon wieder in einer ungestörten «Kartenhausstruktur» vor. Teilweise verzweigen sich diese Scherfugen, laufen parallel nebeneinander her und laufen oft auch wieder zusammen. Zwischen den Scherfugen liegen meist völlig ungestörte Sedimentbereiche, ohne erkennbare Einregelungen der Teilchen. Selten konnten langgezogene Spalten und Löcher in der Ebene der Scherfuge beobachtet werden, die wohl auf die Trocknung der Proben zurückgehen.

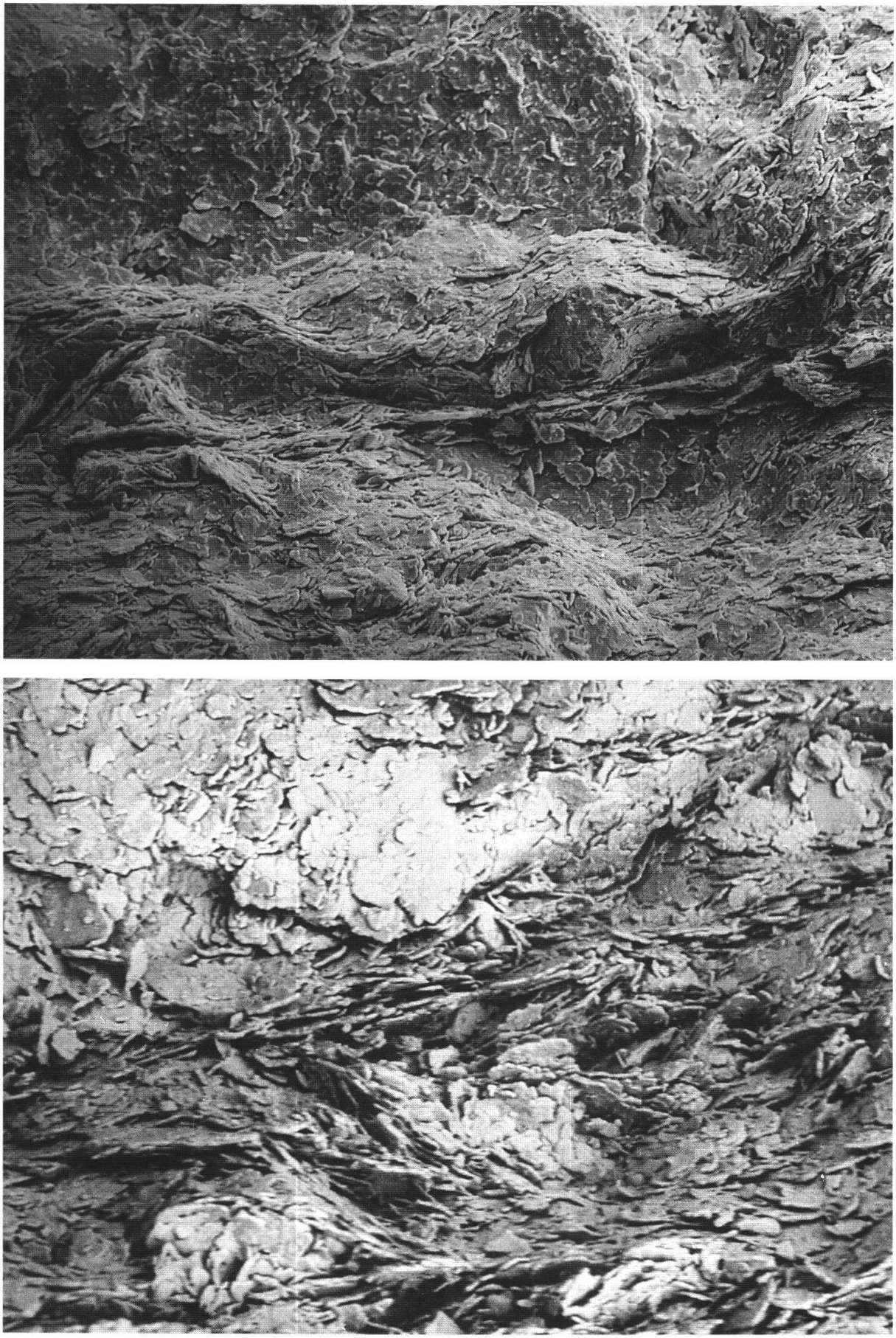

Fig. 8: REM-Aufnahmen der Scherfugen der Probekörpers VS-3 (oben) und Hohberg (unten).

7. Diskussion der Ergebnisse

Die Untersuchung von ungestörten Lockergesteinsproben mittels Dünnschliffen hat sich als wertvolle Methode erwiesen, um natürliche Deformationsstrukturen zu erkennen. Es können verschiedene Indizien für Deformation unterschieden werden, die eine Charakterisierung von eher spröde oder eher plastischen Verhältnissen während der Verformung erlauben.

Die Untersuchung von im Schergerät hergestellten künstlichen Deformationen (z.B. Scherflächen) erfordert hingegen unbedingt auch den Miteinbezug von REM-Aufnahmen. Gerade in stark tonmineralhaltigen Ablagerungen sind die im Kreisringschergerät fabrizierten Scherflächen trotz makroskopisch sichtbarer Rutschharnischbildung nicht dick genug, um im Dünnschliff erkennbar zu sein. Trotz langer bis sehr langer Scherwege 100 - 295 mm, die nur im Kreisringschergerät möglich sind, ist es offenbar nicht immer möglich die in der Natur vorkommenden Deformationen nachzuvollziehen.

Gleichzeitig heisst dies aber auch, dass offenbar viele der in der Natur vorkommenden Deformationsstrukturen durch sehr lange Scherwege bedingt sein müssen. Scher-Deformationen wie sie im Profil «Vorderes Schlössli» gefunden werden konnten dürften also zu ihrer Bildung lange Scherwege benötigt haben. Der dort vorliegende basale Deformationshorizont muss in jedem Fall bis auf Restscherfestigkeit geschert worden sein.

Diese Ergebnisse haben nach unserer Einschätzung weitreichende Konsequenzen in drei Bereichen:

- In der Faziesdiskussion der subglazialen Sedimentgenese muss davon ausgegangen werden, dass viele der beobachteten Deformationen durch lange Scherwege bedingt sind, die das Sediment auf Restscherfestigkeit bringen. Diese Beobachtung kann evtl. helfen - zusammen mit eingehenden Deformationsanalysen - die heute unscharfe Faziesabgrenzung zwischen Grundmoränen im engeren Sinne («lodgement till») und Deformationsmoränen («deformation till») besser definieren zu können.
- Methodisch ergibt sich die Konsequenz, dass Deformationsvorgänge unter dem Gletscher (oder ähnliche Mechanismen) nur im Kreisringschergerät erfolgversprechend simuliert werden können. Nur dort können die erforderlichen langen Scherwege gefahren werden. Andererseits liegt aufgrund der festgestellten Diskrepanzen zwischen natürlichen und künstlichen Deformationstrukturen die Vermutung nahe, dass zur Ermittlung der Restscherfestigkeiten eher noch längere Scherwege gefahren werden müssten als dies heute allgemein üblich ist. Eventuell müssten diese Befunde aber auch ein Auslöser sein, die Entwicklung neuartiger Schergeräte (z.B. Torsionsoedometer, bzw. Kreisringschergerät mit variablem Porenwasserdruck) anzugehen, mit denen «naturnähere», bzw. «wahrere» Scherversuche angestellt werden können.
- Für praktische Anwendungen sind die Folgen ebenfalls vielschichtig. So müssten eigentlich für geotechnische Untersuchungen (Böschungsstabilitäten etc.) sämtliche Lockergesteine vorgängig mikroskopisch auf vorhandene Deformationen untersucht werden. Erst damit ist es dann möglich in der Folge die richtige Scher-

versuchsmethode zu wählen. Sind nämlich in einer Lockergesteinssequenz bereits glaziale oder auch nicht glaziale Deformationen vorhanden, muss die Scherfestigkeit des schwächsten Gliedes in der Sequenz, also der in Restscherfestigkeit vorliegenden Horizonte (alte Gleithorizonte, bzw. glazitektonische Scherflächen) bestimmt werden. Ist es nun nicht möglich (Probleme bei der Probenahme) einen solchen Horizont direkt einem Triaxialscherversuch zu unterziehen, kann eine vernünftige Restscherfestigkeit prinzipbedingt nur in einem modernen Kreisringschergerät ermittelt werden.

Literatur

BOULTON, G.S. 1996: Theory of glacial erosion, transport and deposition as consequence of subglacial sediment deformation. Journal of Glaciology, Vol. 42/140: 43 - 62.

BUCHER, F. 1975: Die Restscherfestigkeit natürlicher Böden, ihre Einflussgrössen und Beziehungen als Ergebnis experimenteller Untersuchungen. Dissertation ETH-Zürich Nr. 5523.

CLARK, P.U. 1995: Fast glacier flow over soft beds. Science 267, 43-44.

DICK K.A., GRAF H.R., MÜLLER B.U., HARTMANN P. & SCHLÜCHTER CH. 1996: Das nordalpine Wasserschloss und seine eiszeitgeologische Umgebung. Eclogae geol. Helv. 89/3.

GRAF, H. R. 1993: Die Deckenschotter der zentralen Nordschweiz. - Dissertation, ETH Zürich.

HOLTZ, W.G. & ELLIS, E. 1961: Triaxial shear characteristics of clayey gravelly soils. 5th Int. Conf. Soil Mech. and Found. Enging. Paris 1: 143 - 149.

IVERSON, N.R., HANSON, B., HOOKE, R.B., JANSSON, P. 1995: Science 267, 80 - 81.

MAHA, D. 1994: Bodenmechanische Eigenschaften Schweizerischer Tone und toniger Kiese bei Kontakt mit Deponiesickerwässern. Veröff. des Instituts f. Geotechnik (IGT) der ETH Zürich, 207.

MCGOWN, A. & DERBYSHIRE, E. 1977: Genetic Influences on the Properties of tills. Q. Jl. Enging. Geol., Vol. 10: 389 - 410.

MÜLLER, B. U. 1995: Das Walensee-/Seeztal (SG) - Eine Typusregion alpiner Talgenese. Vom Entstehen und Vergehen des grossen Rheintal-/Zürichsees. - Eigenverlag, Sarganserländer Druck AG, Sargans.

MÜLLER, B.U. 1996: Letzteiszeitliche Glazitektonik im Weisstannental (SG) - eismechanische und klimatostratigraphische Implikationen. Eclogae geol. Helv. 89/3: 1065 - 1075.

MÜLLER, B. U. 1999 in Vorb.: Zur Vergleichbarkeit von Scherversuchen an ungestörtem und gestörtem Probenmaterial.

SCHEFFLER, H. 1986: Einfluss der Schertechnik auf die wirksamen Festigkeitsparameter eines Tones. 8. Donau-Europäische Konferenz über Bodenmechanik und Grundbau. Sonderdruck. 151 - 156.

SCHLÜCHTER, CH. & RÖTHLISBERGER, CH. 1995: 100'000 Jahre Gletschergeschichte. Aus: Gletscher im ständigen Wandel - Jubiläumssymposium der Schweizerischen Gletscherkommission 1993 Verbier (VS). VdF Hochschulverlag AG ETH Zürich.

VAN DERMEER, J. & MENZIES, J. 1997: Micromorphology of glacigenic sediments. Manual of the technical workshop. Brock University, St. Catherines, (Ont), Canada, 1997.