

# Deutungsversuch einer komplexen eisrandnahen Talfüllung : die Wulp-Schotter und ihr glaziales Umfeld

Autor(en): **Letsch, Dominik**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Swiss bulletin für angewandte Geologie = Swiss bulletin pour la géologie appliquée = Swiss bulletin per la geologia applicata = Swiss bulletin for applied geology**

Band (Jahr): **17 (2012)**

Heft 1

PDF erstellt am: **25.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-349234>

## **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.

# Deutungsversuch einer komplexen eisrandnahen Talfüllung: die Wulp-Schotter und ihr glaziales Umfeld Dominik Letsch<sup>1</sup>

**Stichworte:** Glaziale Stauschotter, verfüllter Tallauf, Schlammströme, Verkittung, Gletschermilchfiltrat, Gletschersee, Turbidite, stabile Isotope.

## Zusammenfassung

Der Artikel gibt einen Überblick über einen quartären Schotterkörper im oberen Abschnitt des Küssnacher Tobels (Küssnacht ZH). Dieser füllt eine alte fluviale Talform auf, die leicht verschoben zum heutigen Küssnacher Tobel verläuft. Auf der Basis sedimentologischer und isotopengeologischer Untersuchungen und unter Verwendung zahlreicher unpublizierter Bohrdaten wird eine genetische Deutung vorgeschlagen. Der Schotterkörper wurde zu diesem Zweck in vier Lithofazies unterteilt. Als mögliches genetisches Modell dieser Lithofazies wird ein eisrandnaher Stausee angenommen, in welchen der Linth-Walensee-Gletscher Schlammströme schüttete und diesen zeitweilig trockenlegte. Bemerkenswert sind lakustrische Turbiditlagen und Einschwemmungen von Gletschermilch, wobei letztere auch massgeblich zur starken Verkittung der Schotter beigetragen haben. Altersmässig werden die Schotter als prähochwürmig eingestuft, wobei eine genauere Datierung zurzeit nicht möglich ist.

## Abstract

The present article gives an overview of a Quaternary gravel body in the upper part of the Küssnacher Tobel (Küssnacht ZH). This body fills a pre-existing fluvial valley that runs slightly displaced to the recent Küssnacher Tobel. Based on sedimentological and stable isotope geochemical investigations and data from numerous unpublished drillings an attempt is undertaken to genetically interpret the gravel body. To this end it is divided into four lithofacies types. A possible genetic model into which one can place these four lithofacies types is a lake damned up by the Linth-Walensee glacier into which the latter shed glacial debris flows. Temporarily the lake fell dry as indicated by subaerial debris flow deposits. Furthermore turbidite and glacier-milk deposits deserve attention. The latter is also partly responsible for the very thorough cementation of parts of the gravel. As far as can be judged from existing data the age of the gravel body is older than the maximum of the last glaciation.

## 1. Einleitung

Die Aufschlüsse quartärer Schotter im oberen Küssnacher Tobel, bei Küssnacht ZH (Fig. 1), wurden erstmals von Wettstein (1885, 23 f) als «löchrige Nagelfluh» beschrieben und kartiert. Er deutete die Schotter als eine Gletscherablagerung in einen randglazialen See, welcher durch den Gletscher im bereits präglazial angelegten Küssnacher Tobel aufgestaut worden sei. Albert Heim (in Keilhack 1912, p. 137) erkannte, dass die Schotter sich nicht am heutigen Relief orientieren, sondern stattdessen ein altes Tal ausfüllen, welches das heutige Tobel schief schneidet (vgl. auch Heim 1919, p. 268). In den folgenden knapp 100 Jahren blieb es still

<sup>1</sup> Dr. von Moos AG, Geotechnisches Büro, Bachofnerstrasse 5, CH-8037 Zürich, dletsch@geovm.ch

um diese Schotter: neben kurzen Erwähnungen in hydrogeologischer Hinsicht (Hug & Beilick 1934; Kempf et al. 1986) war es vor allem Hantke (z. B. 1980, p. 137, 2011, p. 299), der sie wiederholt – Wettstein folgend – als früh-letzteiszeitliche, randglaziale Stauschotter beschrieb und den Namen «Wulp-Schotter» einführte (Hantke 1987). Dieser Name wurde von Letsch (2006a, b; 2007) beibehalten, der die Schotter lithofaziell gliederte und genetisch zu deuten versuchte.

Anlässlich der Abfassung von Teilen der Erläuterungen zum Blatt Zürich des Geologischen Atlas der Schweiz (Pavoni et al. 1992), wurden die Wulp-Schotter einer erneuten Prüfung unterzogen. Gestützt auf neue Kartierungen, sedimentologische Untersuchungen und der Auswertung unpublizierter Daten aus Bohrungen, skizzieren wir hier ein neues genetisches Modell für die Wulp-Schotter. Einer Tendenz in der neueren

Quartärgeologie folgend, wird der Begriff Wulp-Schotter in dieser Arbeit als eine allostratigrafische Einheit verstanden (Räsänen et al. 2009). Dies ist eine zeitliche und genetische Einheit, die von Diskontinuitäten begrenzt wird und intern weiter lithostratigrafisch gegliedert werden kann. Die beiden begrenzenden Diskontinuitäten sind die Felsobergrenze der OSM (untere Grenze) und die Auflagerungsfläche der Grund- und Obermoränen des letzteiszeitlichen Maximalstandes bzw. des Schlieren-Stadiums.

## 2. Relief der Felsoberfläche

Figur 1 zeigt den nachgewiesenen sowie vermuteten Verlauf der Felsoberfläche im Raum Küsnacht–Itznach–Küsnachter Berg. Auffälligstes Merkmal ist eine Felsrinne, die aus dem Raum Limberg mit anfänglichem NW-Verlauf quer über das heutige Küsnachter

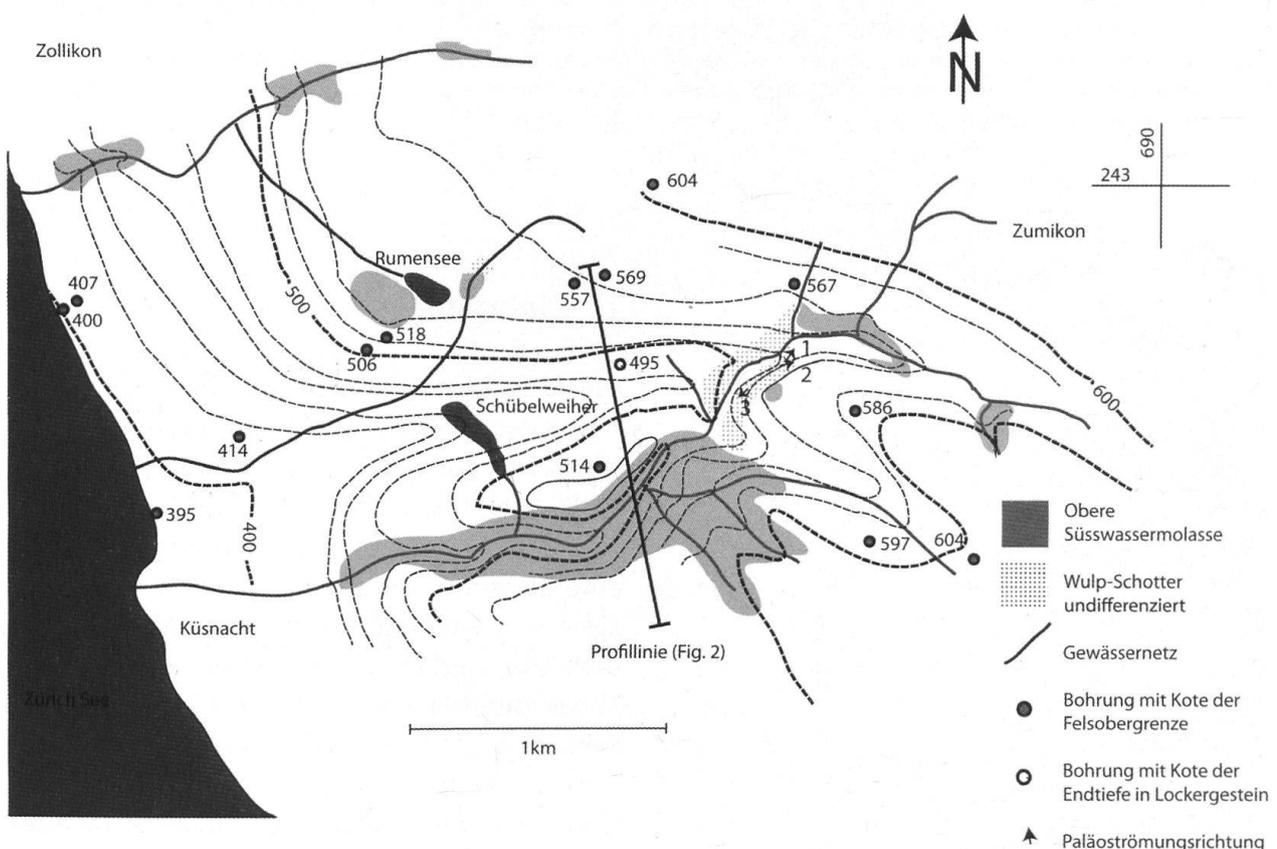


Fig. 1: Geologische Übersichtskarte mit dem vermuteten Verlauf der Felsoberfläche (Isohypsen Oberkante Fels mit 20 m Äquidistanz, Hunderter-Isohypsen fett). Die Nummern bei den drei Paläoströmungsrichtungen beziehen sich auf Tabelle 1.

Tobel zieht, bei Itschnach in einen annähernden E-W-Verlauf umbiegt und diesem folgend Richtung Zürichsee zieht. Gefälle und Steilheit dieser Rinne sind vergleichbar mit dem Küssnacher Tobel, allerdings ist die Rinne breiter und tiefer als die rezente Bachschlucht (Fig. 2). Über den weiteren Verlauf dieser Rinne gegen SE kann mangels Daten nur spekuliert werden. Es ist jedoch plausibel anzunehmen, dass sie einst die Depression Schönbüel-Hinter Guldenen im nördlichen Pfannenstiel-Gebiet entwässerte. Zudem liegt im Raum von Wangen-Chaltenstein (d. h. E des heutigen Tobels) ein stark strukturiertes Felsrelief vor, welches heute durch Moränen und Schotter eingedeckt ist (Kempf et al. 1986, 66 f.; Rick 2004). Da, wo die Rinne von Limberg-Itschnach das heutige Küssnacher Tobel kreuzt, scheint sie sich aufzuspalten, wobei der eine Ast dem heutigen Tobel oberhalb von ca. 510 m ü. M. folgt. Es ist daher plausibel anzunehmen, dass der

oberhalb von 510 m ü. M. liegende Abschnitt des Tobels älter ist als der tiefer liegende und vielleicht mit den verfüllten Rinnen von Wangen-Chaltenstein einst zusammenhing.

### 3. Fazielle Gliederung

Die allostratigrafische Einheit der Wulp-Schotter kann aufgrund der Aufschlüsse im Küssnacher Tobel in vier unterschiedliche Lithofazies gegliedert werden (Letsch 2006a).

Die *Wulp-Schotter sensu stricto* sind chaotisch gelagerte, schlecht sortierte und zumeist matrixgestützte Schotter (Fig. 3a, b). Schichtung ist keine oder nur andeutungsweise zu erkennen und die beobachteten Korngrößen reichen von Ton-Silt in Form einer beigigen mikritischen Matrix (oder eines Zements, vergleiche die Diskussion in Abschnitt 5 und Fig. 6b) über Sand und Steine bis zu kleinen

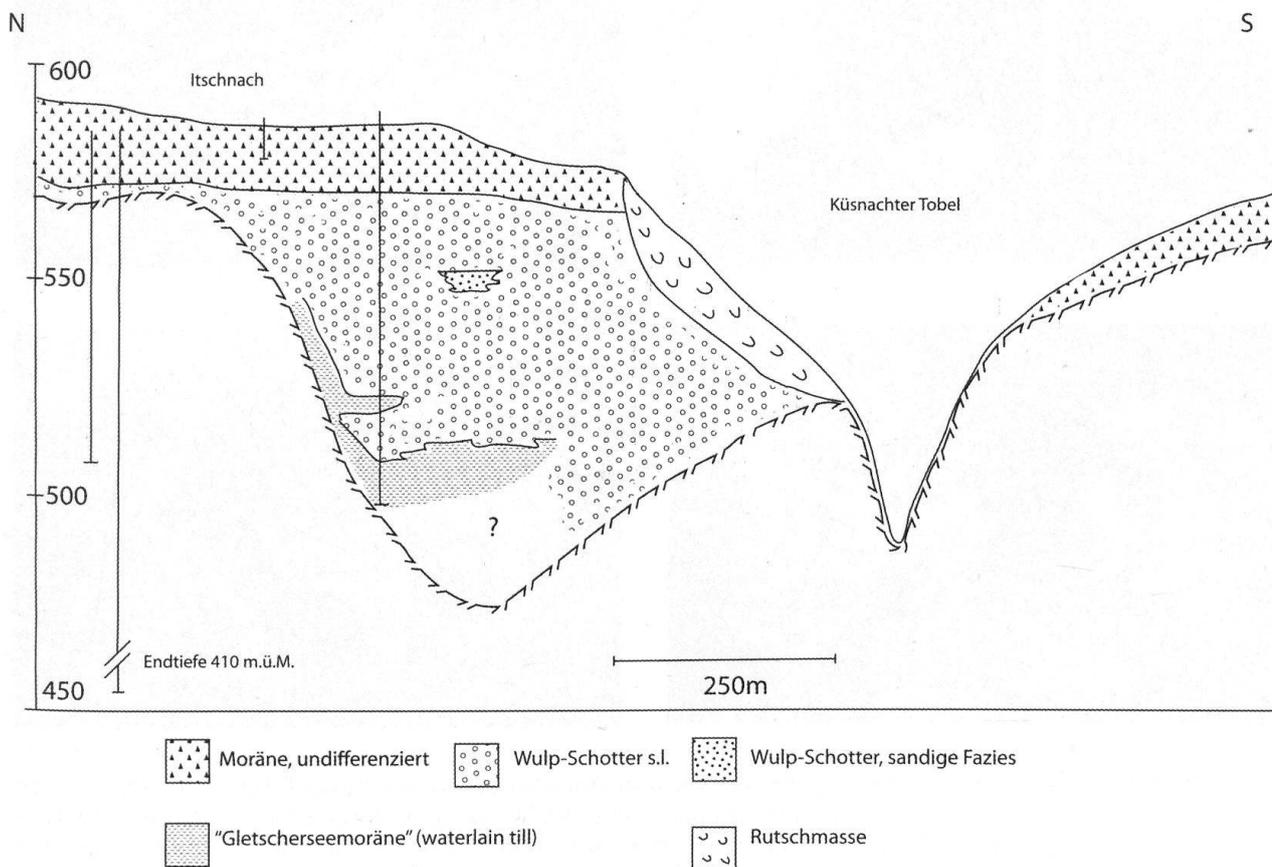


Fig. 2: Geologisches Querprofil durch die vermutete Felsrinne im Raum Itschnach (siehe Fig. 1 für die Lage der Profilspur). Fünffach überhöht, Bohrungen sind durch vertikale Striche angedeutet.

Findlingen mit knapp 1 m Kantenlänge. Die Orientierung der meisten Gerölle ist richtungslos, selten können Andeutungen von Imbrikation beobachtet werden. Sie entsprechen der Lithofazies Gms (*massive, matrix-supported gravel*) der angloamerikanischen Literatur (z. B. Eyles et al. 1983).

Die *geschichteten Wulp-Schotter* (Fig. 3c, 4a) tragen bereits viel regelmässiger Züge. Die Korngrößen sind einheitlicher und liegen v.a. in der Kies- und Stein-Fraktion. Die Schichtung (Schichtdicken zwischen 0.3 und 0.5 m) kommt sowohl durch Änderungen der vorherrschenden Korngrößen (inverse als auch normale Gradierung) als auch der Sortierung (Fehlen der Matrix/des Zements in den groben Lagen) zu Stande (Fig. 3c, 4a). Die kiesigen Schichten werden vereinzelt

auch von (teils kreuzgeschichteten, teils strukturlos massigen) Sandsteinbänken begleitet, in denen manchmal Gerölle unterschiedlicher Korngrößen schwimmen. Imbrikation kann häufig beobachtet werden. Die Schichten verlaufen meist flach oder schwach geneigt, wobei die meisten Aufschlüsse vermutlich versackt sind. Eine Ausnahme bilden die geschichteten Schotter bei der «Drachenhöhle» im Künsbacher Tobel, die mit ca. 45° nach NE einfallen (Deltaschichtung; Fig. 3d). Die geschichteten Wulp-Schotter dürften den beiden Lithofazies Gi und Gg (*inversly und normally graded gravel*) der angloamerikanischen Nomenklatur entsprechen (vgl. z. B. Eyles et al., 1987).

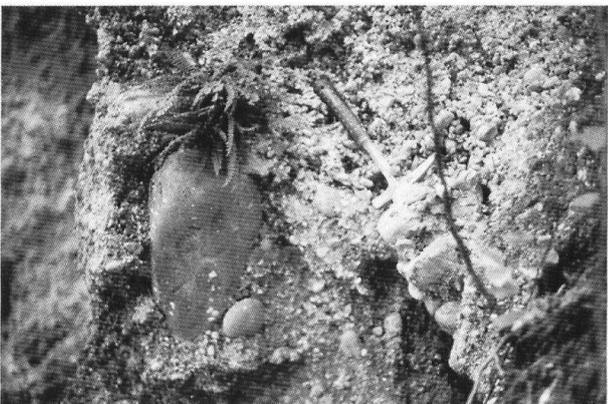
Die *sandige Lithofazies der Wulp-Schotter* (Fig. 5) besteht aus meist erstaunlich gut



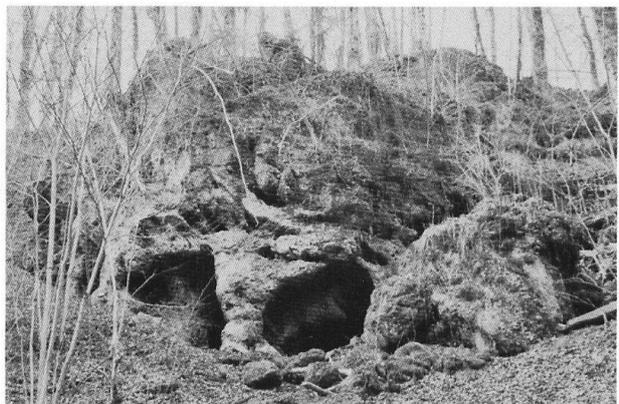
a



c



b



d

Fig. 3: a) Wulp-Schotter *sensu stricto* mit herausgewitterter «Naturbrücke» (linke Talseite des Künsbacher Tobels). b) Detailansicht der Wulp-Schotter *sensu stricto* (linke Talseite); auffallend ist die fehlende Ausrichtung der Komponenten sowie die schlechte Sortierung. c) Geschichtete Wulp-Schotter (linke Talseite) mit deutlich erkennbaren gröberen, matrixfreien Lagen (vgl. Fig. 4a). d) Geschichtete Wulp-Schotter («Drachenhöhle», rechte Talseite): undeutlich ist die nach NE (im Bild nach rechts) einfallende Deltaschichtung erkennbar.

verfestigten, grauen Sandsteinen, die manchen Molassesandsteinen zum Verwechseln ähnlich sehen. Unter den Körnern dominieren Karbonat (Kalk vorherrschend, seltener Dolomit) und Quarz. Selten finden sich Glaukonitkörner. Die Rundung der Körner ist meist schlecht (Fig. 5c). Die Korngrösse schwankt von Feinsand bis zu grobem Sand, wobei die Zementierung bei den gröberen Sanden meist bedeutend besser ist. Auffallend ist der stark schwankende Grad der Zementierung, die so intensiv werden kann, dass man an die Knauer in Molassesandsteinen (z. B. Pavoni 1957; Fig. 4b) erinnert wird.

Ähnlich stark verkittete eiszeitliche Sandsteine hat Schlüchter (1976, 21 ff.) aus dem Berner Aaretal beschrieben. In diesen Knauer Sandsteinen finden sich vereinzelt Kalklågchen (Fig. 5d), die verfaultet und verbogen sind (slumps? siehe Abschnitt 5). Die stärker herauswitternden Lagen (Nr. 3 in Fig. 4b) weisen häufig eine schwach ausgeprägte Gradierung auf (Fig. 5c) und an ihren Basen können zapfenartige Strukturen (Fig. 5b) beobachtet werden, die als Strömungsindikatoren gedeutet wurden (Letsch 2006a, b). Die letzte Lithofazies der Wulp-Schotter ist ein meist kaum verfestigtes, jedoch meist

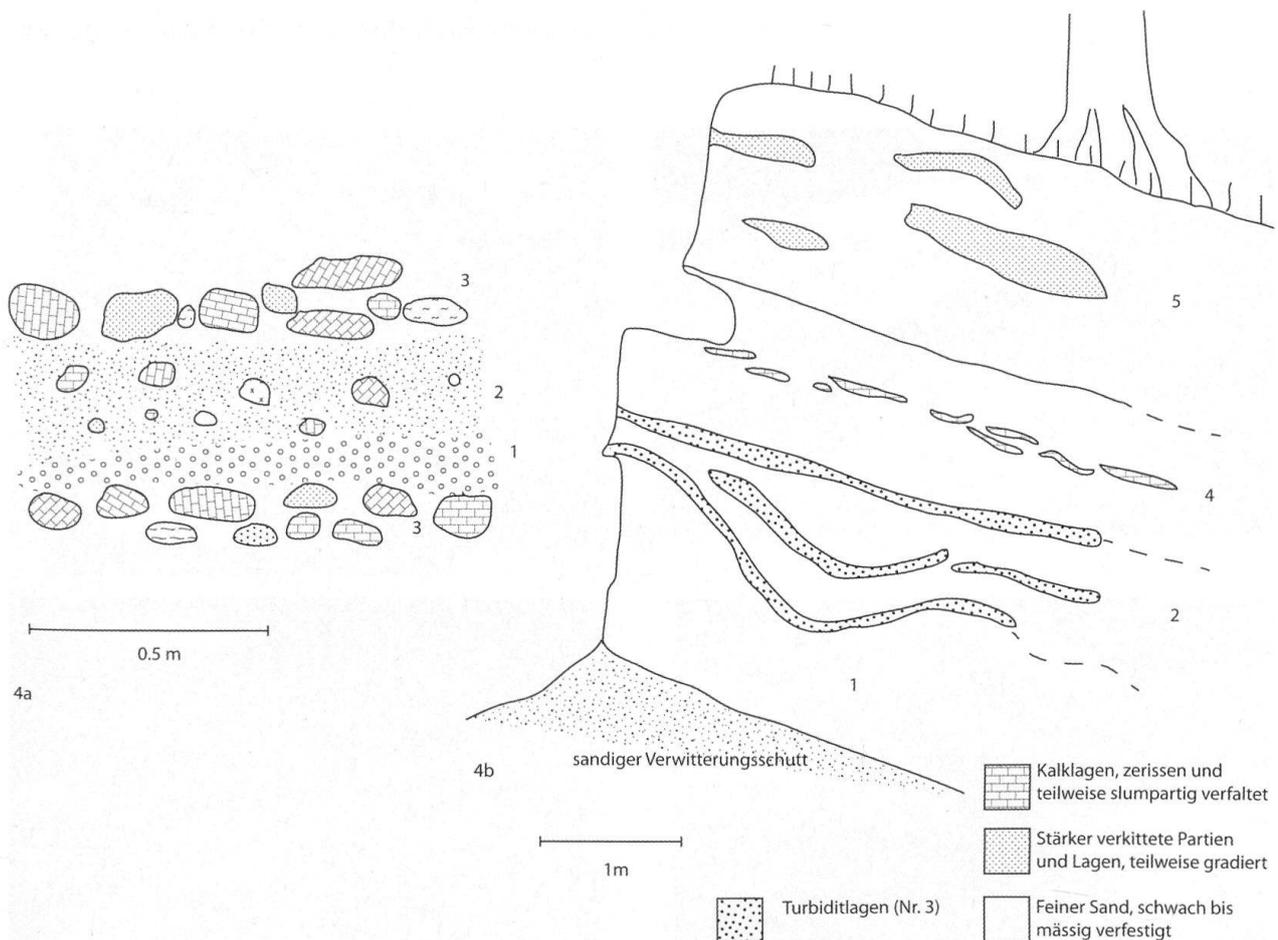


Fig. 4: a) Schematische Detailskizze eines Aufschlusses in den geschichteten Wulp-Schottern (Fig. 3c). [1] feinkörnige, mässig bis fest verkittete Schotter, teilweise mit kalkverbackener Sandmatrix; [2] grobkörnige, fest verkittete Schotter mit reichlicher kalkverbackener Sandmatrix; [3] gut verkittete, grobkörnige Schotter, ohne Matrix. b) Schematische Ansichtsskizze eines Aufschlusses in der sandigen Lithofazies der Wulp-Schotter (Lage: ca. 685'710/242'550; vgl. Fig. 5a). [1] homogener, schwach bis mässig verfestigter Sand, teilweise kreuzgeschichtet; [2] feinsandig bis siltiger Sand, unverfestigt, feinstgeschichtet; [3] ähnlich wie 2, jedoch stark verfestigt («knauer»-artig), die einzelnen Schichten sind unregelmässig verbogen, intern gradiert (vgl. Fig. 5c) und weisen auf ihren Unterseiten Fließstrukturen auf (Fig. 5b); [4] schwach verfestigter Sand; [5] ähnlich wie 4, jedoch grobkörniger mit unregelmässigen, stärker verkitteten Partien (Knauer).

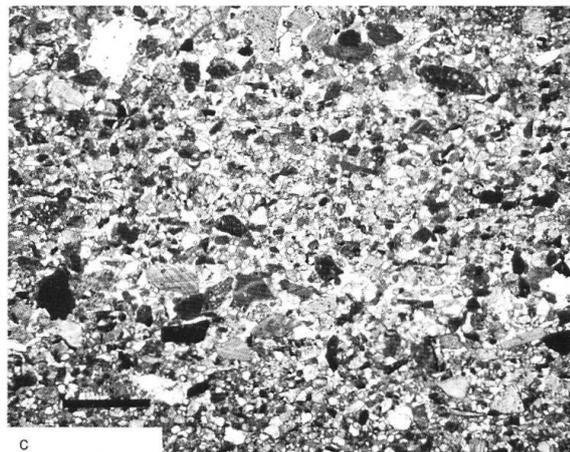
ziemlich dicht gelagertes Gemisch aus Ton, Silt, Sand, Geröllen und Geschieben (Fig. 6a), wobei jedoch Feinsand und Sand mengenmässig stark überwiegen. Sortierung kann keine festgestellt werden, die vereinzelt, größeren Komponenten schwimmen regellos verteilt in der feineren Grundmasse. Dies und das optische Erscheinungsbild sprechen für die Ablagerung in einem subglazialen See und daher die Bezeichnung als *Gletscherseemoränen-Fazies der Wulp-Schotter*. Die Gletscherseemoräne (Schlüchter 1997) der schweizerischen Nomenklatur entspricht den *waterlain tills* der englischsprachigen Nomenklatur (Dreimanis 1979).

#### 4. Geröllpetrologie

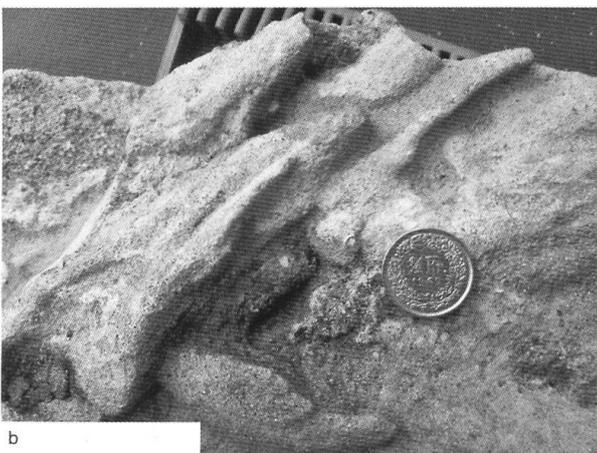
Obwohl bisher keine systematischen quantitativen Geröllzählungen durchgeführt wurden, soll der Geröllinhalt aufgrund der qualitativen Feldbefunde kurz charakterisiert werden. Die Sedimentgesteine überwiegen stark; am häufigsten vertreten sind dunkle mikritische Kalke (wahrscheinlich meist Quintnerkalke aus der Walenseeregion). Daneben treten häufig braune, gelbe und teilweise kieselige Kalke sowie diverse alpine Sandsteine auf. Auffallend sind die seltenen, jedoch meist recht grossen Verrucano-Komponenten, die allerdings in den feineren Fraktionen stark zurücktreten. Kleine, gut gerundete Radiolarit-Gerölle dürften aus der



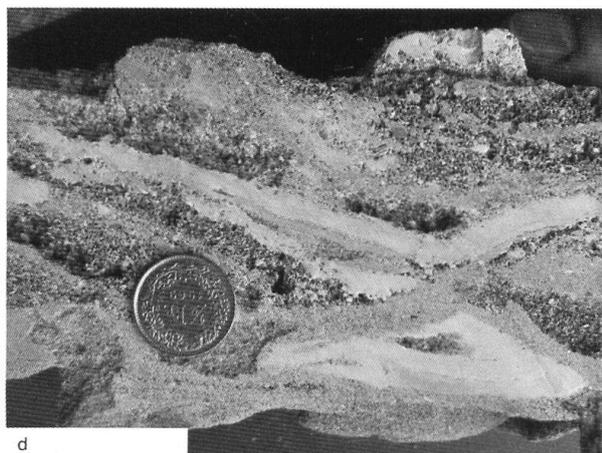
a



c



b

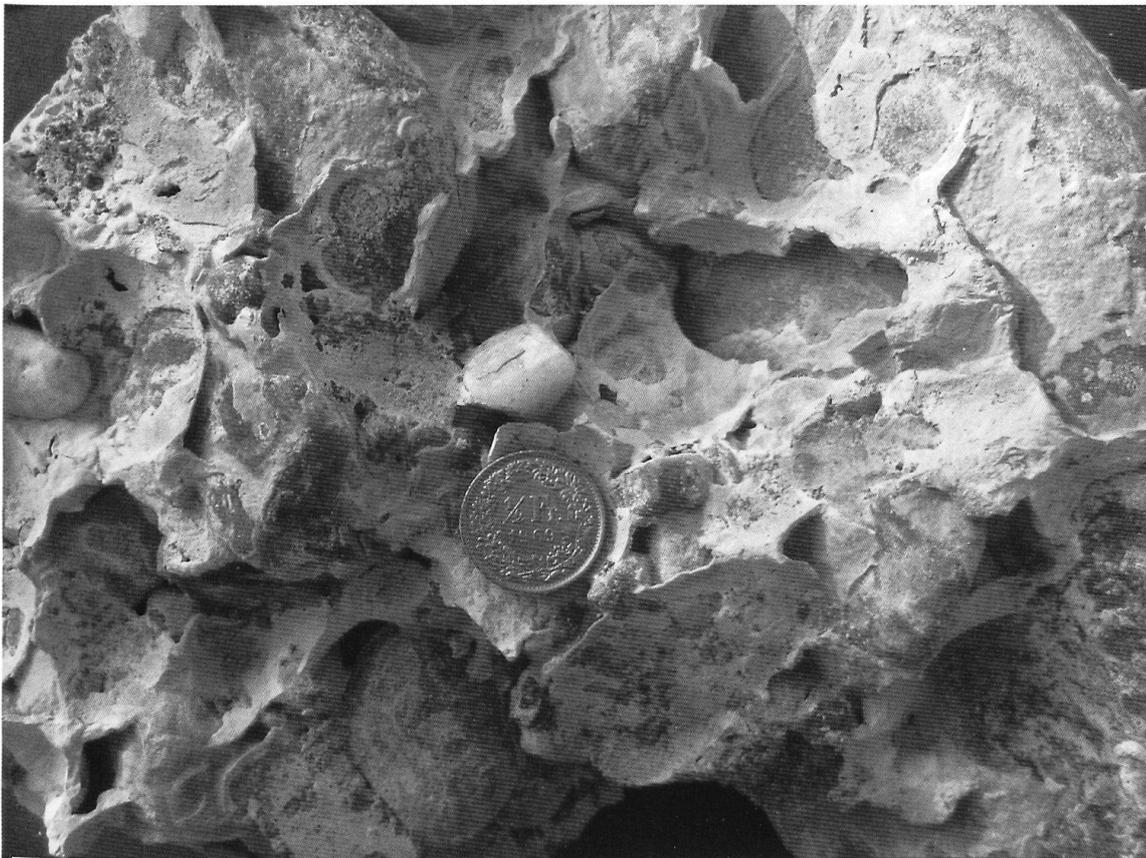


d

Fig. 5: a) Basis des Aufschlusses mit knauerartig verkitteten Sanden und Sandsteinen der sandigen Fazies der Wulp-Schotter (vgl. Fig. 4b). Plastiksack als Grössenmassstab. b) Unterseite einer Sandsteinlage (Turbiditlage, vgl. Nr. 3 in Fig. 4b) mit deutlich erkennbaren Fließmarken. c) Dünnschliffaufnahme durch eine Turbiditlage. Die schlechte Rundung der Komponenten sowie eine undeutliche gradierte Lage sind zu erkennen. Der dunkle Balken links unten ist 1 mm lang. d) Gesägter Querschnitt durch ein Handstück der Schicht Nr. 3 von Fig. 4b (gleiche Lokalität wie 5a). Die hellen und kompakter erscheinenden Lagen sind die im Text erwähnten Kalklagen. Sie sind teilweise verbogen und slump-artig verfalltet.



a



b

Fig. 6: a) Gletschersedmoräne (sandig-siltige Grundmasse mit eingelagerten Grobkomponenten), die von Wulp-Schottern *sensu stricto* überlagert wird. Lage: nahe von Fig. 4b, b) Wulp-Schotter *sensu stricto* mit zementierter Kalkmatrix (siehe Kap. 5.1).

Molasse-Nagelfluh umgelagert worden sein, ebenso die Blöcke aus Kalknagelfluh (Speer-Hirzli-Region). Erwähnenswert sind Sandsteinblöcke aus der OSM sowie eine grosse eckige Platte aus gelbem Molassemergel, die in Wulp-Schotter *sensu stricto* eingelagert ist (Letsch 2006a).

Unter den viel selteneren kristallinen Gerölen finden sich unauffällige Gneise, grüne Phyllite, Gangquarze, Kärpf-Spilite, vereinzelte Granite sowie vermutlich aus der Molasse umgelagerte grüne Metabasalte (Ophiolithe).

## 5. Verkittung: sekundärer Zement und/oder primäre Matrix?

Auffallend ist die häufig sehr ausgeprägte Verkittung der Wulp-Schotter, die zur Bildung von Höhlen und anderen spektakulären Verwitterungserscheinungen wie «Naturbrücken» (Fig. 3a, d) Anlass gibt. In diesem Zusammenhang sollen kurz die Unterschiede zwischen Matrix und Zement in Erinnerung gerufen werden, da dies für die Genese und das Alter der Verfestigung quartärer Schotter von Bedeutung ist. Unter Matrix verstehen wir die feinste Fraktion eines Sediments (nach einer gängigen Definition [z. B. Pettijohn 1957, p. 284] alle Komponenten  $\leq 20 \mu\text{m}$ ; wobei sich allerdings in der Praxis die Grenze von  $30 \mu\text{m}$  als zweckmässiger erwiesen hat; mündl. Mitteilung W. Winkler), welche zusammen mit den übrigen Fraktionen (d. h. bei der Sedimentation oder kurz danach durch Einspülung) abgelagert wurde. Zement hingegen ist eine chemische Ausfällung aus dem Porenwasser eines bereits abgelagerten Sediments. Fliessende Übergänge zwischen diesen zwei Extremen treten selbstverständlich auf und eine eindeutige Unterscheidung ist gerade in der ingenieur-geologischen Praxis häufig schwierig. Der neutralere Terminus *Verkittung* ist daher ein bequemer Sammelbegriff ohne genetische Konnotation und trägt dem Umstand Rechnung, dass sowohl Zementierung als auch

ein hoher Matrixanteil Schottern eine praxisrelevante Kohäsion verleihen, wie z. B. Erfahrungen aus Untertagebauten nahelegen (z. B. Rick 1996). In den Wulp-Schottern können mindestens drei Arten der Verkittung unterschieden werden, welche im Folgenden kurz beschrieben und genetisch zu deuten versucht werden.

### 5.1 Zementierte Kalkmatrix (Gletschermilchinfiltrat)

Die mit Abstand am häufigsten beobachtete Verkittung geht auf eine meist reichlich vorhandene, beige, mikritische, kalktuffartige Ablagerung zurück, die die einzelnen Gerölle allseitig umgibt und häufig auch die Kornzwischenräume (v. a. – aber nicht nur – die Zwickel entlang von Kornkontakten) füllt (Fig. 6b). Diese Verkittung tritt auch weit über dem heutigen Grundwasserspiegel auf, zeigt aber andererseits keine deutlichen typischen Merkmale eines Zements, der im vadosen (d. h. nicht grundwassergesättigten) Bereich ausgefällt wurde (wie z. B. Meniskuszement [Dunham 1971] oder Gravitationszement [Müller 1971]). Zudem scheint die Verkittung nicht an die heutige Topografie gebunden zu sein: auch mehrere Meter tief im Fels ist die Verkittung vorhanden, wie die zahlreichen Höhlen belegen. Dies legt nahe, dass es sich bei dieser Kalkablagerung um eine ursprüngliche Matrix handelt, die dann vermutlich noch sekundär durch feinverteilte Kalkausfällungen verfestigt wurde. Für diesen «Matrix-Zement» werden wir daher im Folgenden den Begriff *zementierte Kalkmatrix* verwenden.

Die Isotopenzusammensetzung (Fig. 7) dieser Matrix sollte deshalb durch eine Mischung aus primärer, karbonatischer Matrix und sekundär ausgefälltem Kalzit-zement erklärt werden können, sofern unsere obige Vermutung zutrifft. Somit könnten wir auch den mengenmässigen Anteil des Karbonats der ursprünglichen Matrix am Karbonat der heutigen zementierten Matrix

abschätzen. Zu diesem Zweck gehen wir in erster Näherung davon aus, dass die  $\delta^{13}\text{C}$ -Werte der zementierten Kalkmatrix als die Glieder einer Mischreihe zwischen zwei isotopischen Endgliedern aufgefasst werden können. Folgende Beziehung muss dann gelten:

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{zKM}} = x \delta^{13}\text{C}_{\text{uKM}} + (1-x) \delta^{13}\text{C}_{\text{KZ}}$$

Hierbei bezeichnet  $\delta^{13}\text{C}_{\text{zKM}}$  die isotopische Zusammensetzung der zementierten Kalkmatrix (wie sie gemessen wurde, Fig. 7),  $\delta^{13}\text{C}_{\text{uKM}}$  diejenige der ursprünglichen Kalkmatrix,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{KZ}}$  diejenige des sekundär ausgefallten Kalzit-zements und  $x$  ist der relative Massenanteil des Karbonats der ursprünglichen Matrix am Karbonat der zementierten Matrix. Wenn wir nun plausible Werte für die isotopischen Zusammensetzungen der beiden Endglieder einsetzen, so sollten wir einen realistischen Näherungswert für  $x$  erhalten.

Bei der ursprünglichen Matrix handelt es sich wahrscheinlich um die feinste Fraktion (Silt- und Ton-Fraktion) glazigenen Gesteinschuttetes, also um den Festanteil von Gletschermilch (z. B. Schlüchter 1976, 89 f.; 1989, p. 132; Graf 1993, p. 9). Diese dürfte sich sowohl aus alpinem Material als auch aus lokalem Molassematerial zusammensetzen (Gasser & Nabholz 1969, Peters 1969). Für beide Materialquellen interessiert uns nun die isotopische Zusammensetzung des Karbonatanteils, denn nur diese wird durch die Isotopenanalyse erfasst. Dieser wird bei beiden Quellen v. a. durch alpine Karbonatgesteine gebildet, für welche wir einen plausiblen  $\delta^{13}\text{C}$ -Wert von  $-3\text{‰}$  verwenden, der zudem mit Messungen an Molassemergeln und nicht zementierten Gletschermilchinfiltraten aus anderen Schottern übereinstimmt (Letsch unpubliziert).

Im Falle des sekundär ausgefallten Kalzit-zementes nehmen wir einen  $\delta^{13}\text{C}$ -Wert von  $-10\text{‰}$  an, wie er in klarem, kristallinem Zement anderer Schotter gemessen wurde (z.B. Strong et al. 1992 und Letsch unpubli-

ziert). Dieser Zement entspricht dem *sparitisch-drusigen Sekundärzement* (siehe unten). Für die Zusammensetzung der zementierten Kalkmatrix verwenden wir schliesslich  $-8.25\text{‰}$  (Fig. 7) und erhalten dann einen Massenanteil der ursprünglichen karbonatischen Matrix von ca. 25% an der heutigen zementierten Kalkmatrix. Da letztere nicht nur aus Karbonat besteht, sondern einen variablen Anteil an sonstigem Detritus (Quarz, Feldspat etc.) aufweist, dürfte der primäre detritische Anteil an der zementierten Kalkmatrix noch etwas höher liegen. Doch selbst mit dieser Einschränkung kann geschlossen werden, dass die Matrix der Schotter anfänglich als ein wenig kompaktes Pulver vorlag, wie wir das auch tatsächlichen in anderen eiszeitlichen Schottern beobachten können (z. B. Rick 1996 sowie Letsch unpubliziert).

Die Kalklagen in der sandigen Lithofazies der Wulp-Schotter weisen nun beinahe identische Isotopensignaturen auf wie die zementierte Kalkmatrix. Zudem ähneln sich die beiden makroskopisch deutlich und beide erscheinen im Dünnschliff als braune, mikritische Massen mit einem schwankenden, teils völlig fehlenden Gehalt an gröberem Detritus (v. a. eckiger Quarz und Feldspat). All dies legt es nun nahe, dass wir sowohl für die Kalklagen als auch für die zementierte Kalkmatrix eine ähnliche Entstehung annehmen. Als Seekreide (wie von Letsch 2006a vorerst vermutet) können die Kalklagen auf jeden Fall nicht angesprochen werden. Da die Lagen kurz nach ihrer Sedimentation von Sand bedeckt und teilweise slump-artig verfaltet wurden, kann der Zeitpunkt der Bildung jener Lagen und somit auch der primären Matrix der Schotter ziemlich genau fixiert werden: sie wurden zeitgleich mit der sandigen Fazies der Wulp-Schotter und somit vermutlich auch zeitgleich mit den anderen drei Lithofazies abgelagert. Anfänglich waren die Lagen noch weich und porös (Verfaltungen), wurden zu einem späteren Zeitpunkt aber durch sekundäre Kalkausfällungen zusammen mit den

sie umgebenden Sanden zementiert. Ob die Matrix wirklich genau zeitgleich mit den Geröllen des Schotters abgelagert wurde (in Form der Matrix eines Schlammstromes), oder ob sie bei Hochwasser in bereits bestehende Kiesbänke im Gletschervorfeld infiltrierte (Schlüchter 1976, 1989; Graf 1993; Rick 1996) kann nicht entschieden werden.

## 5.2 Sparitisch-drusiger Sekundärzement

Viel seltener als die eben beschriebene zementierte Kalkmatrix finden sich in Hohlräumen zwischen den Geröllen gleichmässige mächtige (maximal wenige mm), sehr filigrane Krusten, die aus klaren, nadeligen Kalzitkristallen bestehen. Dabei wachsen diese Krusten nicht direkt auf den Geröllen, sondern überziehen die eben beschriebene Kalkmatrix. Die relativ grossen Kristalle wei-

sen auf ein langsames(?) Wachstum in kalziumkarbonatgesättigtem Grundwasser (oder zumindest einzelnen wassergefüllten Drusen) oder in luftgefüllten Hohlräumen mit eingeschränktem Luftaustausch hin (Chafetz et al. 1985, p. 342). Dieser Sekundärzement stellt somit eines der oben beschriebenen Endglieder der zementierten Matrix dar.

## 5.3 Junge Kalzitausscheidungen auf freiliegenden Geröllunterseiten: «Mikrostalaktiten»

Hin und wieder treten an den Unterseiten freihängender Gerölle in Höhlen oder nischenartigen Hohlräumen milchig-weiße Flecken auf, die häufig noch von einem dünnen Wasserfilm bedeckt sind. Auf diesen finden sich hie und da auch noch äusserst filigrane, wurzelartig verzweigte und sehr brü-

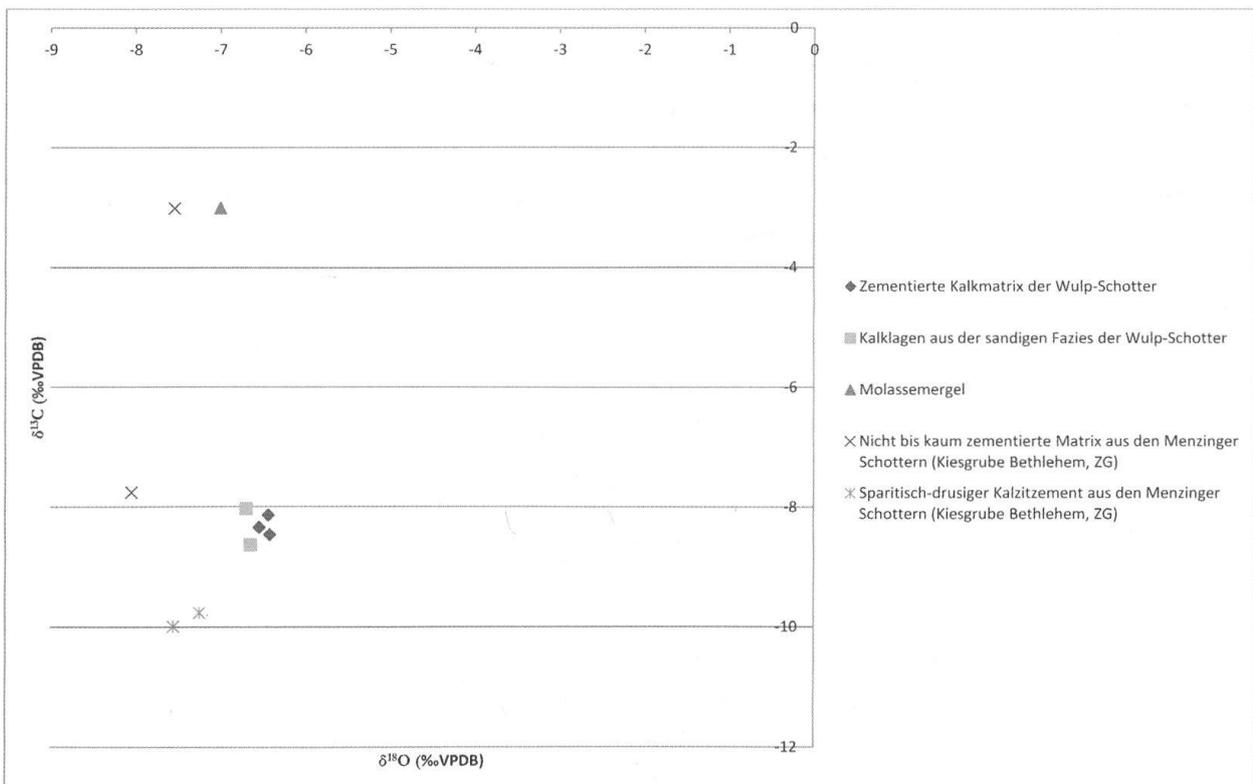


Fig. 7: Isotopenmessungen an Zementen der Wulp-Schotter sowie einige Vergleichswerte (Letsch unpubliziert). Die Messungen wurden am Geologischen Institut der ETH Zürich ausgeführt. Die Angaben sind in der gebräuchlichen  $\delta$ -Schreibweise:  $\delta = [(R_{\text{Probe}}/R_{\text{Standard}}) - 1] \times 1000$ , wobei  $R = {}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O}$ , bzw.  $= {}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}$ . Alle Angaben sind in ‰ und beziehen sich auf den *Vienna Pee Dee Belemnite Standard* (VPDB). Die Reproduzierbarkeit liegt bei  $\pm 0.1\text{‰}$  und  $\pm 0.07\text{‰}$  für  $\delta^{18}\text{O}$  bzw. für  $\delta^{13}\text{C}$  aufgrund wiederholter Messungen eines Laborstandards.

chige Kalkausfällungen. Diese Erscheinungen sind rezent und im Entstehen begriffen und dürften kleine Tropfsteine (Stalaktiten) darstellen.

## 6. Paläoströmungsindikatoren

Als Paläoströmungsindikatoren kommen die Imbrikationen in den Schottern, Kreuzschichtungen sowie die bereits erwähnten Zapfen in der sandigen Fazies in Frage (Fig. 5b). Die Letzteren sind Sohlmarken, wie sie auch an den Basisflächen von Turbiditen beobachtet werden können (drag-marks, tool-marks, flute casts u. a.). Aufgrund der häufig versackten Aufschlüsse und dem komplexen, kleinräumigen Aufbau der Wulp-Schotter sollte den abgeleiteten Paläoströmungen jedoch kein allzu grosses Gewicht beigemessen werden. Die wenigen vorhandenen Messungen sind in Fig. 1 eingetragen. Die dortigen Nummern korrespondieren mit den Nummern in Tab. 1. Generell können zwei Fliessrichtungssektoren unterschieden werden: Strömung nach NE und Strömung nach SW. Dies ist bemerkenswerterweise ungefähr senkrecht und nicht parallel – wie eigentlich eher zu erwarten gewesen wäre – zum oberen Abschnitt des alten Tallaufes.

## 7. Synthese

Die Wulp-Schotter weisen Eigenschaften auf, welche auf unmittelbare Nähe des Gletschers während ihrer Ablagerung hinweisen. Allerdings fehlen die typischen Texturen und Strukturen, wie sie für Grundmoräne typisch sind, die als das ursprünglichste und direkt aus dem Eis (ohne Schmelzwasserbeteiligung) abgeleitete Sediment betrachtet wird. Eine unterschiedlich starke Schmelzwasserbeteiligung scheint für die Entstehung der Wulp-Schotter also gegeben. Wir werden im Folgenden daher zuerst einen kurzen Abriss über die sedimentologischen Prozesse im näheren Gletscherumfeld geben – welches durch glazigene Schlammströme dominiert wird – und anschliessend die vier Fazies der Wulp-Schotter genetisch zu deuten versuchen. Schliesslich wird der Versuch unternommen, ein räumlich-genetisches Modell ihrer Entstehung zu skizzieren.

### 7.1 Die Eigenschaften glazigener Schlammströme

Im glazigenen Umfeld – in welchem wir uns zweifelsohne befinden – entwickeln sich Schlammströme entweder auf dem Gletscher (als supraglaziale flow tills, siehe z. B. Drewry 1986, 134 ff.) oder unter bzw. direkt vor dem Gletscher in subglazialen Seen (als subaquatische glazigene Schlammströme, Schlüchter 1997) als Folge des Ausschmelzens des im Gletschereis mitgeführten

Nr.	Struktur	Daten	Vektormittel	Fliessrichtung
1	Sohlmarken an Basis von Turbiditen (Azimut)	38, 48, 42, 2, 38	34	34
2	Imbrikation von Geröllen (Fallrichtung und Fallbetrag der geneigten Geröllflächen)	260/70		80
3	dito	50/70		230

Tab. 1: Zusammenfassung der Paläoströmungsindikatoren. Bei mehreren Messungen wurde das Vektormittel berechnet (vgl. z. B. Potter & Pettijohn 1963, p. 264). Die Nummern in der ersten Spalte beziehen sich auf die Nummern auf Fig. 1.

Schuttes. Entsprechend schlecht ist die Korngrößenverteilung dieser Schlammströme. Im Vorfeld des Gletschers kann es aber zu erheblichen Sortierungsvorgängen kommen, woraus dann die fluvioglazialen Ablagerungen (v. a. Schotter) abgeleitet werden, sofern der Gletscher nicht gerade in seiner direkten Umgebung eine Sedimentfalle findet, um seinen Schutt direkt abzusetzen.

Ist letzteres hingegen der Fall, ist das Gletschervorfeld beispielsweise von einem See bedeckt oder topografisch als Sedimentfalle prädestiniert, so setzt sich der Schlammstrom in beinahe ursprünglichem Zustand ab – zumindest was die Korngrößenverteilung anbelangt – und es entstehen so teilweise rudimentär geschichtete Moränenablagerungen, wie sie beispielsweise Seitenmoränen aufbauen (Schlüchter 1989, 80 f.). Voraussetzung dafür ist ein trockenes Gletschervorfeld. Ist dies nicht der Fall, mündet also der Gletscher in einen See, so werden die Schlammströme, welche sowohl von der Gletscheroberfläche herab in den See als auch durch subaquatische Gletschertore direkt in den See hinein fließen, ein glaziales Delta aufbauen, wobei es hier dann auch zu Sortierungsvorgängen kommen kann. Dieses Szenario wurde beispielsweise von Schindler (1968) auf den spätletzzeitlichen Linthgletscher während des Standes von Zürich angewandt. Mündet die Gletscherzunge nicht nur in einen See, sondern schwimmt sogar auf ihm, so entleert sich der glazigene Gesteinsschutt unter dem Gletscher direkt in stehendes Wasser und setzt sich nur kaum sortiert ab. Die so entstehenden «Schlamm-moränen» oder «Gletscherseemoränen» (Schlüchter 1976, 1989, 1997; *waterlain tills*, Dreimanis 1979) sind richtungslose bis leicht geschichtete, schlecht sortierte Sedimente mit einem gegenüber der Grundmoräne höheren Gehalt an Silt und Ton.

Liegt die Sedimentfalle jedoch etwas vom Gletscher entfernt, so treten neue Sortierungsprozesse in Kraft. Die glazigenen Schlammströme können in diesem Zusammenhang als der Ausgangspunkt des

(proximalsten) Fluvioglazials betrachtet werden. Der Weitertransport des durch Schlammströme ins direkte Gletschervorfeld transportierten Schuttes geschieht dann durch hochenergetische, schmelzwassergespeiste Flüsse mit reichlichen Kiesbänken und mehreren, verflochtenen Stromrinnen (*braided river environment*, z. B. Miall 1977). Bei periodisch auftretenden Überschwemmungen treten diese Flüsse über ihre Rinnenufer und setzen feines Material (Gletschermilch sowie feinen Sand) ab, welches die bereits abgelagerten Kiesschichten von oben her infiltrieren kann und somit das Material zur Verkittung dieser Kiesbänke liefert.

## 7.2 Sedimentologische Deutung der vier Wulp-Schotter Fazies

Nach diesem kurzen Überblick einiger möglicher Prozesse im näheren Gletscherumfeld wird nun versucht, die vier Lithofazies der Wulp-Schotter in dieses einzuordnen.

Die Wulp-Schotter *sensu stricto* können als proximale, glazigene Schlammstromablagerungen gedeutet werden (z. B. Schlüchter 1989, p. 113), wie sie im gletschernahen Umfeld häufig auftreten. Aus diesen Schlammströmen können sich bei längerem Transportweg und unter damit verbundener Aufspaltung in unterschiedliche Korngrößenfraktionen besser sortierte und teilweise auch geschichtete Flussablagerungen entwickeln.

Es liegt daher nahe, zumindest einen Teil der geschichteten Wulp-Schotter als Flussablagerungen zu deuten. Die beobachteten inversen Gradierungen (Fig. 3c, 4a) sind hingegen kaum durch fluviatilen Transport zu erklären. Unter anderem wurden bislang aus zwei unterschiedlichen geologischen Milieus invers gradierte Kiese beschrieben. Einerseits aus subaerischen (d. h. ohne Wasserbedeckung entstandenen) Schlammströmen (Murgängen) als Folge von nach oben gerichteten Entwässerungen («Fluidisierung») und damit verbundenem, auftriebs-

bedingtem Anreichern grober Komponenten im Top der Schlammströme (Nemec & Steel 1984). Andererseits aber auch aus dem subaquatischen Milieu von gletschernahen Seen. Dort treten in Schlamm- und Trübeströmen seltene inverse Gradierungen auf, die durch die oben erwähnte, auftriebsbedingte Korngrößenfraktionierung, aber auch durch «kinetisches Sieben» (d. h. Abgleiten der Feinfraktion bei gleichzeitigem Aufwärtsbewegen der groben Komponenten) erklärt werden (Eyles et al. 1987). Die geschichteten Wulp-Schotter, die Delta-schichtung zeigen, deuten wir daher als die Ablagerungen subaquatischer Schlammströme, die entweder direkt vom Gletscher oder über einen kurzen Umweg als subaerischer Schlammstrom in einen gletschernahen See geschüttet wurden. Die relativ gute Korngrössensortierung spricht eher für die zweite Variante. Die flach geschichteten Wulp-Schotter mit den charakteristischen inversen Gradierungen und dem Fehlen der Feinanteile in den oberen Abschnitten der einzelnen Schichten (Fig. 3c, 4a) scheinen dagegen eher die Ablagerungen subaerischer Schlammströme zu sein. Das nachträgliche Auswaschen von Teilen der Matrix von der Oberfläche eines zur Ruhe gekommenen Schlammstroms ist ein wichtiges Merkmal von Murgangablagerungen (z. B. Schäfer 2005, p. 60) und ist zudem eine mögliche Quelle der Kalklagen in der sandigen Lithofazies der Wulp-Schotter. Ebenfalls typisch für Ablagerung durch Schlammströme – seien sie nun subaerisch oder subaquatisch – sind schlecht sortierte Sandablagerungen mit darin schwimmenden Geröllen, wie man sie auch in den Wulp-Schottern beobachten kann.

Die sandige Lithofazies der Wulp-Schotter deuten wir als feinkörnige, distale Deltasedimente eines gletschernahen, jedoch nicht in direktem Gletscherkontakt stehenden Sees. Als Ablagerungsmechanismen kommen dabei vor allem Trübeströme in Frage, wofür sowohl die beobachteten Gradierungen (Fig. 5c) als auch die häufigen Sohlmarken (Fig.

5b) sprechen. Dazu gesellen sich die episodisch und nur selten eingeschwemmten Kalklagen, die vermutlich mit starken Niederschlagsereignissen und damit verbundenem Auswaschen von gletschermilchbedingten Feinanteilen bereits abgelagerter Kiesbänke im Gletschervorfeld zusammenhängen.

Die Gletscherseemoränenfazies schliesslich kann gut als subglazialer *waterlain till* beschrieben werden.

### 7.3 Ein räumlich-genetisches Modell

Aufgrund der oben ausgeführten sedimentologischen Interpretation der Wulp-Schotterfazies bietet sich als wahrscheinlichstes Szenario ein gletschernaher See an. Unter Berücksichtigung des Verlaufs der Felsoberfläche ist anzunehmen, dass der (kurzzeitig stationäre?) Linth-Walensee-Gletscher ein bereits existierendes, fluviatil tief eingeschnittenes Tobel in seinem mittleren Abschnitt verschloss. Sowohl abschmelzendes Gletschereis als auch lokaler Niederschlag und Bachwasser führten zum Aufstau eines Sees. Der obere Abschnitt des Tobels dürfte zudem auch als Abflussrinne eines aus dem Glatttal herüberreichenden Gletscherlappens im Küssnachter Berg (Pavoni 2002, Rick 2004) fungiert haben. Gletschernah (auf der Seite des Zürichsees) baute sich – anfänglich wohl subglazial bis subaquatisch, wie z. B. von Schindler 1968 (Fig. 3) grafisch dargestellt – ein Delta vor. Dieses wurde basal und proximal aus Gletscherseemoräne und grobem Glazialschutt aufgebaut, während gegen oben und vom Gletscher weg jedoch zunehmend subaquatische und schliesslich subaerische Schlammströme dominierten. Durch fortdauernde Schuttlieferung fiel vermutlich der gletschnahe Teil des Sees teilweise trocken und es bildete sich eine kleine Sanderfläche im seewärts vom Gletscher versiegelten Tobel aus, auf welcher das mit Schlammströmen vom Gletscher angelieferte Material teilweise fluviatil, teilweise ebenfalls in Form von Schlammströmen, in den etwas gletscherferneren, noch verbleiben-

den See geschüttet wurde. Lokal haben sicher auch die damaligen Seitenbäche des Tobels sowie der Tobelbach selbst Schutt (u.a. die kaum gerundeten Molassemergelblöcke) in den See geliefert. Gut möglich, dass auch der Gletscherlappen des Küssnachter Bergs (Pavoni 2002) Material in diesen See lieferte (Pavoni mündliche Mitteilung, Hantke 2011, p. 299).

Wie von vergleichbaren Gletscherstauseen bekannt (z. B. Fitzsimons 1992) ist, kann deren Seespiegel sehr schnell schwanken, was zu variierenden Ablagerungsmustern führt. Zudem kann ein Oszillieren des Gletschers zur Einlagerung von Moräne (Grund- und Gletscherseemoräne) in die Gletscherseesedimente führen, wie dies von den Wulp-Schottern bekannt ist. Ob ein Teil der Wulp-Schotter sogar auf dem Gletscher selbst oder zumindest auf Toteis abgelagert wurde, kann noch nicht abschliessend entschieden werden. Das Abschmelzen von Toteis würde auf jeden Fall die häufig schiefgestellten Sedimentpakete in den Schottern erklären, wie dies von Eyles et al. (1987) an einem Beispiel aus Kanada beschrieben wurde.

#### 7.4 Altersfragen

Die Schotter sind sicher älter als der letzte (und auch grösste?) Gletschervorstoss der Würmeiszeit. Ob sie nun aber frühwürmeiszeitlich (Hantke 2011), mittelwürmeiszeitlich (Letsch 2006a) oder sogar präwürmeiszeitlich sind kann noch nicht entschieden werden. Da sie allerdings gut gedeckt eine Hohlform in der Molasse ausfüllen, scheint es gut möglich, dass sie auch ohne grosse Verwitterungserscheinungen zu zeigen von relativ hohem Alter sein könnten (vgl. die diesbezügliche Bemerkung in Heim 1919, p. 279), wofür auch der geringe Gehalt an Verucano sprechen könnte (mündl. Mitteilung P. Haldimann). Interessant ist in diesem Zusammenhang die Tatsache, dass die von Schottern verfüllte Rinne mindestens ebenso tief, wenn nicht sogar tiefer ist wie das heutige Küssnachter Tobel. Dies hat übrigens

bereits Albert Heim (in Keilhack 1912, Fig. 68) erkannt. Daraus schliessen wir, dass die lokale Erosionsbasis (der Vorfluter) zur Zeit als das Tobel erodiert wurde (also der Spiegel eines Vorläufers des heutigen Zürichsees) vermutlich tiefer lag als in der holozänen Nacheiszeit, als sich das heutige Küssnachter Tobel bildet. Dies würde sich mit der Erkenntnis Schlüchters (z. B. 1981, 1986) decken, dass die letzten Eiszeiten im Alpenvorland eher zu Akkumulation als zu Erosion Anlass gaben. Solch verfüllte Tobel sind auch von anderen Stellen bekannt: beispielsweise wurde am Zürichberg N und NE vom Dolder ein mehr als 100 m tiefes, mit eiszeitlichen Seeablagerungen verfülltes Tobel durch Bohrungen nachgewiesen (Locher 1973, Schindler 1973). Solchen verfüllten Hohlformen sollte vermehrte Beachtung geschenkt werden, denn aus ihnen liessen sich vermutlich interessante neue Gesichtspunkte zur andauernden Kontroverse über Alter und Entstehung der quartären Felstäler im Schweizer Mittelland gewinnen.

#### Verdankungen

Herzlichen Dank gebührt Dr. M. Freimoser und Dr. B. Rick (beide Büro von Moos) für die gründliche und kritische Durchsicht des Manuskripts und für die zahlreichen anregenden Diskussionen. Dr. P. Haldimann (Büro Jäckli) möchten wir danken für eine sehr inspirierende Diskussion zur Küssnachter Geologie und für wertvolle Hinweise. Prof. Dr. Ch. Schlüchter (Universität Bern) gebührt der Dank uns auf Vorlesungen und Exkursionen für die Vielfalt glazialer Sedimente begeistert zu haben. Schliesslich möchten wir Prof. Dr. R. Trümpy gedenken, der uns 2005 auf die Wulp-Schotter aufmerksam machte und sie uns zur weiteren Untersuchung empfohlen hat.

## Literatur

- Chafetz, H. S., Wilkinson, B. H. & Love, K. M. 1985: Morphology and composition of non-marine carbonate cements in near-surface settings. In Schneidermann, N. & Harris, P. M. (Hrsg.), Carbonate cements (S. 337–347). Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication No. 36.
- Dreimanis, A. 1979: The problems of waterlain tills. In Ch. Schlüchter (Hrsg.), Moraines and Varves (S. 167–177). Balkema, Rotterdam.
- Drewry, D. 1986: Glacial geologic processes. Edward Arnold (Publishers), London.
- Dunham, R. J. 1971: Meniscus cement. In O. P. Bricker (Hrsg.), Carbonate cements (297–300). The Johns Hopkins Press, Baltimore and London.
- Eyles, N., Eyles, C. H. & Miall, A. D. 1983: Lithofacies types and vertical profile models; an alternative approach to the description and environmental interpretation of glacial diamict and diamictite sequences. *Sedimentology*. 30, 393–410.
- Eyles, N., Clark, B. M. & Clague, J. J. 1987: Coarse-grained sediment gravity flow facies in a large supraglacial lake. *Sedimentology*. 34, 193–216.
- Fitzsimons, S. J. 1992: Sedimentology and depositional model for glaciolacustrine deposits in an ice-dammed tributary valley, western Tasmania, Australia. *Sedimentology*. 39, 393–410.
- Gasser, U. & Nabholz, W. 1969: Zur Sedimentologie der Sandfraktion im Pleistozän des schweizerischen Mittellandes. *Eclogae geol. Helv.* 62/2, 467–516.
- Graf, H.-R. 1993: Die Deckenschotter der zentralen Nordschweiz. Diss. ETH, Zürich.
- Hantke, R. 1980: Eiszeitalter – Band 2. Ott Verlag, Thun.
- Hantke, R. 1987: Alexander Wettstein als Geologe. *Küsnachter Jahrbuch*. 1987, 60–76.
- Hantke, R. 2011: Eiszeitalter. Ott Verlag, Thun.
- Heim, A. 1919: Geologie der Schweiz. Band 1 Molasseland und Juragebirge. Tauchnitz, Leipzig.
- Hug, J. & Beilick, A. 1934. Die Grundwasserverhältnisse des Kantons Zürich. Beiträge zur Geologie der Schweiz: Geotechnische Serie: Hydrologie Lieferung 1.
- Keilhack, K. 1912: Lehrbuch der Grundwasser- und Quellenkunde. Gebrüder Borntraeger, Berlin.
- Kempf, Th., Freimoser, M., Haldimann, P., Longo, V., Müller, E., Schindler, C., Styger, G. & Wyssling, L. 1986: Die Grundwasservorkommen im Kanton Zürich. Beiträge zur Geologie der Schweiz: Geotechnische Serie, Lieferung 69.
- Letsch, D. 2006a: Die Wulp-Schotter im Küsnachter Tobel. *Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich*. 151(3), 67–72.
- Letsch, D. 2006b: Die Wulp-Schotter im Küsnachter Tobel (I). *Küsnachter Jahrbuch*. 2006, 79–85.
- Letsch, D. 2007: Die Wulp-Schotter im Küsnachter Tobel (II). *Küsnachter Jahrbuch*. 2007, 25–33.
- Locher, Th. 1973: Geologische Ergebnisse der Voruntersuchungen für die projektierte SBB-Zürichberglinie. *Schweiz. Bauzeitung*, 91/19.
- Miall, A. D. 1977: A review of the braided-river depositional environment. *Earth-Science Reviews*. 13, 1–62.
- Müller, G. 1971: «Gravitational» cement: an indicator for the vadose zone of the subaerial diagenetic environment. In O. P. Bricker (Hrsg.), Carbonate cements (301–302). The Johns Hopkins Press, Baltimore and London.
- Nemec, W. & Steel, R. J. 1984: Alluvial and coastal conglomerates: their significant features and some comments on gravelly mass-flow deposits. In Koster, E. H. & Steel, R. J. (Hrsg.), Sedimentology of Gravels and Conglomerates. *Can. Soc. Petrol. Geol. Mem.* 31, 1–31.
- Pavoni, N. 1957: Geologie der Zürcher Molasse zwischen Albiskamm und Pfannenstiel. *Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich*. 102(5), 117–315.
- Pavoni, N. 2002: Die Vergletscherung des Küsnachterberges in der letzten Eiszeit. *Küsnachter Jahrbuch*. 2002, 30–48.
- Pavoni, N., Jäckli, H. & Schindler, C. 1992: Geologischer Atlas der Schweiz 1:25'000: Blatt 1091 Zürich.
- Peters, T. 1969: Tonmineralogie einiger Glazialablagerungen im schweizerischen Mittelland. *Eclogae geol. Helv.* 62/2, 517–525.
- Pettijohn, F. J. 1957: Sedimentary rocks. 2nd edition. Harper & Brothers, New York.
- Potter, P. E. & Pettijohn F. J. 1963: Paleocurrents and basin analysis. Springer, Berlin.
- Räsänen, M. E., Auri, J. M., Huitti, J. V., Klap, A. K. & Virtasalo, J. J. 2009: A shift from lithostratigraphic to allostratigraphic classification of Quaternary glacial deposits. *GSA Today*. 19/2, 4–11.
- Rick, B. 1996: Ingenieurgeologische Beobachtungen beim Vortrieb des Habsburgtunnels. *Bull. Angew. Geol.* 1/2, 99–112.
- Rick, B. 2004: Region Zürich 1.3: Forch–Küsnacht. *Hydrologischer Atlas der Schweiz: Wege durch die Wasserwelt – Hydrologische Exkursionen in der Schweiz*.
- Schäfer, A. 2005: Klastische Sedimente. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.
- Schindler, C. 1968: Zur Quartärgeologie zwischen dem untersten Zürichsee und Baden. *Eclogae geol. Helv.* 61/2, 395–433.
- Schindler, C. 1973: Geologie von Zürich, Teil II: Riesbach-Wollishofen, linke Talflanke und Sihl-schotter. *Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich*. 118/3, 299–318.
- Schlüchter, Ch. 1976: Geologische Untersuchungen im Quartär des Aaretals südlich von Bern. Beiträge zur geologischen Karte der Schweiz, N.F. 148. Lieferung.
- Schlüchter, Ch. 1981: Remarks on the Pleistocene morphogenetic evolution of the Swiss Plain. *Z. Geomorph. N.F. Suppl.-Bd.* 40, 61–66.
- Schlüchter, Ch. 1986: The Quaternary glaciations of Switzerland, with special reference to the northern alpine foreland. *Quaternary Science Reviews*. 5 (1–4), 413–419.

- Schlüchter, Ch. 1989: Eiszeitliche Lockergesteine – Geologie, Genese und Eigenschaften. Ein Beitrag zu den Beziehungen zwischen fundamentaler und angewandter Eiszeitgeologie. Habilitationsschrift, ETH Zürich.
- Schlüchter, Ch. 1997: Sedimente des Gletschers. Bulletin für angewandte Geologie. 2/2, 99–112.
- Strong, G. E., Giles, J. R. A. & Wright, V. P. 1992: A Holocene calcrete from North Yorkshire, England: implications for interpreting palaeoclimates using calcretes. Sedimentology. 39, 333–347.
- Wettstein, A. 1885: Geologie von Zürich und Umgebung. J. Wurster & Co., Zürich.

**Where does your borehole go?**

**Gyro-Services**

- You lead site investigation in a tunneling project.
- You explore mineral resources using diamond core drilling.
- You use raise boring techniques for shaft excavation.
- You are responsible for horizontal directional drilling.

Do you know where your boreholes go?  
We will tell you!

**GYRO-SERVICES**  
SWITZERLAND  
[www.gyro-services.com](http://www.gyro-services.com)