

Die sedimentologische Ableitung der Eisrandsedimente von einer aktiven Grundmoräne am Beispiel des Roseggletschers (Graubünden, Schweiz)

Von Bernd Kilger *

Zusammenfassung: Die Entstehung der Grundmoräne und die verschiedenen Möglichkeiten ihrer Zerlegung in Teilsedimente durch Umlagerung werden am Roseggletscher (Graubünden, Schweiz) verfolgt. Die Gletscherzunge und ihr Vorfeld bilden wegen sehr flacher topographischer Verhältnisse am Boden des Rosegtals aus sedimentologischer Sicht ein weitgehend geschlossenes System. Fast alle vom Gletscher produzierten Sedimente bleiben in seiner unmittelbaren Nähe. Für die Korngrößenzusammensetzung einer in Entstehung begriffenen Grundmoräne wird die mathematische Zufallsverteilung vorausgesetzt, die bei ihrer Aufteilung in die verschiedenen Typen glazialer Sedimente bezogen auf das Gesamt-System erhalten bleiben muß. Die Betrachtungen führen zu einem dreistufigen Umlagerungsmodell glazialer Sedimente (im Gletscher, am Eisrand und außerhalb des Gletschers), das auf Eisrandlandschaften von hoch- und spätglazialen Vergletscherungen übertragen werden kann.

Summary: This paper deals with the forefield of the Roseg Glacier (Grisons, Switzerland). The genesis of the basal till and its decomposition into certain partial sediments by means of transport and re-depositing have been observed here. Regarding the sedimental composition, the glacier itself and its forefield form an almost closed system. This is mainly caused by an extremely flat topography at the bottom of the Roseg Valley. Almost all the sediments produced by the glacier stay in close proximity to it. The grain size composition of the basal till at the moment of its genesis is assumed to follow mathematical probability. While dividing this into different types of glacial sediment, mathematical probability for the entire unit thus has to be maintained. A study of the sediments allows the construction of a model of re-deposition showing three stages: within the ice, on its margin and outside the glacier. This model can be transferred to the conditions of landscapes in the vicinity of pleistocene glaciers.

EINFÜHRUNG

Eine sedimentologische Ansprache von Eisrandsedimenten ist angesichts der wichtigen Rolle, die quartäre Ablagerungen in Deutschland spielen, unerlässlich. Darauf hat GERMAN (1970) in einer Zusammenfassung seiner Arbeiten im württembergischen Allgäu hingewiesen. Eine über Jahrzehnte andauernde, ausschließlich geomorphologische Betrachtungsweise hat z. B. im nördlichen Alpenvorland zu gründlichen Fehldeutungen geführt, da die Landoberflächen der „kuppigen Grundmoränenlandschaft“ und die der „Jugendmoränen“ in diesem Raum zum größten Teil aus Schmelzwassersedimenten und nicht aus Moränenmaterial bestehen. Die Frage nach der Entstehungsweise von Sedimenten durch Umlagerungsprozesse im Innern von Gletschern und an ihren Rändern war in weiten Teilen der Quartärforschung zu wenig beachtet worden. Die Annahme, aus den Rändern quartärer Vergletscherungen sei vorwiegend Moränenmaterial ausgeschmolzen, rührte von einem falschen Verständnis dieser Vorgänge her.

Die Genese von Eisrandsedimenten kann am Roseggletscher (Graubünden, Schweiz) gut studiert werden, weil die von ihm produzierten Schuttmassen in seiner unmittelbaren Nähe abgelagert werden. Ihr Abtransport wird durch einen zweiten Gletscher, den Tschervagletscher, verhindert, dessen Randmoräne das Vorfeld des Roseggletschers vom übrigen Rosegtal abriegelt. Nur sehr feine im Wasser suspendierte Sediment-Anteile

* Dr. Bernd Kilger, Im Kleeacker 13, 7400 Tübingen 1.

verlassen die Nähe des Roseggletschers (Gletschermilch). Der Gletscher und sein Vorfeld bilden deshalb aus sedimentologischer Sicht ein weitgehend geschlossenes System. Die so entstandenen flachen, für das Hochgebirge völlig untypischen topographischen Verhältnisse auf der Talsohle ermöglichen es, die Bildungsvorgänge der Eisrandsedimente am Roseggletscher auf hoch- und spätglaziale Vorlandvergletscherungen zu übertragen. Die Entwicklung des Roseggletschers ist von der Schweizer Gletscherkommission (1880 bis 1978 jährlich dokumentiert worden. Die Entstehung des gesamten Gletschervorfeldes ist genau bekannt und kann mit aktuogeologischen Beobachtungen am Eisrand (KILGER 1979) in Verbindung gebracht werden. Die Ansprache der einzelnen Sedimenttypen ist daher sehr erleichtert.

1. DIE KORNGRÖSSENZUSAMMENSETZUNG VON EISRANDEDIMENTEN UND VIER KENNZEICHNENDE SEDIMENT-PARAMETER

Neben einigen anderen Methoden der Sedimentanalyse bietet sich die Ermittlung der Korngrößenzusammensetzung als wichtige Informationsquelle an, da sie in direktem Zusammenhang mit der Genese der Sedimente steht (vgl. CASAGRANDE 1934, KOSTER 1964, MULLER 1964). Zur Unterteilung der Korngrößen hat sich die „ ϕ -Skala“ sehr bewährt, bei der sich die Korndurchmesser jeweils um den Faktor 2 unterscheiden. Für die Umrechnung in metrische Werte gilt die Formel:

$$\phi = \log_2 \frac{1}{x} = 1,4427 \ln \frac{1}{x}$$

wobei x den Korndurchmesser in Millimeter ausdrückt. Abb. 1 zeigt die Korngrößenzusammensetzung einer typischen Grundmoräne nach SCHLÜCHTER (1976) und eines Seesedimentes nach GERMAN et al. (1967) in Darstellung einer kumulativen Kornsummenkurve mit ϕ -Einteilung.

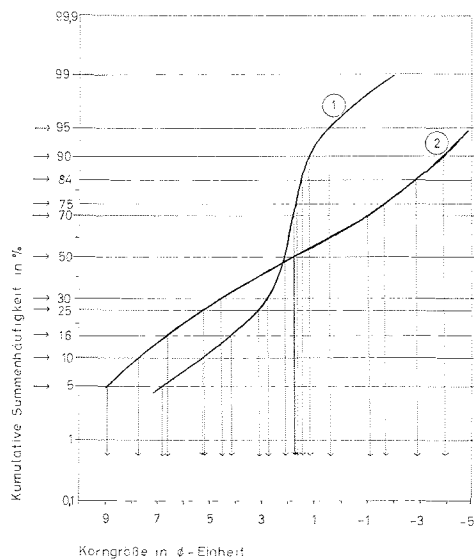


Abb. 1: Kornsummenkurven von typischen Sohlschichten (1) nach GERMAN et al. (1967) und einer Grundmoräne (2) nach SCHLÜCHTER (1976). Pfeile: Graphisches Auffinden der zur Berechnung der Sediment-Parameter erforderlichen ϕ -Werte.

Fig. 1: Typical cumulative curve of melt water sediment (1) according to GERMAN et al. (1967) and of basal till (2) according to SCHLÜCHTER (1976).

Die Typisierung der Eisrandsedimente wird durch vier kennzeichnende Sediment-Parameter sehr erleichtert, die aus der kumulativen Kornsummenkurve durch ein graphisch-rechnerisches Verfahren ermittelt werden können. Es sind dies:

a) Die mittlere Korngröße (Mean size)

$$= \frac{\varphi 10\% + \varphi 30\% + \varphi 50\% + \varphi 70\% + \varphi 90\%}{5} \text{ (McCAMMON 1962)}$$

Dieser Wert drückt die mittlere Korngröße als φ -Wert aus.

b) Der Sortierungsgrad (Sorting or standard deviation)

$$= \frac{\varphi 85\% + \varphi 95\% - \varphi 15\% - \varphi 5\%}{5,4} \text{ (FOLK \& WARD 1957)}$$

Leser Wert ist positiv (negativ), wenn auf der kumulativen Kornsummenkurve die groben Korngrößen links (rechts) aufgetragen sind. Je weiter sich dieser Wert von Null entfernt, desto schlechter ist die entsprechende Sedimentprobe sortiert.

c) Die Schiefe (Skewness)

$$= \frac{\varphi 16\% - \varphi 84\% - 2(\varphi 50\%)}{\varphi 84\% - \varphi 16\%} \text{ (INMAN 1952)}$$

Der Wert Null zeigt eine symmetrische Korngrößenverteilung an. Ein positives (negatives) Ergebnis deutet bei obengenannter Darstellungsweise an, daß gegenüber der symmetrischen Verteilung zu viel feine (grobe) Materialanteile vorhanden sind.

d) Die Kurtosis (Kurtosis)

$$= \frac{\varphi 95\% - \varphi 5\%}{2,44(\varphi 75\% - \varphi 25\%)} \text{ (FOLK \& WARD 1957)}$$

Dieser Wert ist immer positiv. Der Wert 1 zeigt eine unimodale Kornverteilung an, d. h. dieses Sediment verdankt seine Entstehung einem einzigen Vorgang. Umlagerungen von Sedimenten durch andere Vorgänge werden durch das Abweichen der Kurtosis vom Wert 1 deutlich. Werte, die größer (kleiner) als 1 sind, zeigen Sediment-Teilungen (-Mischungen) an. Durch Mischung von Teilsedimenten können Sedimente entstehen, die der Unimodalität sehr nahe kommen.

Nach diesen Kriterien der Korngrößenanalyse wurden in den Jahren 1976 bis 1978 im Rahmen einer Dissertation (KILGER 1979) 277 Sedimentproben aus dem Vorfeld des Roseggletschers untersucht. Dabei wurden Korngrößen von $\varphi - 4$ bis $\varphi + 9$ (16 mm bis 0,002 mm) berücksichtigt. Für eine ganze Reihe von Sedimenttypen konnten die Sediment-eigenschaften und die Durchschnittswerte der kennzeichnenden Sediment-Parameter festgelegt werden. Sie sind in Tab. 1 im Vergleich zu den von BRAUN et al. (1976) angegebenen Werten zusammengestellt.

	Mittlere Korngr. (φ -Einh.)	Sortierungs- grad	Schiefe	Kurtosis
Grundmoräne (inaktiv)	+ 3,6	2,4	- 0,13	1,10
Randmoräne	- 1,4	2,3	+ 1,13	0,97
Obermoräne	- 2,2	2,4	- 0,24	0,98
Sander	- 2,1	2,4	- 0,20	0,92
Eisrandschw.-kegel	- 0,1	1,8	- 0,08	0,93
Grundmoräne (aktiv) ca.	+ 4	3	0	1
Innenmoräne	+ 1,48	2,24	+ 0,025	1,00
Kamessedimente	- 1,09	2,28	- 0,003	0,85
Subaer.-subgl. Kompl.	+ 0,25	1,60	- 0,044	0,88
Delta (aktiv)	+ 2,19	1,44	- 0,056	1,33
Delta (inaktiv)	- 0,50	1,88	- 0,063	0,93
Seesediment	+ 3,35	1,48	+ 0,016	1,14
Strandsediment	+ 2,42	0,88	- 0,072	1,25

Tab. 1: Sediment-Parameter glazialer und glazifluvialer Sedimente. Zahlenwerte nach BRAUN et al. (1976) im oberen Teil der Tabelle, von Eisrandsedimenten des Roseggletschers im unteren Teil der Tabelle.

Tab. 1: Sediment-parameters of glacial and glaciofluvial sediments: mean size φ -units, sorting, skewness and kurtosis. Numerical values according to BRAUN et al. (1976) are found in the upper part of the table. Values of ice-margin-sediments (Roseg Glacier) are given in the lower part of the table.

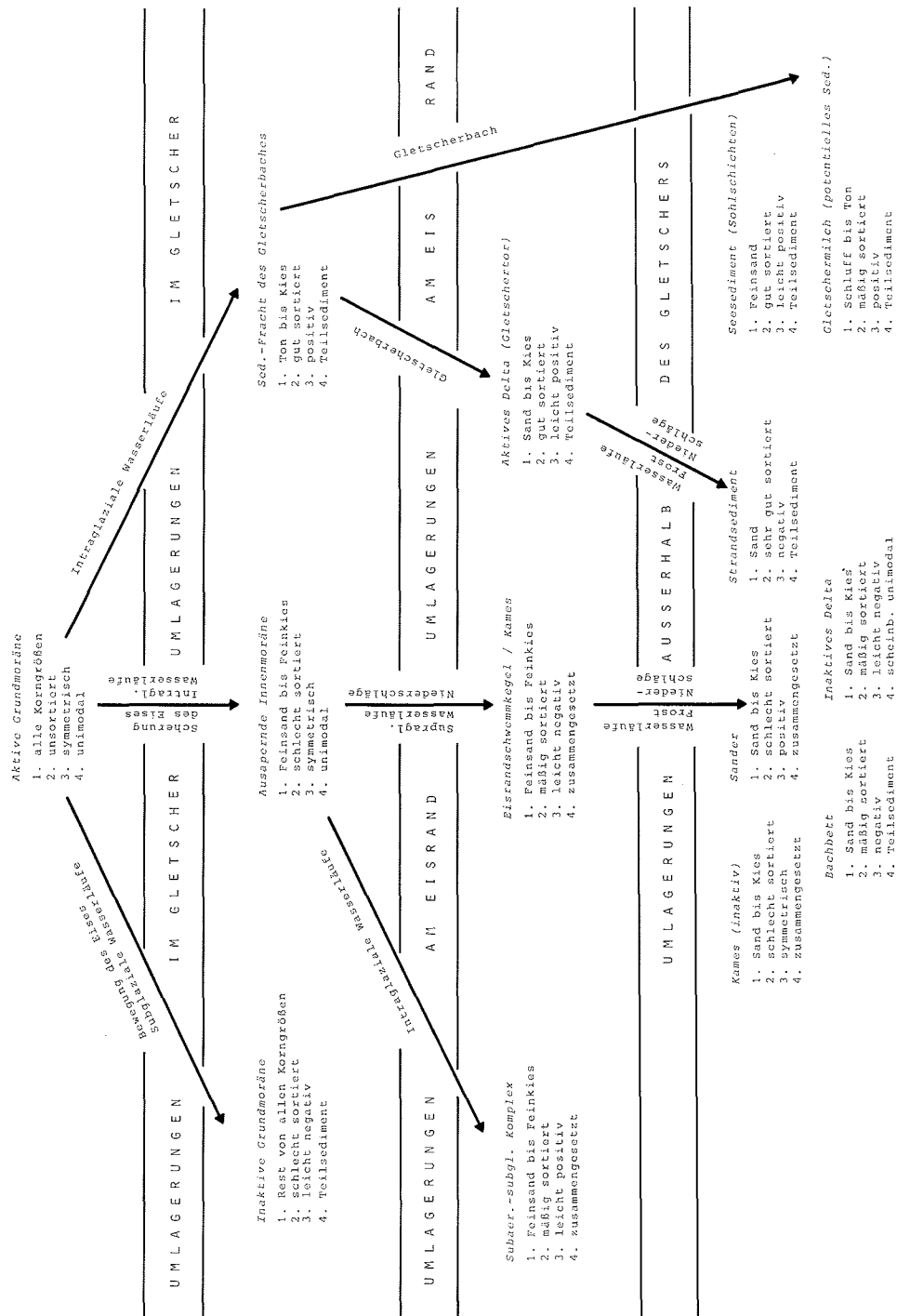


Abb. 2: Ableitung der Sedimente im Vorfeld des Rosegletschers von einer aktiven Grundmoräne durch eine dreistufige Umlagerung und durch Transport. 1—4: Mittlere Korngröße, Sortierungsgrad, Schiefe und Kurtosis.

Fig. 2: Genealogical derivation of the sediments from active (= idealized) basal till in the vicinity of the Roseg Glacier by means of transport and re-deposition in three stages. 1—4: mean grain size, standard deviation, skewness, curtness.

2. DIE ENTSTEHUNG GLAZIALER SEDIMENTE UND IHRE UMLAGERUNG
IN DREI STUFEN

Fast alle Sedimente am Eisrand des Roseggletschers können von einer unter dem Gletscher entstehenden, aktiven Grundmoräne (s. u.) abgeleitet werden. Nur ein ganz kleiner Teil stammt von Obermoränenmaterial oder dem Anflug atmosphärischen Staubes ab, er sei im folgenden ausgeklammert. Die weitere Umlagerung der Sedimente nach ihrer

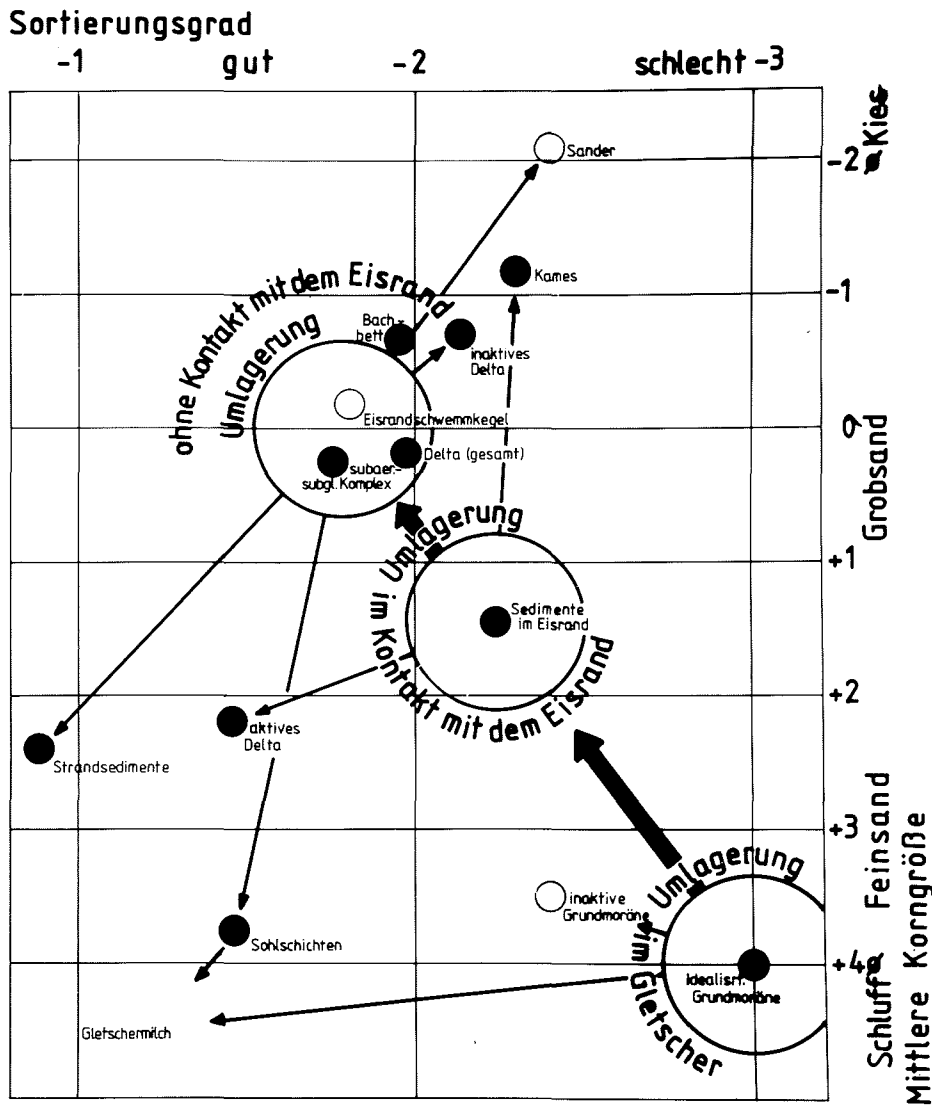


Abb. 3: Graphische Gegenüberstellung der Zahlenwerte der mittleren Korngröße gegen die des Sortierungsgrades von Glazialen Sedimenten und ihre Ableitung von einer aktiven (= idealisierten) Grundmoräne. Dunkle Kreise: Angaben nach BRAUN et al. (1976), helle Kreise: Durchschnittswerte der Sedimentproben vom Roseggletscher nach KILGER (1979).

Fig. 3: The values of the mean grain sizes plotted against those of the standard deviation of certain glacial sediments. The derivation of these sediments from active (= idealized) basal till is shown. Black dots: according to BRAUN et al. (1976); light dots: mean values of sediment samples from the Roseg Glacier according to KILGER (1979).

Entstehung an der Unterseite des Gletschers kann sich nur in den drei Räumen abspielen: innerhalb des Gletschers und an seiner Unterseite, am Eisrand und endlich außerhalb des Gletschers, ohne Kontakt mit dem Eisrand.

Abb. 2 zeigt dies in stammbaum-artiger Zusammenfassung. Die Veränderung der vier kennzeichnenden Sediment-Parameter, die mit den Umlagerungsprozessen einhergeht, ist in Abb. 2 beim jeweiligen Sediment-Typ aufgeführt. Die Umlagerung der Sedimente in diesen drei Räumen darf freilich nicht als einmaliger und in scharfe Abschnitte unterteilter Vorgang betrachtet werden, sondern die Umlagerungen können sich beliebig oft wiederholen oder ineinander übergreifen.

Abb. 3 zeigt die graphische Gegenüberstellung zweier Sediment-Parameter am Beispiel mittlere Korngröße/Sortierungsgrad. Die Veränderungen der Sediment-Eigenschaften durch Umlagerung und die verwandtschaftlichen Beziehungen zwischen den einzelnen Sediment-Typen sind deutlich zu erkennen. Es ist auffällig, daß die Umlagerungsprozesse, die im Innern des Gletschers begonnen haben, sich auch außerhalb des Gletschers in derselben Richtung fortsetzen. In beiden Räumen sind ähnliche Ursachen für die Aufarbeitung der Sedimente verantwortlich. Es sind dies die Aktivitäten der Schmelzwasserläufe.

2. 1. Bildung von Gletschersediment in Form einer aktiven Grundmoräne

Als Ausgangspunkt für die Bildung glazialer Sedimente muß eine aktive Grundmoräne angenommen werden, die durch die schürfende Tätigkeit des Gletschers aus dem Felsuntergrund entsteht, nicht jedoch eine inaktive Grundmoräne im Sinne von BRAUN et al. (1976). Die Korngrößenzusammensetzung der aktiven Grundmoräne folgt der mathematischen Zufallsverteilung, da fließendes Eis nicht die Fähigkeit besitzt, Partikel nach ihrer Größe, ihrer Form oder ihrem spezifischen Gewicht nach zu ordnen (vgl. v. KLEBELSBERG 1948, BRINKMANN 1964). Diese mathematische Zufallsverteilung kann erst verlorengehen, wenn andere Einflüsse als fließendes Eis auf die juvenile Grundmoräne einwirken, z. B. subglaziale Schmelzwässer.

Außer der mittleren Korngröße liegen durch diese mathematische Zufallsverteilung bereits die drei anderen Sediment-Parameter fest: Der Sortierungsgrad müßte im strengen Sinne „unsortiert“ sein, er sei hier aber der Einfachheit halber mit ca. 3 angenommen, da er damit bereits wesentlich schlechter ist, als der von allen übrigen untersuchten Sedimenten. Die Schiefe- und Kurtosis-Werte liegen bei 0 bzw. 1, da die mathematische Zufallsverteilung eine Symmetrie der Kerngrößen bzw. Unimodalität voraussetzt.

Die mittlere Korngröße der aktiven Grundmoräne muß kleiner sein als die der inaktiven Grundmoräne im Sinne von BRAUN et al. (1976), da letzterer durch subglaziale Schmelzwässer Feinanteile entzogen worden sind. Sie sei hier bei $\psi + 4$ (= 0,062 mm) angesetzt, könnte natürlich noch feiner sein, was aber unwichtig ist, solange keine Massenbilanzen aufgestellt werden sollen.

2. 2. Die weitere Umlagerung glazialer Sedimente

Die Bedingungen, unter denen sich die Sedimente im Eis und am Rand des Rosegletschers umlagern, sind als ein geschlossenes System zu verstehen, da mit Ausnahme der Gletschermilch alle vom Gletscher produzierten Sedimente in seiner unmittelbaren Nähe verbleiben. Die mathematische Zufallsverteilung der Korngrößen muß daher trotz Umlagerung der Sedimente, insgesamt betrachtet, erhalten bleiben, da keine Sediment-

anteile aus dem Gesamtsystem verschwinden können. Der Entstehung eines groben Teilsedimentes muß die gleichzeitige Bildung eines feinen Teilsedimentes gegenüberstehen. Der Bildung eines besser sortierten Teilsedimentes muß diejenige eines ebenfalls besser sortierten gegenüberstehen, da die Sortierung von Sedimenten mit der räumlichen Teilung ihrer Korngrößen identisch ist. Ebenso verlangt die Bildung eines Sedimentes mit positiver Schiefe die gleichzeitige Entstehung eines solchen mit negativer Schiefe. Die Unimodalität (Kurtosis) geht bei Sedimentteilungen verloren.

2. 2. 1. Die Umlagerung der Sedimente im Innern des Gletschers und an seiner Unterseite
Die für die Umlagerung der Sedimente im Innern des Gletschers und an seiner Unterseite verantwortlichen Vorgänge sind z. B. bei JOPLING (1964), MATHEWS (1964) und ØSTREM (1975) beschrieben worden. Die postulierte aktive Grundmoräne wird durch diese Vorgänge in drei Teilsedimente zerlegt. Es sind dies die inaktive Grundmoräne (im Sinne von BRAUN et al. 1976), die Innenmoräne, die später aus der Eisfront ausapert, und die Sedimentfracht der intra- und subglazialen Schmelzwasserläufe (zum großen Teil Gletschermilch).

Alle Sedimentanteile der aktiven Grundmoräne, die nicht in das Innere des Gletschers aufgenommen werden, bleiben an seiner Unterseite zurück und bilden nach dem Abschmelzen die inaktive Grundmoräne. Eine solche inaktive Grundmoräne konnte im



Abb. 4: Aus dem Eisrand des Roseggletschers ausschmelzende Innenmoräne (Aufnahme B. KILGER, 10. August 1978).

Fig. 4: Intraglacial till melting on the margin of the Roseg Glacier (Photo: B. KILGER, 10. August 1978).

Vorfeld des Roseggletschers jedoch nicht gefunden werden. Ihre Erhaltung ist in einer flachen Eisrandlandschaft, in der die Schmelzwässer bei der großflächigen Umarbeitung der Sedimente eine solch wichtige Rolle spielen, auch kaum vorstellbar. Hammerschlagseismische Untersuchungen (KILGER 1979) haben jedoch gezeigt, daß eine ca. 8 m mächtige Grundmoränenschicht über dem anstehenden Fels in ca. 100 m Tiefe unter dem

Gletschervorfeld zu erwarten ist. Die Sediment-Eigenschaften der inaktiven Grundmoräne sind aus Tab. 1 zu entnehmen.

Die Anteile der aktiven Grundmoräne, die nicht am Grund des Gletschers zurückbleiben, gelangen entweder als Innenmoräne (englacial debris, englacial till) in seinen Eiskörper und apert später aus dem Eisrand aus oder sie werden von intraglazialen Schmelzwasserläufen erfaßt und aus dem Gletscher entfernt. Die Existenz von Sedimenten im Eis, oft weit von der Unterlage des Gletschers entfernt, ist bekannt und von ANDREWS (1971), FORTSCH (1963), FORTSCH & VIDAL (1968a, 1968b), und KOHNEN (1970) beschrieben worden. Die Entstehung solcher Sedimentschichten im Eis ist von BOULTON (1970, 1971) auf Spitzbergen beobachtet worden. WEERTMANN (1961, 1968) hat solche Erscheinungen auch für kaltes Gletschereis beschrieben.

Im Eis des Roseggletschers konnten mehrere Sedimentlagen beobachtet werden, die eine Dicke von 10 bis 100 cm hatten und in Meterabständen übereinanderlagen. Abb. 4 zeigt, daß sie aus einer sehr feinen Wechsellagerung zwischen Sediment und Eis bestehen. Das Eis hat dabei den größeren Volumenanteil. Auch Verbiegungen und Schrägschichtungen sind zu erkennen. Die einzelnen Sedimentlamellen sind kaum einen Millimeter dick. Die mittleren Korngrößen dieser Innenmoränen-Schichten sind wesentlich größer als die von Grundmoränenmaterial (vgl. Tab. 1). Der Sortierungsgrad hat sich durch die Umlagerungen im Gletscher zwar verbessert, ist aber immer noch mäßig. Die Schiefe ist leicht positiv und die Kurtosis zeigt ein Sediment an, das der Unimodalität nahekommt. Trotz der vielfältigen Vorgänge im Innern des Gletschers (vgl. BOULTON 1970), zeigt sich die Innenmoräne doch als ein noch sehr ursprünglicher, der Grundmoräne nahekommender Sediment-Typ.

Die intraglazialen Schmelzwasserläufe verlassen den Gletscher hauptsächlich durch das Gletschertor. Ihre Sedimentfracht wird außerhalb des Gletschers räumlich aufgeteilt.

2. 2. 2. Die Umlagerung der Sedimente im Kontakt mit dem Eisrand

Die verschiedenen Ursachen für die Umlagerung von Sedimenten am Eisrand sind von GERMAN, MADER & KILGER (1978) aufgezählt worden. Am Roseggletscher gehen diese von zwei Punkten aus: von der ausgeschmolzenen Innenmoräne und von der Sedimentfracht des Gletscherbaches.

Nach ihrer Ausschmelzung aus dem Eisrand wird die Innenmoräne in folgende Teilsedimente zerlegt:

- a) Eisrandschwemmkegel und Kames, auf der sichtbaren Oberfläche des Eises und im Kontakt mit supraglazialen Schmelzwässern und mit Luft
- b) Subaerisch-subglazialer Komplex, in der Tiefe, ohne Kontakt mit der Luft

Nach kurzem Transport durch supraglaziales Schmelzwasser werden am Fuß des sichtbaren Gletscherrandes aus ausgeschmolzenem Innenmoränenmaterial die Eisrandschwemmkegel aufgebaut. Meist füllen sie die unteren Partien der Eisfront auf, soweit diese nicht im Einflußbereich des Gletscherbaches liegt. Die Sediment-Eigenschaften der Eisrandschwemmkegel sind von BRAUN (1974) beschrieben worden, der ihre sedimentologische Ableitung allerdings ausschließlich von der Obermoräne her vorgenommen hat. Die Beschreibung der Sediment-Parameter kann daher an dieser Stelle unterbleiben. Kames-Ablagerungen entstehen unmittelbar im Zusammenhang mit Eisrandschwemmkegeln, indem diese zahlreich nebeneinander gebildet werden oder von Wasserläufen am Eisrand entlang geführt werden.

Die Gletscherzunge des Roseggletschers wird zum größten Teil von ihren eigenen Sedimenten überdeckt. Nur ein kleiner Teil der Innenmoräne gelangt zur Ausschmelzung an

die sichtbare Oberfläche des Eises. Die Hauptmasse dieser Sedimente schmilzt in der Tiefe aus dem Gletschereis aus, ohne je mit der Luft in Berührung gekommen zu sein und bildet unterirdische Sedimentlagen, die sich zwischen der inaktiven Grundmoräne und den oberflächennahen Sedimentlagen des Gletschervorfeldes befinden. SHAW et al. (1979) gibt für die Sedimentlagen den Namen „subaerial subglacial complex“ an, die er aufgrund seiner Beobachtungen in Kanada direkt von den unterirdisch aus dem Eisrand aus-schmelzenden Sedimenten ableitet.

Im Vorfeld des Roseggletschers tritt der subaerisch-subglaziale Komplex unter den freigelegten Flächen eines ehemaligen Eisrandsees zutage. Er ist sedimentologisch kaum von den Eisrandschwemmkegeln zu unterscheiden (vgl. Tab. 1), was die enge sedimentologische Verwandtschaft, die SHAW et al. (1979) voraussetzt, bestätigt.

Die groben Anteile der vom Gletscherbach zutage geförderten Sedimentfracht werden in unmittelbarer Nähe des Gletschers abgelagert, es sind dies:

a) Delta- und Übergußschichten

Beim Roseggletscher werden diese Sedimente sogar auf den vordersten Partien des Eises aufgebaut. Bei Anwesenheit eines Eisrandsees, wie dies beim Roseggletscher der Fall ist, haben auch feinere Sedimentanteile die Gelegenheit, sich abzusetzen. Sie bilden dann die

b) Seesedimente (Sohlschichten).

Die feinsten Partikel verlassen das Gletschervorfeld als Suspension im Schmelzwasser, als sogenannte

c) Gletschertrübe (Gletschermilch).

Den Roseggletscher haben in den letzten 40 Jahren nach grober Schätzung ca. 10^7 t pulverisiertes Gestein verlassen. Verglichen mit der gesamten Verfüllung des Gletschervorfeldes von ca. 6×10^7 m³ Sedimenten ist dies ein stattlicher Anteil. Die Mitberücksichtigung von dieser gewaltigen Menge Gletschermilch bringt das System Roseg aus sedimentologischer Sicht zum Abschluß.

Besonders bei Delta-Ablagerungen haben die Beobachtungen am Eisrand des Roseggletschers gezeigt, wie wichtig eine sedimentologische Betrachtungsweise gegenüber einer geomorphologischen auch bei ganz jungen Sedimenten ist; ein 1976 am Eisrand aufgebautes Delta war durch die Bewegung des darunterliegenden Eises schon 1978 kaum mehr als ein solches zu erkennen. Eine gleichmäßige Aufsedimentierung wie auf festem Land (vgl. FÜRBRINGER 1976) war nicht möglich, seewärts gerichtete Schrägschichtungen wurden zerstört und Neigungen, die später auf ehemalige Fließrichtungen hindeuten könnten, wurden verändert. Die Ermittlung der Sediment-Parameter ist für die Identifizierung solcher Delta-Schichten ein wichtiger Weg. Dies gilt besonders für die Untersuchung pleistozäner Sedimente.

Die mittleren Korngrößen in den Delta-Ablagerungen vor der Zunge des Roseggletschers schwanken zwischen $\phi +3$ (Feinsand) und $\phi -3$ (Kies). Dieser verhältnismäßig grobe Aufbau verwundert nicht, da die feineren Partikel wegen der Strömung des Gletscherbaches nicht mit abgelagert werden. Der Sortierungsgrad ist mit ca. 1,5 recht gut (vgl. Tab. 1). Er übertrifft damit alle bisher behandelten Sediment-Typen. Wir haben es hier zum ersten Mal mit einem Sediment zu tun, das ausschließlich durch die sortierende Tätigkeit des fließenden Wassers entstanden ist. Die Schiefe ist negativ und zeigt ebenfalls das Fehlen des feinen Sediment-Anteils an. Auch die Kurtosis-Werte liegen weit über 1 und deuten starke Sediment-Teilungen.

Im Vorfeld des Roseggletschers konnten weitere 10 Delta-Einheiten identifiziert werden,

deren Sediment-Eigenschaften durch Umlagerungen ohne Kontakt zum Eisrand (s. u.) verändert worden sind. Vor allem sind die Veränderungen der Kurtosis-Werte hier auffällig (vgl. Tab. 1), die eine sekundäre Vermischung durch Niederschläge und Frost deutlich macht.

Zahlreiche Arbeiten über die Hydrodynamik von Eisrandseen haben gezeigt, daß die mittlere Korngröße von Seesedimenten umgekehrt proportional zur Tiefe und zum Volumen des jeweiligen Eisrandsees sind (vgl. dazu EVENSON, DREIMANIS & NEWSOME 1977, GILBERT 1973, KELTS 1979, MERKT et al. 1971, SCHLÜCHTER & KNECHT 1979, SHAW 1975, STURM 1979). In großen Seen können Teilchen bis hinab zu $\varphi +9$ (Sommervarven von Bändertonen nach ASHLEY 1975 und sogar $\varphi +12$ (Wintervarven) zur Sedimentation gelangen. In kleinen Seen sind die mittleren Korngrößen entsprechend größer (vgl. STOKES 1845).

Im Vorfeld des Roseggletschers sind die Flächen eines alten Eisrandsees, der 1954 ausgebrochen ist, gut zugänglich. Die mittleren Korngrößen liegen hier bei $\varphi +3,8$ (Feinsand), der Sortierungsgrad ist mit 1,5 gut, obwohl er sicherlich durch die Technik der Probenahme und durch postsedimentäre Vermischungen beeinträchtigt worden ist. Dieser gute Sortierungsgrad ist der sicherste sedimentologische Anhaltspunkt, um Seesedimente von einer inaktiven Grundmoräne zu unterscheiden. Beide Sediment-Typen sind durch eine makroskopische Ansprache nicht immer zu trennen, zumal Seesedimente durch direkten Kontakt des Eisrandsees mit der Gletscherstirn grobe Materialanteile aus dem Obermonärenmaterial enthalten können. Beide Sediment-Typen haben oft eine weite horizontale Verbreitung und zeigen eine mehr oder weniger ausgeprägte Schichtung (vgl. ZANDSTRA 1976). Selbst die kumulativen Kornsummenkurven von beiden Sediment-Typen können sehr ähnlich aussehen (vgl. SCHLÜCHTER 1976). Die Sediment-Parameter liegen mit ihren Zahlenwerten bei Nichtbeachtung des Sortierungsgrades sehr nahe beieinander (vgl. Tab. 1). Die Schiefe-Werte der Seesedimente im Vorfeld des Roseggletschers sind mit $+0,016$ fast symmetrisch. Der Charakter eines Teilsedimentes aus der Schmelzwasserfracht wird aus den Kurtosis-Werten von 1,14 deutlich (vgl. Tab. 1).

Die mittlere Korngröße der Gletschertrübe (Gletschermilch) kann aus der Tatsache, daß das Material lange Zeit im Wasser suspendiert bleibt, als sehr fein angenommen werden. Die Schiefe muß stark positiv sein, da die Gletschermilch einer Reihe von Eisrandsedimenten gegenübersteht, die alle eine negative Schiefe besitzen (mit Ausnahme der Innenmoräne). Die chronisch negativen Schiefe-Werte am Eisrand werden von der Gletschermilch zusammen mit den Seesedimenten (s. u.) ausgeglichen. Die Werte der anderen Sediment-Parameter (Sortierung und Kurtosis) müssen aus dem Verständnis der Sedimentumlagerungen innerhalb eines geschlossenen Systems gefolgert werden.

2. 2. 3. Die Umlagerung der Sedimente außerhalb des Gletschers und ohne Kontakt mit dem Eisrand

Die beschriebenen Eisrandsedimente sind auch nach dem Verschwinden des Eisrandes einer weiteren Umgestaltung durch Schmelzwasserläufe, Niederschläge, Wind, Frost und ausschmelzendes Toteis ausgesetzt. Die Veränderung der Sediment-Eigenschaften sind aus Abb. 2 und 3 zu erkennen. Die bereits vorhandenen aktiven Formen gehen dabei in inaktive Formen über. Ihre geomorphologische Ausprägung kann dabei völlig verlorengehen, wie am Beispiel eines Deltas vor dem Roseggletschers gezeigt. Ihre Herkunft ist dann nur noch auf sedimentologischem Wege feststellbar. Dies gilt besonders für quartäre Sedimente. Aus dem umfangreichen Gebiet der Quartärgeologie seien hier nur die sedimentologischen Arbeiten von GERMAN et al. (1965, 1967, 1968, 1978), GRIMM (1978), MADER (1971, 1976) und SCHLÜCHTER (1976) aus dem nördlichen Alpenvorland genannt.

Ein wichtiger Sediment-Typ, der am Roseggletscher ohne Kontakt mit dem Eisrand entsteht, sei hier näher beschrieben, da er in allen flachen Eisrandlandschaften zu erwarten ist. Es sind dies die Strandsedimente.

Neben dem normalen Wellengang wirken sich die Kalbungswellen, die zuweilen von der Stirn des Roseggletschers ausgehen, im Eisrandsee stark aus. Fast überall entlang der Uferlinie ist deshalb eine deutliche Strandplatte ausgebildet, die auf der Höhe des Niedrigwasserstandes liegt.

Die durch die Erosion der Kalbungswellen gebildeten Strandplatten am Ufer des Rosegsees gehen aus Material oberhalb des Seespiegels hervor. Der stetige Wellengang nimmt vom zerstörten Ufer die Sedimentanteile bis zu einer bestimmten Korngröße weg und transportiert sie über die Strandplatte hinweg in den See. Auf der Strandplatte selbst verbleibt ein Restsediment, das nur einen schmalen Sedimentausschnitt des Materials darstellt, welches die Uferböschung gebildet hat (im Untersuchungsgebiet ausschließlich Schmelzwassersedimente). Strandsedimente haben in ihrer Entstehungsweise im Sinne der beschriebenen Entwicklungsreihe der Sedimente mit den räumlich unmittelbar benachbarten Sohlschichten nichts gemein (vgl. Tab. 1).

Die mittleren Korngrößen wechseln in weitem Rahmen und stellen eine Funktion der Exposition des Strandes zur vorherrschenden Windrichtung und zur kalbenden Eiswand dar. Am Rosegsee schwanken sie von $+ 0,36 \phi$ (Grobsand) bis $+ 6,80 \phi$ (Mittelschluff). Die mittlere Korngröße von Strandsedimenten könnte daher bei der Betrachtung von fossilen Strandlinien Informationen über die Größe und Form von ehemaligen Eisrandseen geben (vgl. GERMAN 1963). Der Sortierungsgrad ist sehr gut (Rosegsee: $- 0,88$), er wird durch die Technik der Probenahme nicht beeinträchtigt, wie dies bei Seesedimenten der Fall sein kann, weil meist genügend einheitliches Strandmaterial zur Probenahme vorhanden ist (vgl. BRAUN 1976). Die Schiefe-Werte der Strandsedimente vom Rosegsee sind schwach negativ, was hier mit ihrer Abstammung von Fließwassersedimenten zusammenhängt, die alle wegen der gründlichen Entfernung der feinen Materialanteile negative Schiefe-Werte besitzen. Die Kurtosis zeigt eine Teilung von Sedimenten an, was bei der oben beschriebenen Beobachtung über die Entstehung der Strandplatten am Rosegsee sinnvoll erscheint (Kurtosis $+ 1,25 =$ höchster mittlerer Kurtosis-Wert von allen untersuchten Sedimenttypen).

Das langsame Ausschmelzen von Toteis kann, auch lange Zeit nach dem Verschwinden des Eisrandes und in größerer Entfernung vom Gletscher, beträchtliche Veränderungen der Oberflächenformen und damit der erosiven und sedimentären Bedingungen verursachen. GRENGG (1976) hat gezeigt, daß sich Toteis unter verhältnismäßig wenig mächtigen Lagen von Sedimenten über Jahrhunderte hinweg erhalten kann und heute in Gebieten vorkommt, wo es niemand mehr vermutet. Meist stammen solche Toteismassen vom letzten großen Gletschervorstoß zur Mitte des 19. Jahrhunderts. Auch aus dem nördlichen Alpenvorland sind Umlagerungen von quartären Sedimenten durch Ausschmelzen von Toteis bekannt. GLUCKERT (1973) hat gezeigt, daß große Flächen davon betroffen sein können.

Diese Erscheinungen sind jedoch scharf zu trennen von solchen, die sich mit Vorgängen befassen, die durch Grundeis und Permafrost verursacht werden, die im Untersuchungsgebiet nicht vorkommen (vgl. BLACK 1973, BUDEL 1962). Sogar vom Mars sind lokale Einbrüche von kleineren Gebieten durch das Abschmelzen von Eis im Untergrund bei ca. 40° geographischer Breite beschrieben worden (vgl. SHARP 1974).

Literatur

- Andrews, J. T. (1971): Englacial debris in glaciers. — *J. Glaciol.* 10: 410.
- Ashley, G. M. (1975): Rhythmic sedimentation in glacial lake Hitchcock, Massachusetts / Connecticut. *Glaciofluvial and Glaciolacustrine Sedimentation*, Soc. Econ. Palaeont. Mineral., Spec. Publ. 23: 304—320.
- Black, R. F. (1973): Cryomorphic processes and microrelief features, Victoria Land, Antarctica. — In: *Research on Polar and Alpine Geomorphology*, 3rd Guelph Symp. on Geomorphology: 11—24, Geo. Abstract Ltd., Norwich.
- Boulton, G. S. (1970): On the origin and transport of englacial debris in Svalbart glaciers. — *J. Glaciol.* 9: 213—229.
- Boulton, G. S. (1971): Till genesis and fabric in Svalbart. — In: *Golthwait, R. P., ed., Till: A Symposium*: 41—72, Columbus, Ohio.
- Braun, A. F. (1974): Eine sedimentologische Ableitung des Eisrandschwemmkegels aus der Obermoräne. *Ecl. Helv.* 67 (1): 155—161.
- Braun, A. F. (1976): Sedimentpetrographische Untersuchungen von Strandsedimenten des Galapagos-Archipels. — *Münster Forsch. Ges. Paläont.* (38/39): 143—158.
- Braun, A. F., German, R. & M. Mader (1976): Der Beitrag der Sedimentanalyse zur Quartärstratigraphie. Ein Diskussionsvorschlag zur Sitzung der Subkommission für Quartärstratigraphie der DUWG am 20. Februar 1976. — *Bezirksstelle f. Natur- u. Landschaftspflege Mitt.* 4, Tübingen.
- Brinkmann, R. (1964): *Lehrbuch der allgemeinen Geologie*, Bd. 1. — Stuttgart.
- Büdel, J. (1962): Die Abtragungsvorgänge auf Spitzbergen im Umkreis der Barentsinsel auf Grund der Stauerland-Expedition 1959/60. — *Verh. 33. Dt. Geogr.-Tag Köln 1961*: 336—375, Wiesbaden.
- Casagrande, G. (1934): Die Aräometermethode zur Bestimmung der Korngrößenzusammensetzung von Böden. — Berlin.
- Evenson, E., Dreimanis, A. & W. Newsome (1977): Subaquatic flow tills: a new interpretation for the genesis of some laminated till deposits. — *Boreas* 6: 115—133.
- Förtsch, O. (1963): Die Talformen und Talfüllungen unter den Gletschern der Ötztal Alpen. — *Polarforschung* 33 (1/2): 195—196.
- Förtsch, O. & H. Vidal (1968a): Die Existenz, Beschaffenheit und Bedeutung einer Zwischenschicht zwischen Gletschereis und Felsuntergrund. — *Geol. Rdsch.* 57: 1019—1033.
- Förtsch, O. & H. Vidal (1968b): Seismo-Glaziale Untersuchungen im oberen Fischbachtal. — *Z. Gletscherkde. Glazialgeol.* 5 (2): 61—88.
- Folk, R. L. & H. Ward (1957): Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters. — *J. Sediment. Petrol.* 27 (1): 3—26.
- Fürbringer, W. (1976): Zur Sedimentologie eines arktischen Deltas (Corville Delta, Nordalaska). — *Geol. Rdsch.* 65: 577—614.
- German, R. (1963): Der Urfedersee. Mit Beiträgen von R. Dehm, P. Filzer und A. Selmeier. — *Jber. Mitt. oberrhein. geol. Verh.* 45: 61—86, Stuttgart.
- German, R., Dehm, R., Ernst, W., Filzer, P., Käss, W., Müller, G. & W. Witt (1965): Ergebnisse der wissenschaftlichen Kernbohrung Ur-Federsee 1. — *Oberrhein. geol. Abh.* 14: 97—139, Karlsruhe.
- German, R., Borneff, J., Brunnacker, K., Dehm, R., Filzer, P., Käss, W., Kunte, H., Müller, G. & W. Witt (1967): Ergebnisse der wissenschaftlichen Kernbohrung Ur-Federsee 2. — *Oberrhein. geol. Abh.* 16: 45—110, Karlsruhe.
- German, R., Filzer, P., Dehm, R., Freud, H., Jung, W. & W. Witt (1968): Ergebnisse der wissenschaftlichen Kernbohrung Wurzach Becken (DFG). — *Jh. Ver. vaterl. Naturkde. Württ.* 123: 33—68, Stuttgart.
- German, R. (1970): Zur Unterscheidung von Grundmoräne und Schmelzwassersedimenten am Beispiel des württembergischen Allgäus. — *N. Jb. Geol. Paläont. Mh.* 1970 (2): 69—76, Stuttgart.
- German, R., Mader, M. & B. Kilger (1978): Glazigene und glazifluviale Sedimente: Bedeutung — Typisierung — Sedimentparameter. Ein Beitrag für das INQUA Symposium 1978 in Zürich. — *Bezirksstelle f. Natur- u. Landschaftspflege Mitt.* 9, Tübingen.
- Gilbert, R. (1973): Processes of underflow and sediment transport in a British Columbia mountain lake. — *Nat. Res. Council Canada, Assoc. Comm. Geodesy Geophysics, Subcomm. Hydrology, Proc. Hydrology Symp.* 9: 493—507.
- Gletscherkommission der Schweizer Naturforschenden Ges. (1880—1978): *Jährliche Messungen der Veränderungen der Schweizer Alpengletscher*. — Die Alpen, Bern.
- Glückert, G. (1973): Toteisgebiet zwischen Reinsting und Eggstätt an der Naht der Inn- und Chiemsee-Vorlandgletscher (Oberbayern). — *Mitt. Geogr. Ges. München* 58: 45—51, München.
- Grengg, H. (1976): Wurtenkees und Hochwurten-Speicher — *Z. Gletscherkde. Glazialgeol.* 12 (1): 105—107.
- Grimm, W. D. (1979): Zur Sedimentologie und Paläogeographie im Nordwestteil des pleistozänen Salzach-Vorlandgletschers. — In: C. Schlüchter, ed., *Moraines and varves: origin, genesis, classification*, 101—114, Rotterdam.
- Inman, D. L. (1952): Measures for describing the size distribution of sediments. — *J. Sediment. Petrol.* 22: 125—145.
- Jopling, A. V. (1964): Laboratory study of sorting processes related to flow separation. — *J. Geophys. Res.* 69: 3404—3418.
- Kelts, K. (1979): Postglacial varved sediments in Lakes Zürich and Zug, Switzerland. — In: C. Schlüchter, ed., *Moraines and varves: origin, genesis, classification*, 145—155, Rotterdam.
- Kilger, B. (1979): Die Sedimente am Eisrand des Roseggletschers (Graubünden, Schweiz). *Sedimentologische Ableitung der Eisrandsedimente von einer idealisierten Grundmoräne und der Aufbau des Gletschervorfeldes*. — Unveröff. Diss., Tübingen.

- Klebel's berg, R. v. (1948—49): *Handbuch der Gletscherkunde und Glazialgeologie*, Bd. 1 u. 2. — Wien.
- Köster, E. (1964): *Granulometrische und morphometrische Untersuchungsmethoden*. — Stuttgart.
- Kohnen, H. (1970): Zur Frage der Zwischenschicht. — *Z. Gletscherkde. Glazialgeol.* 6 (1): 201—204.
- Mader, M. (1971): Das Quartär zwischen Adelegg und Hochgelände. — *Württ. Jh.* 126: 78—205, Stuttgart.
- Mader, M. (1976): Schichtenfolge und Geschehensablauf im Bereich des Schussenlobus des pleistozänen Rhein-Vorlandgletschers. — Unveröff. Diss., Tübingen.
- Mathews, W. H. (1964): Water pressure under a glacier. — *J. Glaciol.* 5: 235—240.
- McCammon, P. B. (1962): Efficiencies of particle measures for describing the mean size and sorting of the sedimentary particles. — *J. Geol.* 70 (4): 443—465.
- Merkt, J., Lüttig, G. & H. Schneekloth (1971): Vorschlag zur Gliederung der limnischen Sedimente. — *Geol. Jb.* 89: 607—623.
- Müller, G. (1964): *Methoden der Sedimentuntersuchung*. — Stuttgart.
- Østrem, G. (1975): Sediment transport in glacial meltwater streams. — In: *Glaciofluvial and Glaciolacustrine Sedimentation*, Soc. Econ. Palaeont. Mineral Spec. Publ. 23: 101—122.
- Schlüchter, C. (1976): Geologische Untersuchungen im Quartär des Aaretales südlich von Bern. — In: *Beitr. z. Geologischen Karte d. Schweiz N. F.* 148: 3—117, Bern.
- Schlüchter, C. & U. Knecht (1979): Intrastratal conditions in a glacio-lacustrine sediment sequence in the Eastern Swiss Plain. — In: C. Schlüchter, ed., *Moraines and varves: origin, genesis, classification*, 433—441, Rotterdam.
- Sharp, R. P. (1974): Ice on Mars. — *J. Glaciol.* 13 (68): 173—185.
- Shaw, J. (1975): Sedimentary succession in pleistocene icemarginal lakes. — In: *Glaciofluvial and Glaciolacustrine Sedimentation*, Soc. Econ. Palaeont. Mineral. Spec. Publ. 23: 281—303.
- Shaw, J., Gilbert, R. & A. Archer (1979): Proglacial lacustrine sedimentation during winter. — In: C. Schlüchter, ed., *Moraines and varves: origin, genesis, classification*, 347—355, Rotterdam.
- Stokes, G. (1845): On the proof of the proposition that $(Mx + Ny)^{-1}$ is an integrating factor of the homogeneous differential equation $M + N \frac{dy}{dx} = 0$. — *Camb. Math. J.* IV: 241—244.
- Sturm, M. (1979): Origin and composition of clastic varves. — In: C. Schlüchter, ed., *Moraines and varves: origin, genesis, classification*, 212—246, Rotterdam.
- Weertmann, J. (1961): Mechanisms for the formation of inner moraines found near the edge of cold ice caps and ice sheets. — *J. Glaciol.* 3 (30): 965—978.
- Weertmann, J. (1968): Diffusion law for the dispersion of hard particles in an ice matrix that undergoes simple shear deformation. — *J. Glaciol.* 7 (50): 1961—1965.
- Zandstra, J. G. (1976): *Sedimentpetrographische Untersuchungen des Geschiebelehms von Emmerschans (Drenthe, Niederlande), mit Bemerkungen über eine Typeneinteilung der Saale-Grundmoräne*. — *Eiszeitalter u. Gegenwart* 27: 30—52.