Sedimente des Gletschers. Teil I

Autor(en): **Schlüchter, Christian**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin für angewandte Geologie**

Band (Jahr): **2 (1997)**

Heft 2

PDF erstellt am: **27.04.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-219964

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Bull. angew. Geol.	Vol. 2	Nr. 2	99 -112	Dezember 1997

Sedimente des Gletschers (Teil I)

mit 7 Figuren

CHRISTIAN SCHLÜCHTER[1)]

Keywords: glacial sediments, classification, genesis, physical properties, Alps

Zusammenfassung

Die Klassifikation von Gletschersedimenten (Moränen) ist in der englischen Sprache weit entwickelt, aber zum Teil recht kontrovers. Ausgehend von einer einfachen Definition von Moräne wird eine Unterteilung in vier genetische Typen vorgeschlagen: (1) Grundmoräne, (2) Deformationsmoräne, (3) Gletscherseemoräne und (4) glazigener Schlammstrom. Die Grundmoräne als zentrales glazigenes Sediment wird kurz charakterisiert und ein genetisches Modell vorgestellt.

Résumé

La classification des sédiments glaciaires en langue anglaise a atteint un niveau de compléxité élevée et souvent controverse. Avec une définition simple des sédiments morainiques on arrive á quatre types génétiques différents: (1) Moraine de fond, (2) moraine de déformation(s), (3) moraine sous-aquatique et (4) moraine d'écoulement glaciaire. La moraine de fond comme sédiment glaciaire centrale est charactérisé brièvement et un modèle génétique est proposé.

1. Einleitung

Eine sedimentologische Klassifikation glazigener Sedimente in deutscher Sprache trifft gleich zu Beginn der Diskussion auf ein Grundproblem: der Begriff «Moräne» ist doppeldeutig. Unter «Moräne» verstehen wir sowohl eine durch den Gletscher aufgebaute Landschaftsform (meist ein langgezogener, sich von der Geometrie der (Fels)-Unterlage klar abhebender, i.d.R. asymmetrischer Rücken), als auch die Gesamtheit der durch den Gletscher direkt abgelagerten Sedimente. Meistens geht aus dem Zusammenhang des Textes hervor, welcher der beiden Inhalte im speziellen Falle der «Moräne» zuzuordnen ist. Deutsche GeologInnen haben z.T. konsequent angefangen, für die Gesamtheit der Gletschersedimente den englischen Begriff «Till» zu übernehmen, um diesem sprachlichen Dilemma auszuweichen (u.a. Piotrowski 1992). Die «Till-Kontroverse» in der deutschen Sprache ist nicht Gegenstand der vorliegenden Darstellung.

Gletschersedimente sind aus verschiedenen Gründen wichtig: (1) auf der Nordhe-

[1)] Geologisches Institut der Universität Bern, Baltzerstrasse 1, 3012 Bern

misphäre bedecken sie mindestens 30% der Fläche der Kontinente (Flint 1971, Piotrowski 1992); (2) sie sind die geologischen Dokumente eiszeitlicher Verhältnisse in der Erdgeschichte und sind demzufolge paläoklimatische Indikatoren erster Ordnung; (3) sie sind in ehemals vergletscherten Gebieten für viele Vorhaben der angewandten Geologie sowohl der Baugrund als auch der Baustoff. - Eine besondere Fragestellung aus der Glaziologie ist in den letzten Jahren wichtig geworden: die Frage nach den mechanischen Eigenschaften basaler Gletschersedimente, bzw. der Gletscherunterlage für das Vorstossverhalten von Gletschern und Eisschilden (u.a. Alley 1991, Iverson et al. 1995, Clark et al. 1996).

Bei der Lektüre sowohl von geotechnischen Berichten als auch von wissenschaftlich konzipierten Publikationen fällt auf, wie verschieden gleiche Sedimente durch verschiedene Autoren beschrieben und klassiert werden - wohl in Ermangelung einer einfachen und breit akzeptierten Moränenklassifikation, bzw. einer entsprechenden Ausbildung. Ein möglicher Ausweg aus diesem Dilemma wäre eine ausschliessliche Verwendung der geotechnischen Klassifikation der Böden, bzw. Lockergesteine (z.B. nach Schweizer Normen); mit einer solch reinen Materialtechnologie gehen aber wichtige geologische Beobachtungen im «geotechnischen Filter» verloren und die ganze klimagenetische Information ist ausgeblendet. Ein Klassifikationskompromiss ist nur möglich, wenn genetische und sedimentologische Kriterien herangezogen werden - in Ansätzen von Keller (1996) verwirklicht.

Das Hauptanliegen im Folgenden wird sein, einige Aspekte der Moränengenese zu diskutieren und eine allgemeine, einfache Klassifikation vorzustellen. Dies geschieht im Bewusstsein, dass diese Zusammenstellung einigen Leserinnen zu wenig detailliert sein wird und dass insbesondere für die Aufnahme von Lockergesteinsbohrungen eine weitergehende Diskussion notwendig sein wird, die bereits mit dem Titel angekündigt ist.

Der forschungsgeschichtliche Rückblick sei kurz gehalten, dies auch deshalb, weil die entsprechenden Publikationen in den letzten 20 Jahren praktisch ausschliesslich in englischer Sprache stattgefunden haben (u. a. Goldthwait and Matsch 1989, Boulton 1968, Shaw 1987, Eyles 1983, Menzies 1995, 1996) und es hier nicht um eine «einfache Übersetzung» gehen soll. Die Moränenforschung findet mit Böhm's «Geschichte der Moränenkunde» (1901) einen ersten Höhepunkt und zugleich einen vorläufigen Abschluss. Der historische Rückblick bis 1901 ist neben dem offiziellen Bericht der Konferenz der Int. Gletscher-Commission von 1899 in Gletsch (Richter 1900) als Resultat dieser Zusammenkunft zu sehen (auch wenn Böhm nicht selber daran teilgenommen hat). Böhm's Zusammenfassung ist wegen ihrer Vollständigkeit und Benennung der Grundprobleme noch immer eine aktuelle Lektüre. Der Gletscherkonferenz von 1899 folgte aber wenig Forschungsinteresse und die bescheidenen Impulse in der ersten Hälfte dieses Jahrhunderts gingen in der Schweiz von Beck (u.a. 1933) aus mit der Einführung des Begriffs «Schlammoräne» und der zunehmenden Bedeutung von geotechnischen Ansätzen (u.a. Jäckli 1962). Erst mit den Aktivitäten der Kommission für Genese und Lithologie Quartärer Sedimente der Int. Union für Quartärforschung (INQUA) ist ein Forschungsschub ausgelöst worden, begleitet vom Bewusstsein, dass die oberflächennahe Lockergesteinsgeologie für Umwelt- und Ingenieurgeologie von zentraler Bedeutung ist. Auch die heutige Diskussion ist noch von diesen Aktivitäten geprägt.

2. Definitionen

Die bereits zitierte INQUA-Kommission hat die folgenden einfachen Definitionen empfohlen (u.a. Dreimanis & Lundqvist 1984):

«**Moräne** ist ein Sediment, das im Gletschereis transportiert und durch Gletschereis abgelagert worden ist, ohne oder mit nur geringfügiger Sortierung durch Wasser».

Orthomoränen oder Primärmoränen sind direkt **durch** den Gletscher abgelagert worden.

Allomoränen oder Sekundärmoränen sind **vom** Gletscher abgelagert worden.

Diese genetischen Definitionen stützen sich auf einen breiten Konsens; sie sind nicht nur sinnvoll, sondern m. E. auch richtig, zeigen aber auch die grundsätzlichen Schwierigkeiten «mit der Rolle des Schmelzwassers» sozusagen. Was bei diesen genetischen Definitionen aber noch ganz fehlt, sind sedimentologische Kenngrössen.

Unter Moräne als Gletschersediment verstehen wir im geologischen Alltag ein unsortiertes, klastisches Korngemisch, das alle Fraktionen (Ton bis Blöcke) enthält und mehrheitlich matrixgestützt ist. Sedimentologisch wird ein solches Sediment, falls seine glazigene Genese nachweisbar ist, als glazigener Diamikt bezeichnet.

Ein wichtiges Grundproblem bei der Moränenklassifikation ergibt sich aus dem Bedürfnis, die an heutigen Gletschern möglichen Beobachtungen direkt auf den fossilen Bereich zu übertragen. Die meisten Phänomene am aktuellen Eisrand sind «Aufnahmen» zu einem bestimmten Zeitpunkt und stellen nur einen bestimmten Zustand in der Sedimententwicklung dar. Wie weit aber z.B. Schmelzwasser oder Deformationen durch den aktiven Eisrand ein «vorläufiges Sediment» noch überprägen, ist dabei offen. Bei keinem anderen Faziesraum muss der Frage so intensiv nachgegangen werden, wie im glazigenen Umfeld: wann ist ein Sediment nun wirklich abgelagert?

Diese Frage wird nachvollziehbar, wenn wir uns die geologischen Vorgänge unterhalb der Gleichgewichtslinie eines Gletschers vorstellen: mit dem Abschmelzen des Eises wird sowohl an der Basis als auch an der Gletscheroberfläche Sediment angereichert und zwar unabhängig davon, ob es sich um basal, inglazial oder supraglazial transportierte Partikel handelt. Man kann sich nun vorstellen, dass diese Anreicherung basal zunimmt, bis an einer Stelle das gesamte Eis ausgeschmolzen ist. Wird sich über die ganze verbleibende Sedimentmächtigkeit ein homogener, gleichartiger Sedimenttyp bilden, der z.B. in Bohrungen einfach als solcher zu erkennen ist? - In der basalen Transportzone eines temperierten Gletschers herrschen i.d.R. extreme Deformationen, wobei schneller und langsamer fliessende Eislammellen durch Scherflächen voneinander getrennt sind. Entlang solcher Scherflächen werden die mitgeführten Gesteinspartikel, wenn sie sich gegenseitig berühren, bis zur Zerkleinerung mechanisch beansprucht und gegenseitig abgeschmirgelt (die basale Scherfläche wäre der Kontakt Gletscherbett/Eis).

Solange das Eis fliesst, wird «intern» und basal erodiert und die Geschiebe, bzw. das Gletscherbett geschliffen. Nach Boulton (u.a. 1996) nimmt mit der Anreicherung von Sediment an der Gletscherbasis und mit zunehmender Eismächtigkeit die Reibung und somit die Tendenz zur Ablagerung von Sediment zu. Damit könnte

also die basale Gletschersedimentation als einfaches Reibungsproblem erklärt werden. Wir werden weiter unten darstellen, dass zusätzlich zum «Reibungsfliessen» die Geometrie des Gletscherbettes bei der basalen Sedimentation zu berücksichtigen ist.

3. Sedimentation durch den Gletscher

Ein Begriff spielt in der Moränenklassifikation eine zentrale Rolle: die Ausschmelzmoräne (melt-out till). Hier stellt sich natürlicherweise die Frage, ob nicht die Gesamtheit der glazigenen Sedimente «Ausschmelzmoräne» ist, die Partikel nur definitiv sedimentieren, wenn das Eis schmilzt. Als Ausnahmen könnten aus geologischer Sicht gelten: (a) Partikel, die durch Sturzvorgänge unterhalb der Gleichgewichtslinie auf den Gletscher gelangen und somit ausschliesslich auf dem Gletscher transportiert werden und folglich auch nicht ausgeschmolzen werden können, sondern bloss durch das Wegschmelzen des Eises liegen bleiben, bzw. vom Eisrand wegrutschen.
(b) Feinpartikel (Gletschermehl), die vom Gletscher in den basalen Scherzonen selbst produziert werden und nicht in jedem Fall eingefroren werden müssen; sie wären also nicht in jedem Fall Teile des Systems Eis + Sediment und müssen demzufolge nicht für die endgültige Sedimentation zuerst ausschmelzen. Es liegt auf der Hand, dass diese beiden Sonderfälle vor allem im fossilen Bereich nicht zwingend eine relevante geologische Rolle spielen ...

Aus der Definition von Orthomoränen geht hervor, dass es sich dabei um Sedimente handelt, die **durch** das Gletschereis **direkt** abgelagert worden sind («deposited **by** a glacier»). Gibt es aber überhaupt solche Sedimente, die keinen Schmelzwassereinfluss zeigen, die also z.B. extrem unsortiert sind?
Wenn wir das gesamte Spektrum eiszeitlicher Lockergesteine überblicken, dann fällt ein Sedimenttyp auf, der korngrössenmässig eine zentrale Stellung einnimmt (Fig. 1): die Grundmoräne. - Neben der Korngrössenzusammensetzung zeigt dieses Sediment noch weitere Eigenschaften, die in ihrer Kombination im Spektrum klastischer Sedimente einmalig sind. Im Folgenden sind diese Eigenschaften kurz erläutert, bevor ein genetisches Modell abgeleitet wird.

Sedimentologisch-materialtechnologische Eigenschaften der Grundmoräne:

(1) charakteristische Korngrössenzusammensetzung
(2) charakteristischer Bereiche von Plastizitätseigenschaften und Wassergehalt
(3) hohes Raumgewicht
(4) charakteristisches Einregelungsmuster der grobkörnigen Klasten («fabric»)
(5) charakteristische Zurundungsmuster der Klasten
(6) typische Entlastungsklüftung («fissility»).

Korngrössenzusammensetzung: Die Korngrössenverteilungskurve zeigt in dem in der geotechnischen Darstellung üblichen halblogarithmischen Diagramm einen charakteristischen diagonalen Verlauf (Fig. 1). Je nach Lithologie des vom Gletscher durchflossenen Einzugsgebietes sind signifikante Abweichungen von einem schematischen Mittelwert zu beobachten: bei kristallinem Untergrund (Granite,

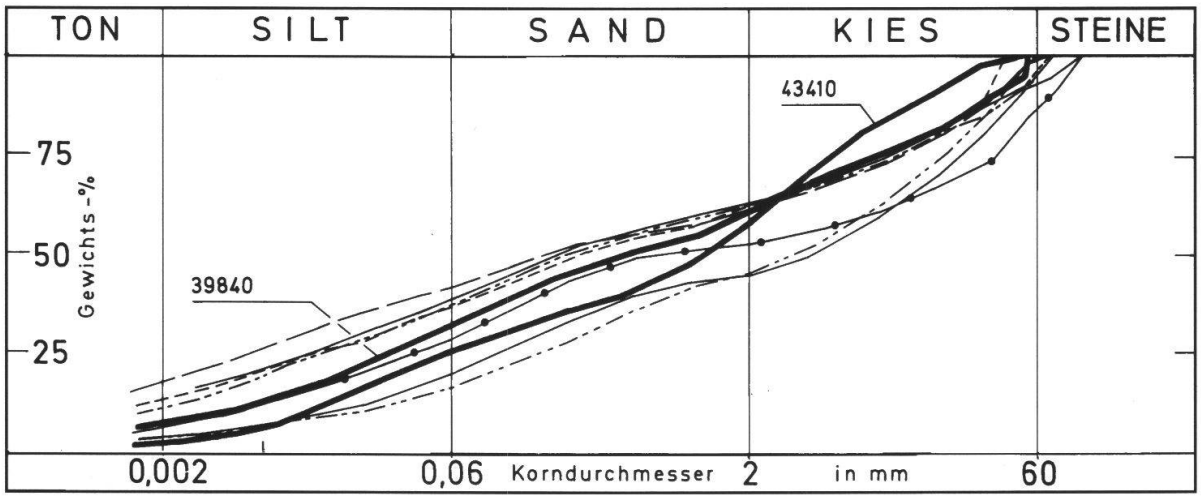

Fig. 1: Typische Kornsummenkurven von Grundmoränen des Alpenvorlandes im Vergleich mit den Referenzproben 39840 aus der basalen Scherzone des Findelengletschers und 43410 aus der linksufrig, lateral aufsteigenden Scherzone des Tsijiore Nouve (aus Schlüchter 1989).

Gneise) und der Sandstein-, bzw. Nagelfluhmolasse ist der Hauptmodus in der Sandfraktion ausgebildet. Kies und Feinanteile treten entsprechend zurück.

Plastizitätseigenschaften/Wassergehalt: Die Plastizitätseigenschaften der Fraktion unter 0,5 mm zeigen eine lineare Entwicklung von tieferen zu höheren Werten: mit zunehmendem W_L nimmt bei Grundmoränen, bzw. glazigen geprägten Sedimenten, I_P entsprechend zu. Dadurch liegen die Werte für Grundmoränen im Plastizitätsdiagramm auf einer Geraden parallel zur Casagrande A-Linie (Fig. 2), von Boulton & Paul (1976) als T - Linie bezeichnet.

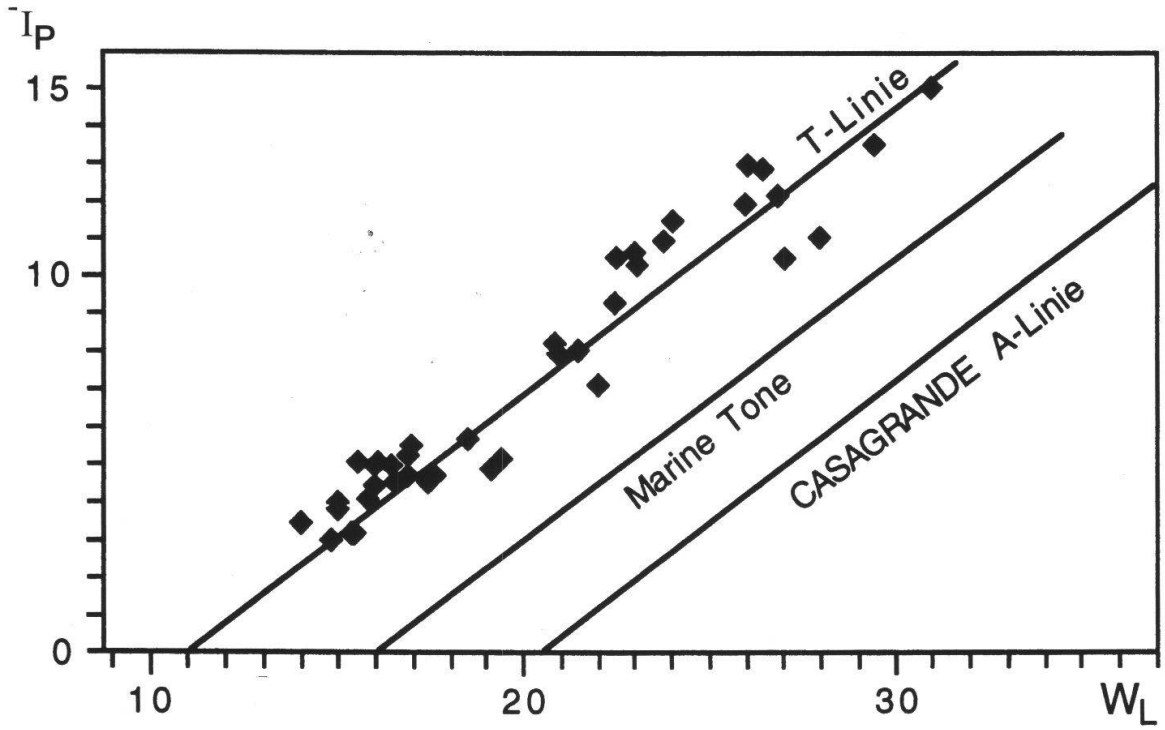

Fig. 2: Plastizitätseigenschaften der Matrix von typischen Grundmoränenproben aus dem Schweizer Mittelland: Darstellung im Atterberg-Diagramm mit der eingetragenen T-Linie (nach Boulton & Paul, 1976).

Der natürliche Wassergehalt von ungestörten Grundmoränenproben liegt i.d.R. sehr nahe, bzw. leicht über der Ausrollgrenze WP. Dieser natürliche Wassergehalt entspricht dem wopt aus dem Proctorversuch für die Grundmoränenmatrix. Das heisst, dass die Bildung der Grundmoräne einer Verdichtung zuzuordnen ist, die für das jeweilige Korngemisch die grösstmögliche Dichte bei optimalem Wassergehalt bewirkt.

Raumgewicht: Ungestörte Grundmoränen sind ihrem Korngemisch entsprechend optimal verdichtet (s. oben) und zeichnen sich durch entsprechend hohe Raumgewichte aus. Die hohe Lagerungsdichte ist auch durch hohe Werte bei in situ SPT - Messungen in Bohrungen gegeben. In ungestörten Grundmoränen sind hohe Raumgewichte bereits oberflächennah (d.h. direkt unter der Verwitterungsdecke) nachweisbar. Solche dicht gelagerten Korngemische sind demzufolge überkonsolidiert, bzw. vorbelastet.

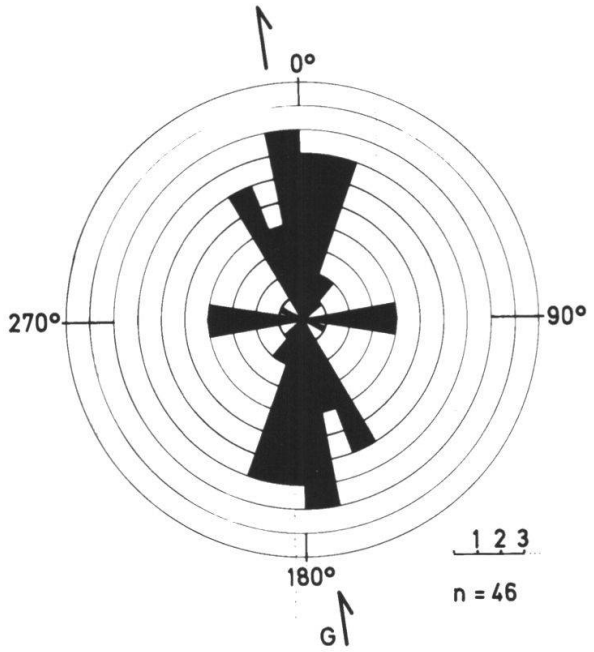

Fig. 3:
Zweidimensionales Einregelungsdiagramm von Geschiebelängsachsen in einem Grundmoränenaufschluss des Alpenvorlandes: charakteristisches «till fabric» mit Haupt- und senkrechter Nebenrichtung. - G = Fliessrichtung des Eises, aus der drumlinisierten Oberflächenform abgeleitet (aus Schlüchter 1989).

Einregelungsmuster («till fabric»): Die Geschiebe-Grobfraktion ist in ungestörten Grundmoränen in charakteristischer Art und Weise eingeregelt. 80 bis 85% der Geschiebelängsachsen liegen parallel zur Fliessrichtung des Eises, ca. 15% liegen quer dazu. Regionale, bzw. lokale Feinheiten der Fliessrichtung der Gletscher sind über Einregelungsmessungen zu rekonstruieren, ebenso jegliches postsedimentäres Zerfliessen (Fig. 3).

Zurundung der Klasten/Geschiebe: Die Gesteinsbruchstücke in der Grundmoräne sind charakteristisch zugeformt. Es sind zwei typische Zuformungsmuster feststellbar: (a) durch die enorme Scherbeanspruchung in der basalen Transportzone des Gletschers werden die mitgeführten Gesteinsbruchstücke bis zum Bruch beansprucht. Dabei entstehen typische konkave Bruchformen. Beim weiteren Schertransport werden dann die entstandenen Kanten angerundet bis, je nach Verlauf der Beanspruchung, weitere «Chips» abgesprengt werden. - (b) Die Gesamtform der Geschiebe ist statistisch von grobkörnigen Klasten anderer Milieus signifikant verschieden (Fig. 4). Natürliche Einschränkungen sind hier vorzunehmen, da nur die Formen der gleichen Lithologien miteinander verglichen werden dürfen und

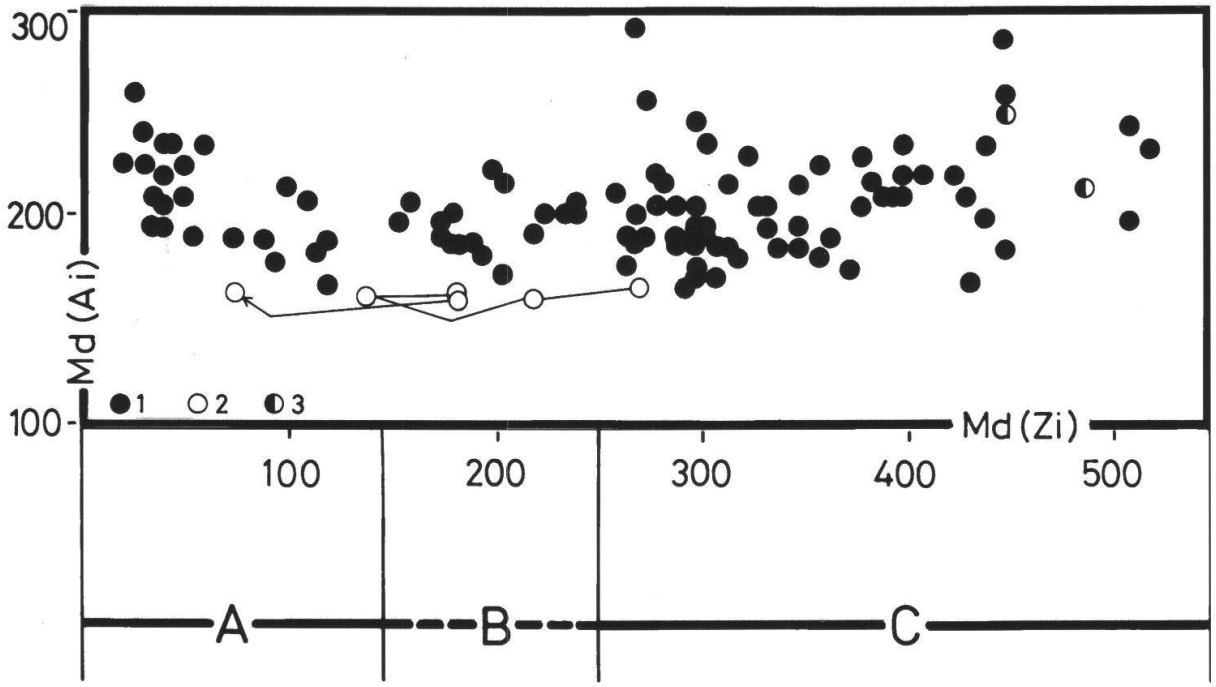

Fig. 4: Schotter- und geschiebemorphometrisches Diagramm für mikritische Kalke der Fraktion 20 bis 63 mm; kontinuierliches Probenmuster von kleiner bis hoher Zurundung (Zi) mit wenig differenzierter Abplattung (Ai).
- A = glazigener Faziesbereich, B = Grundmoränen- und Übergangsfazies, C = fluvioglazialer und fluvialer Faziesbereich. - 1 = Streu- und Eichproben aus Mittelland und Alpen, 2 = charakteristische Wertentwicklung in einem Vorstoss-Schotterprofil, 3 = Deckenschotter vom Stadlerberg (aus Schlüchter 1989).

nur die Fraktion von 20 bis 63 mm Durchmesser gemessen wird. Allerdings ist die charakteristische Zuformung nicht nur auf die Grobfraktion beschränkt, sondern auch bis in die Siltfraktion nachzuweisen (u.a. Werthmüller 1989). Das heisst konsequenterweise, dass die mechanische Beanspruchung der im Eis mitgeführten Klasten für alle Fraktionen in einem vergleichbaren Spannungsfeld geschieht (was wiederum Rückschlüsse auf die (kontinuierlichen ?) Deformationen bei der Bildung von Grundmoräne gestattet).

Die Untersuchung der Zurundung von Grundmoränengeschieben gibt zusätzlich detaillierte Auskunft über evt. Aufarbeitungen von fluvioglazialem Schottermaterial während des Gletschervorstosses und ist für die genetische Charakterisierung von Schotter-Grundmoränensequenzen ein wichtiges Hilfsmittel (vgl. Schlüchter 1989).

Entlastungsklüftung («fissility»): Frische, unverwitterte Aufschlüsse von Grundmoräne zeigen - zumindest in deren Dach - eine auffallende Klüftung. Meistens verläuft diese parallel zur Gelände- oder Grundmoränenoberfläche, oder zur Oberflächengeometrie, grosser, in die Grundmoräne eingelagerter Blöcke. Zwei Bruchsysteme lassen sich unterscheiden: senkrecht zum oberflächenparallelen ist in vielen Fällen eine annähernd vertikale Klüftung ausgebildet. Es handelt sich bei diesen Klüften offenbar um eine Entlastungsklüftung, welche die beträchtliche Vorbelastung des Materials widerspiegelt.
Die Klüftung der Grundmoräne bestimmt deren wirksamen k-Wert und ist bei Anschnitten (Baugruben) direkt für die Gesamtstabilität verantwortlich. - Neben einer reinen Entlastungsklüftung lassen sich, allerdings nur in seltenen Fällen, die

mehr oder weniger horizontalen Klüfte als erhaltene Scherflächen nachweisen. Das Erkennen solcher ist natürlich für die Stabilität von Böschungen und Baugruben in Grundmoränen von entscheidender Bedeutung.

Die Bildung der Grundmoräne: Aus den Eigenschaften der Grundmoräne ist in erster Linie herzuleiten, dass bei der Bildung dieses Sediments die einzelnen Sedimentpartikel streng richtungsmässig definierten Spannungszuständen ausgesetzt sind. Nur so ist die Einregelung der Geschiebe über alle Fraktionen hinweg erklärbar. Ebenso zeigt die Korngrössenzusammensetzung die Abwesenheit von Sortierungsvorgängen durch fliessendes Wasser. Die beträchtliche Kompaktion (die maximale Verdichtung) weist auf eine Belastung hin, allerdings auf eine nicht-einaxiale Spannungseinwirkung, sondern auf ein dreidimensionales Spannungsmuster, das nur mit einem kontinuierlichen (Ring-)Scherversuch nachzuvollziehen wäre, bei dem die Verdichtungsenergie nicht einfach senkrecht-einaxial eingebracht wird. Als Bildungsmilieu der Grundmoräne wird ein Modell vorgeschlagen, wie es in Fig. 5 dargestellt ist. Die hauptsächlichen Randbedingungen sind: (1) kompressives Fliessen des Gletschers an dieser Stelle, (2) Fliessvektor zum Gletscherbett gerichtet, (3) der Wasseranfall an der Gletscherbasis über w_{opt} muss drainieren können, um den Aufbau eines Porenwasserüberdruckes zu verhindern. Dies geschieht allerdings nicht in Hohlräumen und offenen Kanälen, sondern nur über den sich kontinuierlich verdichtenden Porenraum des sich bildenden Sedimentes. Wo im Gletscher, bzw. wo an der Basis, Grundmoräne abgelagert wird, hängt auch in besonderem Masse von der Kleingeometrie des Gletscherbettes ab (s. u.a. Schlüchter 1989, Boulton 1996).

Begrifflich setze ich in meinem Sprachgebrauch den Begriff Grundmoräne dem englischen «lodgement till» gleich. Der Vorgang des «lodgings», also des Steckenbleibens (wie ein Geschoss), oder des Ankleisterns unter Krafteinwirkung entspricht den Vorgängen, die zur Bildung dieses speziellen Sediments notwendig sind. Dass dabei Deformation, und zwar offenbar kontinuierliche Deformation (als «Reibungsfliessen») eine wichtige Rolle spielt, braucht keine weitere Diskussion.

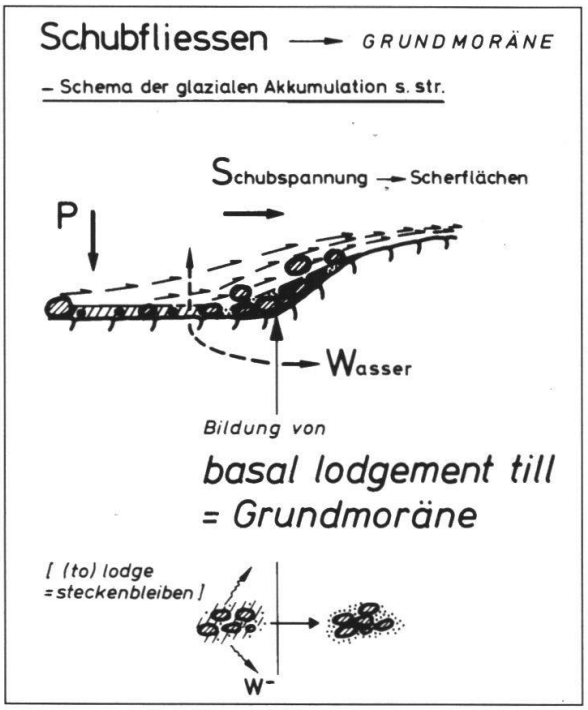

Fig. 5:
Schema der glazigenen Akkumulation sensu stricto oder basale Sedimentation bei schubfliessendem Eis. P = Überlagerungsdruck des Eises, Schraffur im Schema (basale Schicht) = vorhandenes Schmelzwasser, das drainieren kann (Reduktion von w- bis wopt), aus Schlüchter 1989.

Mit der zunehmenden Verdichtung der Grundmoräne und der Erniedrigung des Wassergehaltes, wird jene Eigenschaft des Materials aufgebaut, die als Kohäsion definiert ist.

4. Rolle des Schmelzwassers

Mit dem Verschwinden (= Abschmelzen) des Eises fällt an der entsprechenden Stelle nicht nur das freigesetzte Sediment (die Gesamtheit der im Eise mitgeführten Partikel) an, sondern auch Schmelzwasser. Mit dem Abfliessen desselben werden die freigesetzten Partikel umgelagert und damit sortiert. Die Produkte der Schmelzwasserfazies sind nicht Gegenstand dieser Diskussion. Ein Faziesbereich sei hier aber diskutiert, der im Alpenvorland eine grosse räumliche Verbreitung hat und in der angewandten Geologie, insbesondere der Hydrogeologie, wichtig ist. Es sind jene Sedimente, die vom Gletscher ausgeschmolzen (freigesetzt) werden und in einer Sedimentfalle zur Ablagerung kommen, die in direktem Eiskontakt ist.

Es handelt sich hier um die Fazies der Gletscherseemoräne (oder englisch waterlain oder waterlaid tills). In unserer Mittellandsklassifikation ist es das, was Beck seinerzeit als «Schlammoräne» bezeichnet hat. Worum handelt es sich? Dreimanis hat (u.a. 1979) ein Modell publiziert, das aus zwei Bereichen besteht: die subglaziale Schlammstromfazies und die randglaziale offene Sedimentationsfazies (= rain out). Eine solche Unterteilung ist meines Erachtens nicht notwendig. Wichtig ist, dass die Gesamtheit der vom Gletscher transportierten und beim Abschmelzen freigesetzten Partikel in einer Sedimentfalle im direkten Eiskontakt zur Ablagerung gelangen. Zwei Vorgänge spielen dabei eine Rolle: das direkte Abregnen (Absinken nach dem Stokes`schen Gesetz) und eine gewisse Umlagerung (je nach Wassergehalt und Plastizitätseigenschaften des Materials) in Form von randglazialen und subqauatischen Schlammströmen (Fig. 6). Das dabei entstehende Sediment zeichnet sich aus durch

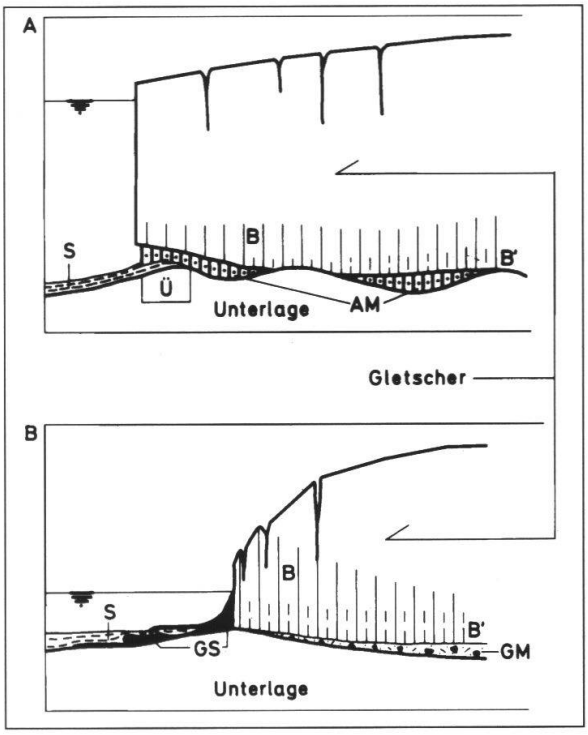

Fig. 6:
Schematische Darstellung der Gletscherseemoränen: A: Modell subaquatischer Ausschmelzmoränen (AM), B: Modell subaquatischer glazigener Schlammströme (GS). - S = glazimarine/-limnische Beckensedimente, Ü = Übergangsfazies Ausschmelzmoräne/glazigene Schlammströme, B = basale Gletscherzone mit Sediment, B' = detritusreiche Basiszone, Unterlage = Gletscherbett, ältere Lockergesteine oder Fels (vereinfacht nach Dreimanis 1979, aus Schlüchter 1989).

- vertikale und horizontale Homogenität im Meterbereich
- massige, feinkörnige Ausbildung
- Inhomogenitäten (einzelne Sandlagen) im Kleinbereich
- Dropstones mit typischer glazigener Formung
- charakteristische Korngrössenzusammensetzung (Fig. 7), Anreicherung der Feinstfraktionen gegenüber der Grundmoräne
- grosse Mächtigkeiten in den übertieften Talabschnitten des Alpenvorlandes (bis über 100 m)
- horizontale und/oder vertikale fazielle übergänge in feinkörnige Beckensedimente, bzw. Grundmoräne
- je nach Alter vorbelastet, bzw. aus dem letzteiszeitlichen Spätglazial normalkonsolidiert
- in vorbelasteten Sequenzen Vorkommen von normalkonsolodierten sandig-kiesigen Linsen und Taschen.

Mein Doktorvater R.F. Rutsch hat mir seinerzeit die Aufgabe gestellt, sedimentologisch die Unterscheidung von Grundmoräne und Seeton darzustellen. Eine triviale Aufgabe? Für mich ursprünglich nicht einmal eine nachvollziehbare Fragestellung bis zum Bekanntwerden von Dreimanis «waterlaid till»-Modell und von Schwierigkeiten bei der Lektüre geotechnischer Berichte, wenn zwei Autoren die gleiche Abfolge in Lockergesteinsbohrungen einmal als «Seetone», bzw. als «Grundmoräne» bezeichnen.

5. Die Rolle des Reliefs

Sowohl für die kleinräumige (Meterbereich) als auch für die regionale fazielle Ausbildung der glazigenen Lockergesteine spielt das präglaziale Relief (in der Form älterer Lockergestein, bzw. Fels) eine entscheidende Rolle. Und zwar bei der Konfiguration von Sedimentfallen und der Drainage-/Entwässerungsmöglichkeit des Eisrandes. Dies ist besonders deutlich in den randglazialen Akkumulationen des Längenberges südlich von Bern oder im Gebiet des Menzinger-Plateaus mit der Evolution der Sihl als randglaziale Sammelrinne zu sehen. Die randglaziale Sedimentation (glazigen, fluvioglazial oder glazilakustrisch) wird durch die jeweiligen Verhältnisse gesteuert.

Für viele Autoren spielen die sog. «till flows» oder «flow tills» auf der Gletscheroberfläche und und am -rand eine grosse Rolle (u.a. Eyles 1987). Dabei handelt es sich m.E. um eine Zwischenfazies im Übergang zwischen der ungestörten glazigenen Sedimentation (Typ Grundmoräne) und der sortierten Schmelzwasserfazies, wobei diese glazigenen Schlammströme auf der Gletscheroberfläche, bzw. am Eisrand auch als proximalsten fluvioglazialen Bereich ausgeschieden werden kann. Gerade in lateralen Ufermoränen kann die Entwicklung dieses Faziesraumes - eben gerade in Abhängigkeit der Entwässerung - nachvollzogen werden (u.a. Schlüchter 1980).

6. Versuch einer Klassifikation

Was im folgenden kurz skizziert ist, betrachte ich als eine einfache genetische glazialgeologische Klassifikation, der auch spezifische Sedimente zugeordnet werden

können. Natürlich hat dieser Vorschlag auch eine persönliche Komponente und hat nicht den Anspruch, alle Frage beantworten zu können. Zumindest meine ich, der Vorschlag sei überblickbar, was nicht immer der Fall ist.

Voraussetzung jeglicher weiterer Klassifikationsschritte ist die Akzeptanz der Definition von Moräne (s. oben) und die Unterscheidung in Primär- und Sekundärmoränen, bzw. in Ortho- und Allomoränen. Daraus kann das folgende Klassifikationsschema resultieren:

Ausschmelzmoräne
«melt out»
Ausschmelzen der Gesamtheit der im Eis transportierten Partikel

(A) Primärmoränen (Orthomoränen)

(1) Grundmoräne
«lodging»
basales, bzw. laterales Steckenbleiben der Partikel unter Druckschmelzen

(2) Deformationsmoräne
«deformation»
basales, bzw. laterales Deformieren bereits abgelagerter glazigener Partikel und Schichten, bzw. von Schichten, die älter sind als der deformierende Vorstoss (inkl. Fels)

(B) Sekundärmoränen (Allomoränen)

(3) Gletscherseemoräne
«waterlaid»
Sedimentation der Gesamtheit der vom Gletscher ausgeschmolzenen Partikel in einer direkten aquatischen Sedimentfalle des Eisrandes (Müller, mündl. Mitt.).

(4) glazigener Schlammstrom
«mass movement» (flow tills, till flows)
Sedimentation des Eisrandes mit zunehmendem Einfluss des Schmelzwassers (= «proximalstes Fluvioglazial»).

Dazu noch einige Bemerkungen: Die Unterscheidung zwischen Grund- und Deformationsmoräne wird heute intensiv diskutiert, bzw. der Begriff Grund- zugunsten es Begriffs Deformationsmoräne abgelehnt. An diesem Streit will dieser Beitrag nicht teilnehmen und es liegt mir daran festzuhalten: (a) dass zur Bildung von Grundmoräne im Sinne von «lodgement till», also der Ankleisterung, bzw. des Steckenbleibens von Partikel (Scher-)Deformation notwendig ist; (b) diese Deformationen erfassen alle Partikelgrössen und zeigen sich in der Matrix in Form von Kohäsion, in der Grobfraktion in Form der strengen Einregelung (des «Fabrics»). Ringscherversuche zeigen (Müller, eingereicht), dass eine kontinuierliche Deformation zur optimalen Verdichtung bei optimalem Wassergehalt wahrscheinlich notwendig ist; (c) für mich gilt der Begriff der Deformationsmoräne für die makroskopisch feststellbaren Deformationen und postsedimentären, mechanisch induzierten Stukturänderungen, analog der Stauch(end)moräne. Dies besonders, weil in «gestauchten Komplexen» häufig echte Grundmoräne vorkommt, die dem stauchenden Ereignis zugeordnet, und als solche ausgeschieden werden kann.

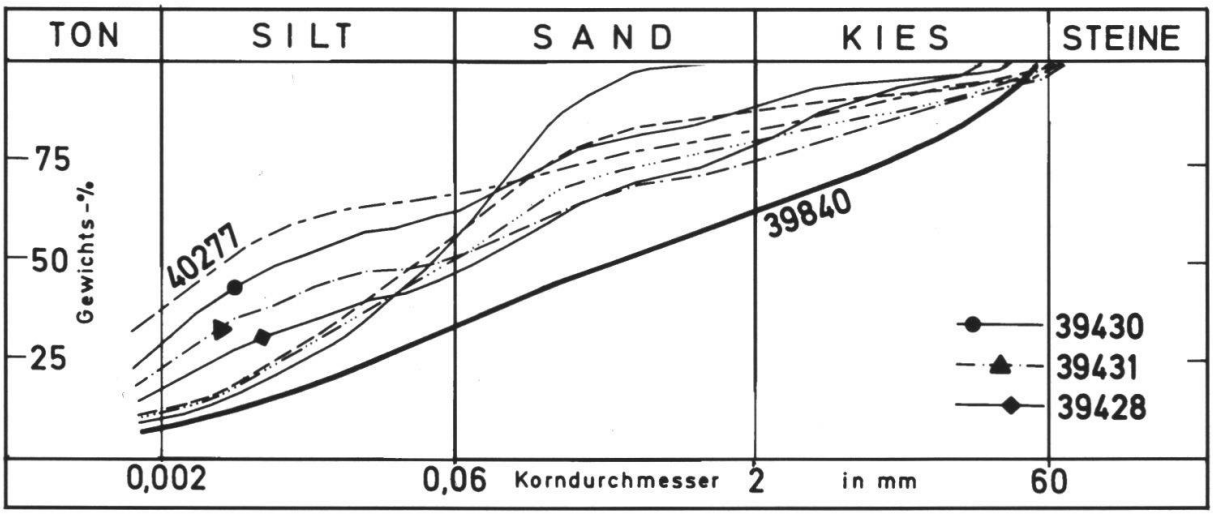

Fig. 7: Charakteristische Kornsummenkurven von Gletscherseemoränen im Vergleich zu Probe 39840 aus der basalen Scherzone vom Findelengletscher; Proben 39430, 431 und 428: Dach einer glazigenen Schlammstrom-, bzw. Beckensedimentsequenz (Combe d'Ain, Französischer Jura). Übrige Proben: Sammelproben aus dem Mittelland. Man beachte höheren Feinanteilgehalt der Gletschersee- gegenüber der Grundmoräne (39840), aus Schlüchter 1989.

Zur Unterscheidung von Grund- und Gletscherseemoräne: hier muss ein Punkt erwähnt werden, der genetisch wichtig ist. Grundmoränenbildung ist nur möglich, wenn die basale Sedimentanreicherung bei optimalem Wassergehalt möglich ist und sich kein Porenwasser(über)druck aufbauen kann. Sobald das geschehen würde, müsste ja der Gletscher aufschwimmen. Das überflüssige Schmelzwasser muss also bei der Grundmoränenbildung dranieren können. Und mit dieser Drainage werden auch die Feinstanteile des entstehenden Sedimentes als Gletschermilch abgeführt. Dieser Abtransport der Feinstfraktion geschieht bei der Bildung der Gletscherseemoräne nicht, da dort die Gesamtheit der ausschmelzenden Partikel unmittelbar gefangen wird, es also im Vergleich zur Grundmoräne zu einer relativen Anreicherung der Ton- und feinen Siltfraktionen kommt (Fig. 7).

Moränentyp (4), die glazigenen Schlammströme sind eine ausgesprochene Übergangsfazies vom glazigenen zum fluvioglazialen Schmelzwassermilieu. Es gibt denn auch nomenklatorsiche Vorschläge, wie dieser Übergang genetisch quantifiziert werden könnte. Gripp hat (1981) vorgeschlagen, von «grundmoränenähnlichem Glacifluvial», bzw. «tilloidem Glacifluvial» zu sprechen. Solange noch eindeutig unsortierte, diamiktische Lagen vorhanden sind und wenn die charakteristischen Fliessstrukturen oder die Schuttfächerschichtung eines Eisrandschwemmkegels nachweisbar sind, ziehe ich persönlich den Begriff des glazigenen Schlammstromes vor. Auch deshalb weil damit die Präsenz des Gletschers unterstrichen wird. Morphologisch ist die glazigene Schlammstromfazies vor allem als Eisrandschwemmkegel, bzw. Ufermoränen, ausgebildet (u.a. Schlüchter 1980, 1989).

6. Ausblick

Die hier skizzierten nomenklatorischen Ansätze sind ein Versuch, unter Beibehaltung der deutschen Sprache eine einfache Klassifikation der Gletschersedimente

durchzuführen. In Folgeartikeln sollen nun die vier Grundtypen weiter charakterisiert werden und vor allem auch die Rolle des Eisrandes bei der Sedimentbildung gezeigt werden. Zudem stehen Arbeiten kurz vor dem Abschluss, welche die mikroskopische Charakterisierung der Grundmoränenmatrix, die geochemische Analyse glazigener Zemente und das Erfassen der Scher-, bzw. Deformationseigenschaften von Grund- und Gletscherseemoränen zum Ziel haben (u.a. Müller, eingereicht).

Literaturverzeichnis

ALLEY, R.B. 1991: Deforming-bed origin for southern Laurentide till sheets? J. of Glaciology, Vol. 37, No. 125: 67-76.

BECK, P. 1933: über das schweizerische und europäische Pliozän und Pleistozän. Eclogae geol. Helv., 26/2: 335-437.

BÖHM VON BÖHMERSHEIM, A. 1901: Geschichte der Moränenkunde. Abh. d. K.K. Geogr. Ges. in Wien, III. Bd., No. 4, Lechner (Wien), 334 S.

BOULTON, G.S. 1968: Flow tills and related deposits on some Vestspitsbergen glaciers. J. of Glaciology, Vol. 7: 391-412.

BOULTON, G.S. 1996: Theory of glacial erosion, transport and deposition as a consequence of subglacial sediment deformation. J. of Glaciology, Vol. 12, No. 140: 43-62.

BOULTON, G.S. and PAUL M.A. 1976: The influence of genetic processes on some geotechnical properties of glacial tills. Quart. J. Engineer. Geol., 9: 159-194.

CLARK, P.U., LICCIARDI, J.M., MACAYEL, D.R. and JENSON J.W. 1996: Numerical reconstruction of a soft-bedded Laurentide Ice Sheet during the last glacial maximum. Geology, 24/8: 679-682.

DREIMANIS, A. 1979: The problems of waterlain tills. In: SCHLÜCHTER, CH. (Hrsg.): Moraines and Varves, S. 167-177, Rotterdam (Balkema).

DREIMANIS, A. and LUNDQVIST, J. 1984: What should be called a till? - In: KÖNIGSSON, L.K. (Hrsg.): Ten years of Nordic till research. Striae 20: 5-10.

EYLES, N. (Hrsg.) 1983: Glacial Geology. Pergamon (Oxford).

EYLES, N. 1987: Late Pleistocene debris flow deposits in large glacial lakes in British Columbia and Alaska. Sedimentary Geology, 53: 33-71

FLINT, R.F. 1971: Glacial and Quaternary Geology. Wiley (New York), 892 S.

GOLDTHWAIT, R.P. and MATSCH, C.L. (Hrsg.) 1989: Genetic classification of glacigenic deposits. Rotterdam (Balkema), 294 S.

GRIPP, K. 1981: Nicht «flow till», sondern «tilloides Glacifluvial» - flow till is not glacigen but glaciofluvial. Eiszeitalter u. Gegenwart, 31: 211.

IVERSON, N.R., HANSON, B., HOOKE, R. LEB. and JANSSON, P. 1995: Flow mechanism of glaciers on soft bed. Science, 267: 80-81.

JÄCKLI, H. 1962: Moränen als Baugrund und Baustoff. Strasse u. Verkehr, 9/1962: 1-5, Solothurn (Vogt-Schild AG).

KELLER, B. 1996: Lithofazies-Codes für die Klassifikation von Locker-gesteinen. Mitt. Schweiz. Ges. Boden- u. Felsmechanik, 132: 5-12.

MENZIES, J. (Hrsg.) 1995: Modern glacial environments. Processes, dynamics and sediments. Butterworth/Heinemann (Oxford), 621 S.

MENZIES, J. (Hrsg.) 1996: Past glacial environments. Sediments, Forms and Techniques. Butterworth/Heinemann (Oxford), 598 S.

MÜLLER, B.U. (eingereicht): Scher- und Restscherfestigkeitsversuche an Grundmoränenproben. Quaternary Science Reviews.

PIOTROWSKI, J.A. 1992: Was ist ein Till? Die Geowissenschaften, 10/4: 100-108.

RICHTER, E. 1900: Die Gletscherconferenz im August 1899. Peterm. Geogr. Mitt., XXVII/4: 77-81, Gotha.

SCHLÜCHTER, CH. 1980: Die fazielle Gliederung der Sedimente eines Ufermoränenkomplexes. Form und Inhalt. Verh. naturwiss. Ver. Hamburg, (NF) 23: 101-117.

SCHLÜCHTER, CH. 1989: Eiszeitliche Lockergesteine - Geologie, Genese, Eigenschaften. Ein Beitrag zu den Beziehungen zwischen fundamentaler und angewandter Eiszeitgeologie. Habilitationsschrift, ETH-Zürich, 162 S. (Manuskript).

SHAW, J. 1987: Glacial sedimentary processes and environmental reconstruction based on lithofacies. Sedimentology, 34:103-116.

WERTHMÜLLER, S. 1989: Zur Quartärgeologie des vorderen Val d`Hérens (Euseigne - Vex). Unveröff. Lizentiatsarbeit, Universität Bern.