

Zeitschrift:	Bulletin für angewandte Geologie
Herausgeber:	Schweizerische Vereinigung der Petroleum-Geologen und –Ingenieure; Schweizerische Fachgruppe für Ingenieur-Geologie
Band:	2 (1997)
Heft:	2
Artikel:	Tonreiche Rutschungen im Grenzgebiet subalpine Molasse-Flysch zwischen Sattel und Lauerzersee (Kt. Schwyz) : Entstehung, Zusammensetzung und Bewegungsablauf
Autor:	Yavuz, E. Vural / Schindler, Conrad
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-219966

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 26.01.2026

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

Tonreiche Rutschungen im Grenzbereich subalpine Molasse - Flysch zwischen Sattel und Lauerzersee (Kt. Schwyz): Entstehung, Zusammensetzung und Bewegungsablauf

mit 14 Figuren und 2 Tabellen

E. VURAL YAVUZ¹⁾ und CONRAD SCHINDLER²⁾

Zusammenfassung

Zwischen Sattel und Steinen (Kt. Schwyz) liegen über subalpiner Molasse, Einsiedler Schuppenzone und Wägitaler Flysch ausgedehnte, seit dem Spätglazial aktive Rutschgebiete. Der weitverbreitete lehmige Hangschutt glitt hier ab, wobei Gehängelehm, Moräne und Fels erfasst wurden. Die geotechnischen und hydrogeologischen Eigenschaften der Rutschmasse werden weitgehend von der feinkörnigen Matrix bestimmt, trotzdem Grobkomponenten bis hin zu Blöcken häufig auftreten. Es wurde versucht, das räumliche Deformationsverhalten geodätisch zu erfassen, wobei insbesondere sich verschiebende Bereiche mit Hebungen auffielen. Kontinuierliche Messungen entlang einer in der Falllinie verlaufenden Gleitfläche ergaben für die Jahre 1991 - 1994 erstaunlich kontinuierliche Verschiebungen, dies bei allmählicher Beschleunigung, vermutlich bedingt durch eine Folge ungewöhnlich regenreicher Jahre.

Résumé

De vastes zones de glissements actifs depuis la fin de l'ère glaciaire recouvrent la molasse subalpine, la zone à écailles de Einsiedeln et le flysch de Wägital entre Sattel et Steinen dans le canton de Schwyz. Les éboulis argileux très répandus ont glissé en emportant en plus de la moraine et de la roche. Les propriétés géotechniques et hydrogéologiques de l'éboulement dépendent avant tout de la matrice à grains fins, bien que celle-ci contienne de nombreuses pierres et des blocs. La géodésie a été utilisée pour mesurer les déplacements en trois dimensions. Le plus frappant a été l'observation de zones en cours de surrection. Des mesures continues le long d'une surface de glissement orientée dans la ligne de pente ont mis en évidence des déplacement réguliers entre 1991 et 1994. Des années particulièrement riches en précipitations sont probablement à l'origine de l'accélération lente des déformations pendant la période d'observations.

Summary

The area lying between Sattel and Steinen (canton Schwyz) is underlain by Subalpine Molasse, the disturbed Einsiedler zone and Wägital Flysch. Several big slides were activated here since the retreat of the glaciers. The slopes are covered by unstable, loamy detritus derived from weathering products, moraine and rock. The geotechnical and hydrogeological properties of the gliding mass are largely determined by the finegrained matrix inspite of frequent inclusions of stones or even blocks. Efforts were made to analyse the three-dimensional deformation pattern by geodesy. Most striking are moving fields affected by heaving. Continuous measurements of the shifting along a shearing plane were taken between 1991 and 1994. The displacements proved to be astonishingly continuous. The gradual acceleration may have been caused by a series of unusually wet years.

¹⁾ Lehrstuhl für Angewandte Geologie, TU Istanbul, 80626 Maslak-Istanbul, Türkei

²⁾ Ingenieurgeologie, ETH-Hönggerberg, CH-8093 Zürich

1. Einleitung

Unter der Leitung des Mitautors schloss Vural Yavuz 1996 seine Dissertation bei der Ingenieurgeologie ETH Zürich ab, dies unter dem Titel «Analyse der Bewegung grosser, tonreicher Rutschgebiete am Beispiel des Gebietes Engelstock - Sattel - Steinen (SZ)». Ziel der Arbeit war es, die komplexen Zusammenhänge beim Ablauf grossflächiger Hangbewegungen soweit möglich und aus verschiedenen Gesichtspunkten zu erfassen. Das Arbeitsgebiet sollte reich an Mergeln sein, zahlreiche aktive Rutschungen aufweisen und zudem relativ gut erschlossen sein. Wenn möglich sollten bereits Bohrungen, Laborversuche und längerfristige “in situ Messungen” verfügbar sein, welche in die Auswertung einbezogen werden könnten. Die Wahl fiel auf ein Gebiet zwischen den Dörfern Sattel und Steinen, westwärts begrenzt durch die Steiner Aa, östlich durch die Ferienhaussiedlung Mostelberg, durch den Engelstock und den Hang des Haggen. Schon seit vielen Jahren wurde dort die Sanierung eines rutschgefährdeten Abschnitts der Strasse Sattel - Schwyz projektiert. Das gewählte Areal wurde geologisch, morphologisch und hydrogeologisch im Massstab 1:2500 kartiert, die Bewegungen durch Beobachtungen zahlreicher Messpunkte wie auch durch eine kontinuierliche Messeinrichtung erfasst und die Bodenkennwerte ermittelt. Die umfangreiche Dissertation wurde leider nur in wenigen Exemplaren gedruckt, weshalb hier die wichtigsten Ergebnisse in geraffter Form vorgestellt seien. Zusätzlich sollen einige der aufgeworfenen Probleme weiterverfolgt werden.

2. Gesteinsunterlage und Quartärablagerungen

2.1 Geologie der Gesteinsunterlage

Der tiefste Punkt des Untersuchungsgebiets liegt bei Steinen um 470 m ü.M., der höchste am Gipfel des Engelstocks (1296.9 m). Im wellig-unruhigen, mässig geneigten Gelände überwiegen Expositionen nach SW, W und NW. Wie auf Figur 1 zu sehen, gehört es tektonisch zu drei Zonen, wobei die Grenze zwischen subalpiner Molasse und den alpinen Schubmassen am Engelstock um 1200 m angetroffen wird und sukzessive gegen Südwesten bis zum Talboden absinkt. Von N nach S - bzw. von unten nach oben - können folgende drei Bereich unterschieden werden:

- die Morgarten-Rigi Schuppe als südlichste Teilzone der subalpinen Molasse
- die Äussere Einsiedler Schuppenzone, welche nahe dem Engelstock ostwärts auskeilt
- der Wägitaler Flysch.

Die Morgarten-Rigi Schuppe fällt im Untersuchungsgebiet mit 35-50° regelmässig gegen SSE ein und besteht hier aus basalen Teilen der Unteren Süsswassermolasse. Hier ist die «Karbonatreiche Molasse» aufgeschlossen, in welcher bis zu 10 m mächtige Bänke von hartem Sandstein und Nagelfluh auffallen. Weiter nördlich folgt die mergelreiche «Molasse Rouge». Wie schon Habicht (1945) beschrieb, bildet Kalzit den Zement, während die Nagelfluhgerölle grösstenteils aus Dolomit, diversen Typen von Kalk, Kieselkalk und Kalksandstein bestehen. Der Anteil an Dolomit kann auch bei den Sandsteinen sehr hoch liegen. Nagelfluh und Sandstein können sich seitlich ablösen, während die selten aufgeschlossenen, bunten Lagen von Mergel sich meist auf längere Strecken lateral verfolgen lassen. Teils enthalten sie viel Silt oder sogar Sand, teils überwiegt der Tonanteil.

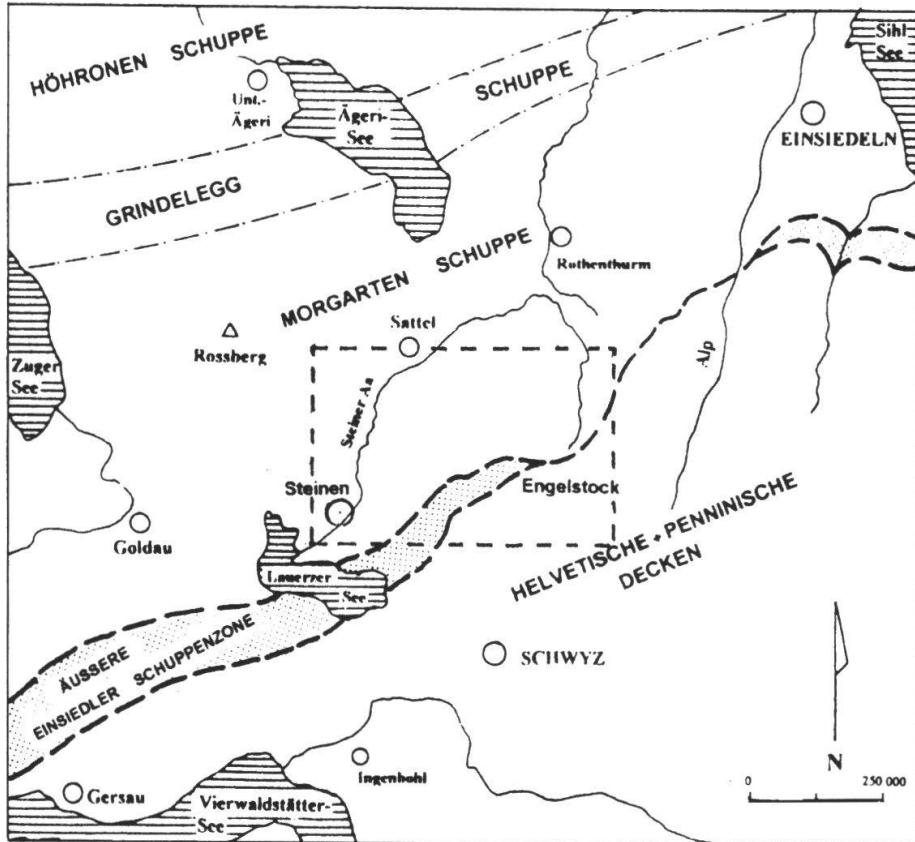


Fig. 1:
Tektonische Übersichtsskizze, nach R. Frei (1963) und S. Schlanke (1974), leicht abgeändert. Gestrichelt umrahmt: Untersuchungsgebiet.

Die Äussere Einsiedler Schuppenzone besteht aus dachziegelartig übereinander geschobenen Einzelementen (W. Leupold 1943). Die südhelvetische Schichtreihe umfasst hier oberkretazische bis mitteleozäne Sedimente: Die mergeligen Ammonerschichten werden transgressiv von der teils kalkigen, teils grünsandigen Abfolge der Nummulitenkalke überdeckt. Diese harte, an der Sattelstrasse bei Burg gut aufgeschlossene, gegen SSE abfallende Schichtplatte wird gegen oben durch die mergeligen Stadschiefer abgelöst, selten ist darüber noch mitteleozäner Flysch erhalten geblieben.

Der penninische Wägitaler Flysch zeigt alle Merkmale einer durch Trübeströmme geprägten Schichtserie, d.h. gradiente, durch zahllose Kleinzyklen geprägte Abfolgen. Die Sandsteine, Siltsteine und die seltenen geröllführenden Gesteine weisen einen überwiegend kiesligen Zement auf, so dass der Härtekontrast zu den tonigen bis mergeligen Zwischenlagen extrem wird. Tektonische Störungen aller Art haben die ursprünglich regelmässige Schichtfolge überprägt. Trotzdem herrscht generell 30-60° Gefälle gegen SSE vor. Laut Winkler et al. (1985) treten im Untersuchungsgebiet nur Flyschserien oberkretazischen Alters auf (Campanien bis Maastrichtian).

2.2 Eigenschaften der Gesteinsunterlage, Klüfte, Brüche

Auf kleinstem Raum finden sich im Untersuchungsgebiet Gesteinskomplexe ganz verschiedener Herkunft und Alters. Trotzdem lassen sich gemeinsame Merkmale feststellen:

- Abgesehen von lokalen Störungen fallen die Schichtflächen durchwegs 30-60° steil gegen SSE ein, wie dies weiter westlich am Rossberg und der Rigi gut sichtbar ist.

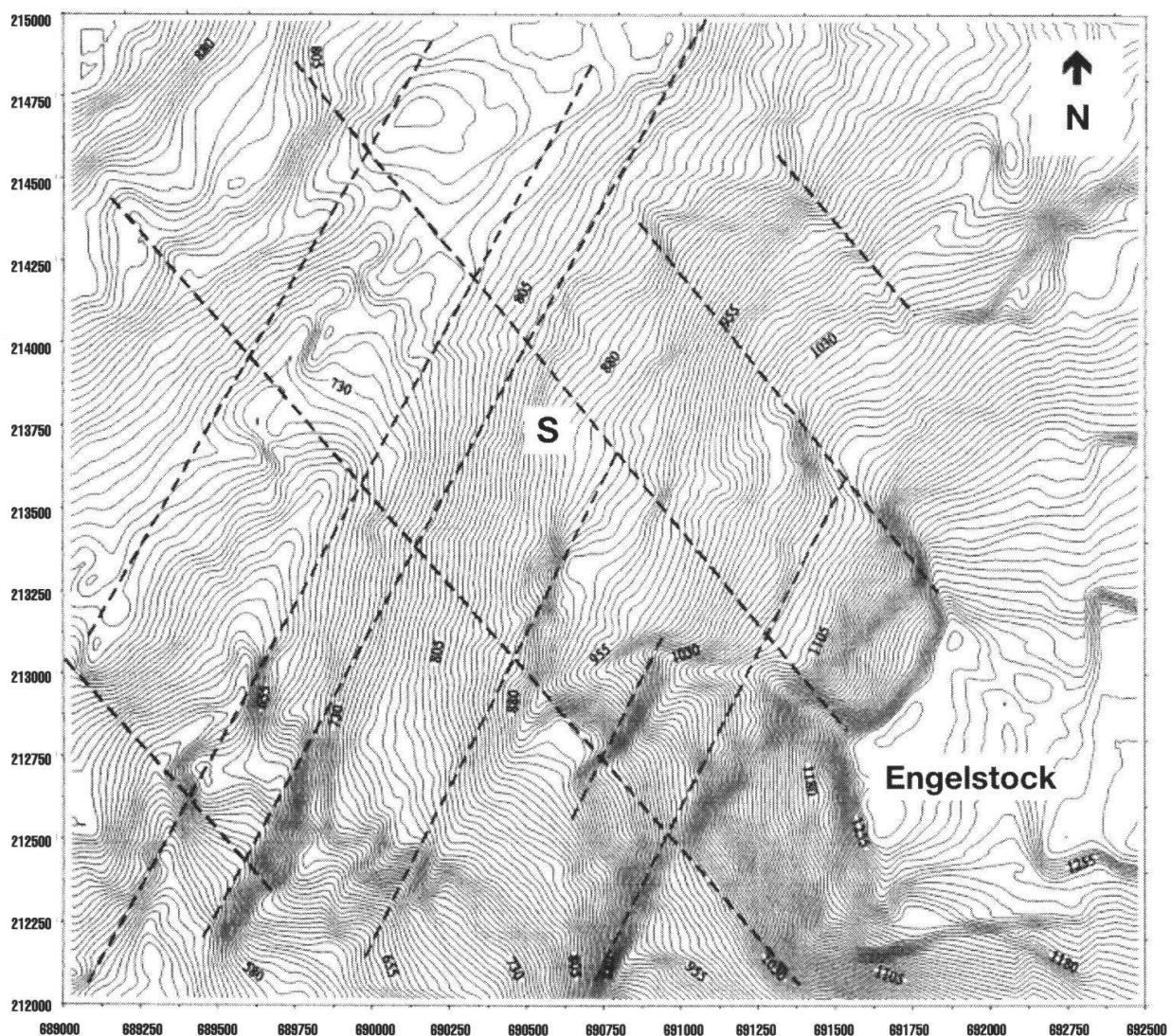


Fig. 2: Hypothetische Felsoberfläche, konstruiert mit Hilfe des Computerprogramms "Surfer for Windows". Gestrichelt eingezeichnet sind die regionalen Scherbruchsysteme (schematisiert). Die SE-NW streichende Engelstock-Zone förderte die Entstehung der Hauptrutschung Sattel (S).

- Charakteristisch ist eine Wechsellagerung zwischen harten, kompetenten Bänken (Siltstein, Sandstein, Nagelfluh, ferner der mächtige Nummulitenkalk) mit tonig-mergeligen, inkompetenten Lagen. Letztere sind selten aufgeschlossen, weshalb ihr Anteil leicht unterschätzt werden kann. R. Frei (1963) und W. Winkler et al. (1985) nehmen für den Flysch und die Untere Süßwassermolasse des Arbeitsgebiets an, dass Mergel und Tonsteine mindestens 60 % der Gesteinfolge aufbauen - eine Schätzung, welche auch mit der Zusammensetzung ihres Verwitterungsschutts übereinstimmt.
- Die kompetenten Bänke weisen eine starke, grösstenteils steilstehende Klüftung verschiedener Richtung auf, weshalb sie in grosse, polyedrische Blöcke zerlegt worden sind. Da im Gegensatz dazu die tonigen Schichten plastisch deformiert wurden, entsteht ein markanter Kontrast in der Wasserdurchlässigkeit.
- Bruchversetzungen lassen sich mangels Aufschlüssen nicht eindeutig nachweisen. Einzelmessungen an Störungen, die meist flachliegende Striemung an Rutschharnischen und die vermuteten Fliesswege des Bergwassers weisen aber

alle darauf hin, dass zwei konjugierte, steilstehende Systeme von jungen Scherbrüchen das Gebirge durchschlagen. Ihr Verlauf ist auf Fig. 2 schematisch vereinfacht dargestellt: Ein System verläuft NNE-SSW, ihm folgt z.B. die Steiner Aa südlich des Dorfes Sattel, während das andere SE-NW gerichtet ist. Für die Hauptschmelzung Sattel besonders bedeutsam dürfte dabei eine breite, stark geklütete Zone sein, welche vom Engelstock zur Eumatt nahe südlich des Dorfes Sattel zieht. In der Abrissnische NW des Engelstocks keilt die Äussere Einsiedler Schuppenzone aus, die Obergrenze der Molasse scheint im NE gehoben zu sein. Zu erwarten wäre hier eine flache, dextrale Verschiebung. Die beiden jungen Scherbruchsysteme treten regional auf und sind z.B. auch in Obwalden (C. Schindler 1980) oder im hintern Alptal zu beobachten (M. Stammbach 1988).

2.3 Verlauf der Felsoberfläche, eiszeitliche Ablagerungen

Die natürliche Topographie ist in Fig. 11 und 14 dargestellt. Auf Fig. 2 erscheint dagegen eine hypothetische Felsoberflächenkarte. Deren Konstruktion erfolgte mit Hilfe des Computerprogramms. «Surfer for Windows», wobei die Koordination mit dem Kringing-Verfahren (Kringing Quadratics) berechnet wurden. Als Ausgangspunkte dienten die kartierten Felsaufschlüsse sowie die Resultate von Bohrungen. Wo viele Auskünfte verfügbar waren (im tieferen Tal der Gehänge) bringt dieser Versuch glaubwürdige Ergebnisse, anderswo bedürfen sie einer Überprüfung.

Der Verlauf der Felsoberfläche wird teils von der fluviatilen, teils von der glazialen Erosion bestimmt, während sich Massenbewegungen nur kleinräumig auswirken. Unterhalb 760 m wurde der Lauf der Steiner Aa stark von Bacherosion geprägt, nördlich von Koordinate 213.750 (Ecce Homo - Erlirieter) dagegen wird der Talboden breiter und flacher. Ebenso wie die herauspräparierten harten Gesteinsrippen und wie kleine, übertiefe Mulden weist dies auf einen massgebenden Einfluss der glazialen Erosion. Interessanterweise benutzte der Reuss-Muotatal-Gletscher den Tallauf in umgekehrter Richtung als der Bach, stiess er doch in einer nordwestgerichteten Transfluenz gegen den Ägerisee vor, während er nordwärts bei Rothenthurm auch ins Tal der Biber überfloss (Fig. 3).

Wie von Hantke (1980) dargestellt, hinterliess der Gletscher im Maximum des Hochwürm die prächtige Seitenmoräne von Mostelberg, welche den Oberlauf eines Seitenbachs abstaute. Das Untersuchungsgebiet war damals gänzlich von Eis überdeckt, dies mit Ausnahme der Gipfelpartie des Engelstocks. Weitere, tieferliegende Seitenmoränen bei Mostelberg wurden dem Stetten- und Bremgartenstadium des Reussgletschers zugeschrieben. Das Eis schmolz daraufhin rasch zurück und hinterliess am Südrand der Eumatt (südlich des Dorfes Sattel) eine schwache Wallmoräne (von Hantke 1981 als Hurden-Gisikon-Stadium gedeutet), welche talaufwärts einen kleinen See aufstaute. Dieser wurde bald durch Schwebstoff- und Bachablagerungen gefüllt. Weitverbreitet sind Reste von Grundmoräne zu finden, während keine glazial vorbelasteten Reste von älteren Rutschungen oder von Periglazialablagerungen entdeckt wurden.

2.4 Spät- und nacheiszeitliche Vorgänge

Nach dem Stetten (Zürich)-Stadium wurde das Untersuchungsgebiet rasch eisfrei, worauf Bacherosion (besonders im Tal der Steiner Aa), Verwitterung und Hangbewegungen einsetzten. Vereinzelt ereigneten sich auch grössere Felsstürze. Bevor

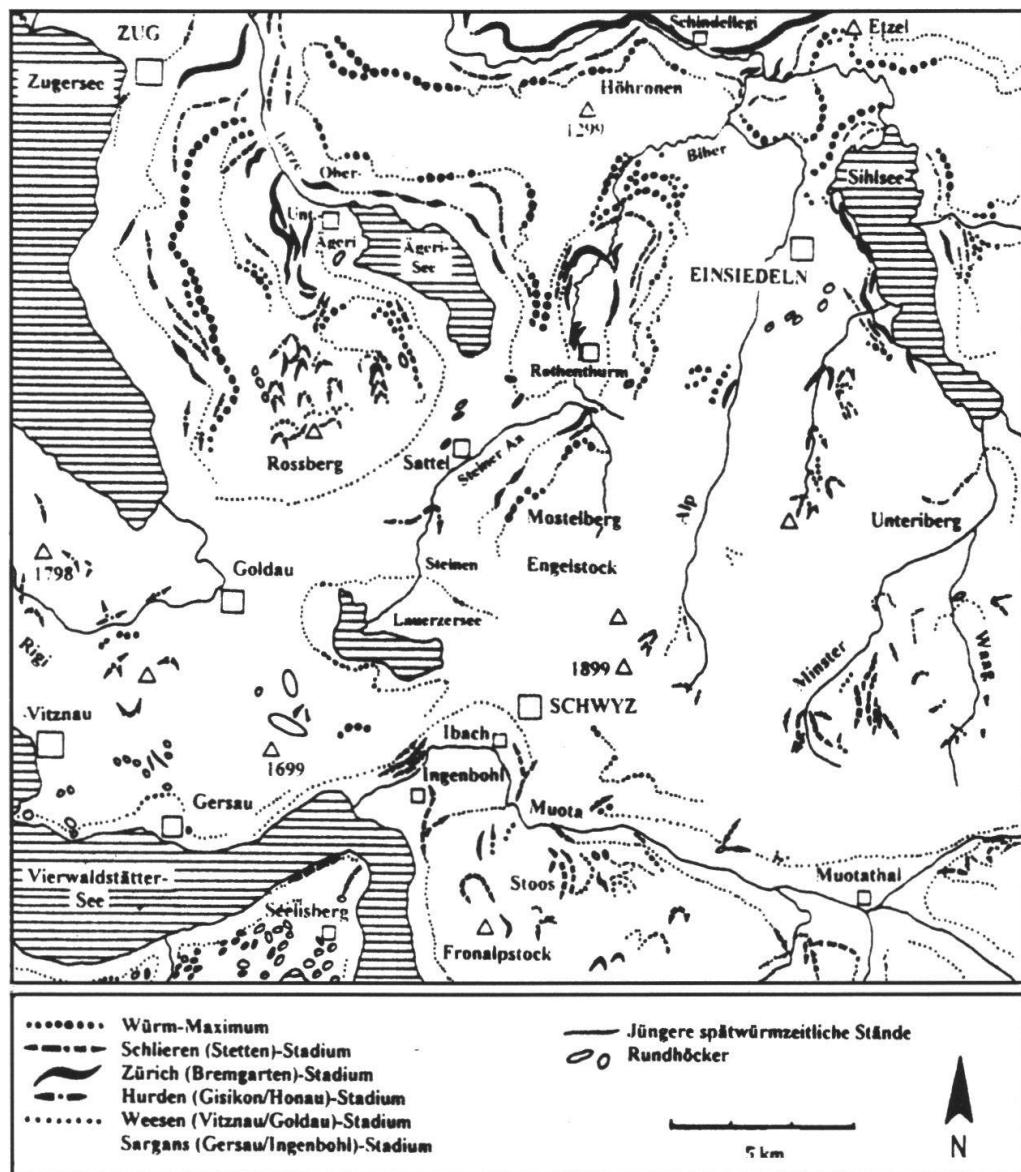


Fig. 3: Gletscherstände der Würm-Eiszeit, aus Hantke 1980.

sich eine dichte Vegetationsdecke ausbilden konnte, dürften zudem auch weitflächige Abschwemmungen stattgefunden haben. Die Kartierung des 16 km^2 umfassenden Areals ergab, dass rund 40 % der Fläche als Rutschgebiet zu betrachten ist, wovon ein Viertel mit grossen Blöcken aus Nagelfluh und Sandstein übersät ist, also einem Bergsturz ähnlich aussieht. Man kann vermuten, dass die Hangbewegungen bereits im Spätglazial einsetzen und seither in wechselnder Intensität andauerten. Eingebettete Holzreste und überfahrene Humushorizonte werden zwar in verschiedenen Bohrrapporten erwähnt, doch waren die Kerne zur Zeit unserer Untersuchungen bereits weggeworfen worden. Eine Datierung der Rutschereignisse ähnlich wie in den Freiburger Alpen (Raetzo 1997) war deshalb nicht möglich. Zahlreiche Kriechgebiete oder kleinere Rutschungen erfassten Teile der Deckenschicht aus lehmigem Gehängeschutt und z.T. vermutlich auch die darunterliegenden angewitterten Felspartien, sei dies nun Wägitalerflysch, Molasse oder Amdener-schichten. Für die vorliegende Arbeit von zentralem Interesse waren aber zwei sehr ausgedehnte komplexe Rutschungen (Fig. 4).

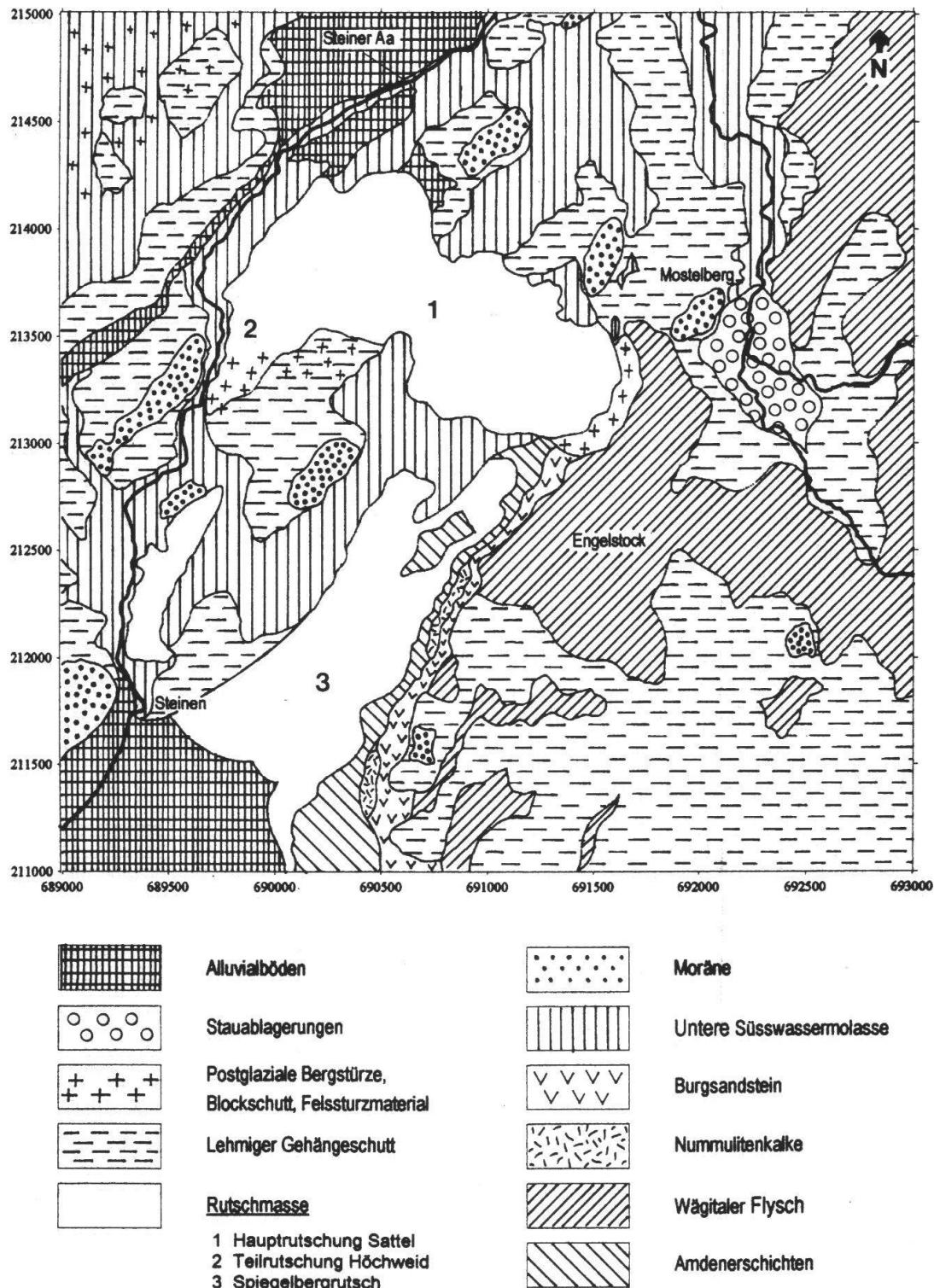


Fig. 4: Geologie des Untersuchungsgebietes.

- Bei der Spiegelbergrutschung erreicht das Anrissgebiet im «Oberen Güggel» 500 m WNW des Engelstocks Kote 1150 m, während der Fuss östlich des Dorfes Steinen den Schuttkegel der Steiner Aa randlich überdeckt (470 m). Die Rutschmasse weist bei 2.25 km Länge und einer maximalen Breite von 700 m eine durchschnittliche Neigung von 14° auf. Ihre gegen SW hin gerichtete Bahn verläuft parallel zur Grenze Äussere Einsiedler Schuppenzone / Molasse und überdeckt

diese. Orographisch rechts finden sich Aufschlüsse von Unterer Süßwassermolasse, links aber Amdenerschichten.

- Die Hauptutschung Sattel dagegen richtet sich gegen NW. Ihr Anrissgebiet erreicht in der Abigweid 250 m nördlich des Engelstocks Kote 1280 m, während der tiefste Teil der Rutschstirn um Kote 650 m im Tobel der Steiner Aa liegt. Die eigentliche Rutschmasse erreicht bei 2.1 km Länge und 800 m maximaler Breite eine mittlere Neigung von 11.5°. Das Anrissgebiet wird vom Wägitalerflysch und der Äusseren Einsiedler Schuppenzone unterlagert, die Rutschmasse von Unterer Süßwassermolasse. Während in der Spiegelbergrutschung die harten Felsrippen ungefähr in Bewegungsrichtung liegen, verlaufen sie hier stark schief zu ihr. Die Stirn der instabilen Masse kann in zwei Teile gegliedert werden (Fig. 4): Nördlich der Erlirieter läuft sie auf flachem Gelände auf, welches durch harte Rippen aus Nagelfluh oder Sandstein und dazwischenliegende Becken mit Lockergestein untergliedert wird. Weiter südlich dagegen dringt sie bis zur Steiner Aa vor und wird dort laufend erodiert, was zu einer massiven Beschleunigung der Bewegung geführt hat. Diese Teilutschung von Höchweid greift hinter die Strasse Sattel-Schwyz zurück, richtete laufend Schäden an der Strasse an und wurde deshalb besonders intensiv untersucht. Bei einer Länge von gut 400 m und einer mittleren Breite von 100 m liegt die mittlere Neigung bei 14°.

3. Sondierungen und Laboruntersuchungen

3.1 Sondierungen nahe der Strasse Sattel - Schwyz und dortige Profile

In Problemgebieten nahe der Strasse Sattel - Schwyz wurden in der Vergangenheit mehrmals Bohrungen oder Rammsondierungen abgetieft, so auch in dem von uns untersuchten Abschnitt. Zudem wurden zahlreiche Piezometer oder Slope Indicator-Rohre eingebaut und Laborproben untersucht. All diese Arbeiten erfolgten im Auftrag des Tiefbauamts des Kantons Schwyz durch private Unternehmungen und geotechnische Büros oder durch das IGB (heute IGT) der ETH Zürich (siehe Liste im Anhang).

Leider konzentrieren sich die verfügbaren Daten auf relativ kleine Areale. Sie sind von heterogener Qualität. Zudem waren alle geotechnischen Untersuchungen zur Zeit der Arbeit an der Dissertation abgeschlossen und kein Kernmaterial mehr verfügbar. Immerhin konnten an den meisten Piezometern und an einigen der Slope Indicator-Rohre Nachmessungen vorgenommen werden. Es sei kurz auf die Resultate aus den drei näher untersuchten Teilgebiete eingegangen (Fig. 5).

Adelboden-Höchweid:

Erste Untersuchungen erfolgten 1957, bis 1986 gefolgt von weiteren Kampagnen. Total wurden 35 Kernbohrungen abgetieft (wovon 18 den Fels erreichten), ferner zahlreiche Rammsondierungen. Von oben nach unten wurde dabei folgende Schichtreihe beobachtet:

0.2 - 1.0 m	Humus und humose Tone, oft von Auffüllung bedeckt
2 - 5 m	Lehmiger Gehängeschutt: Ton und Silt mit einzelnen sandigen Partien, weich-plastisch, häufig mit verwitterten Resten von Mergel. Darin regellos und meist ohne gegenseitigen Kontakt eingestreut Kies, Steine und grosse Blöcke von Molassesandstein und -nagelfluh, seltener auch alpine Gesteine (meist eindeutig aus Moräne).
0 - 4 m	Verrutschte Moräne: Siltig-tonige, wenig sandige Matrix mit wechselhafter, weicher bis relativ fester Konsistenz. Viel alpine Gesteinstrümmer, lagig aber auch nur Molasseresten.

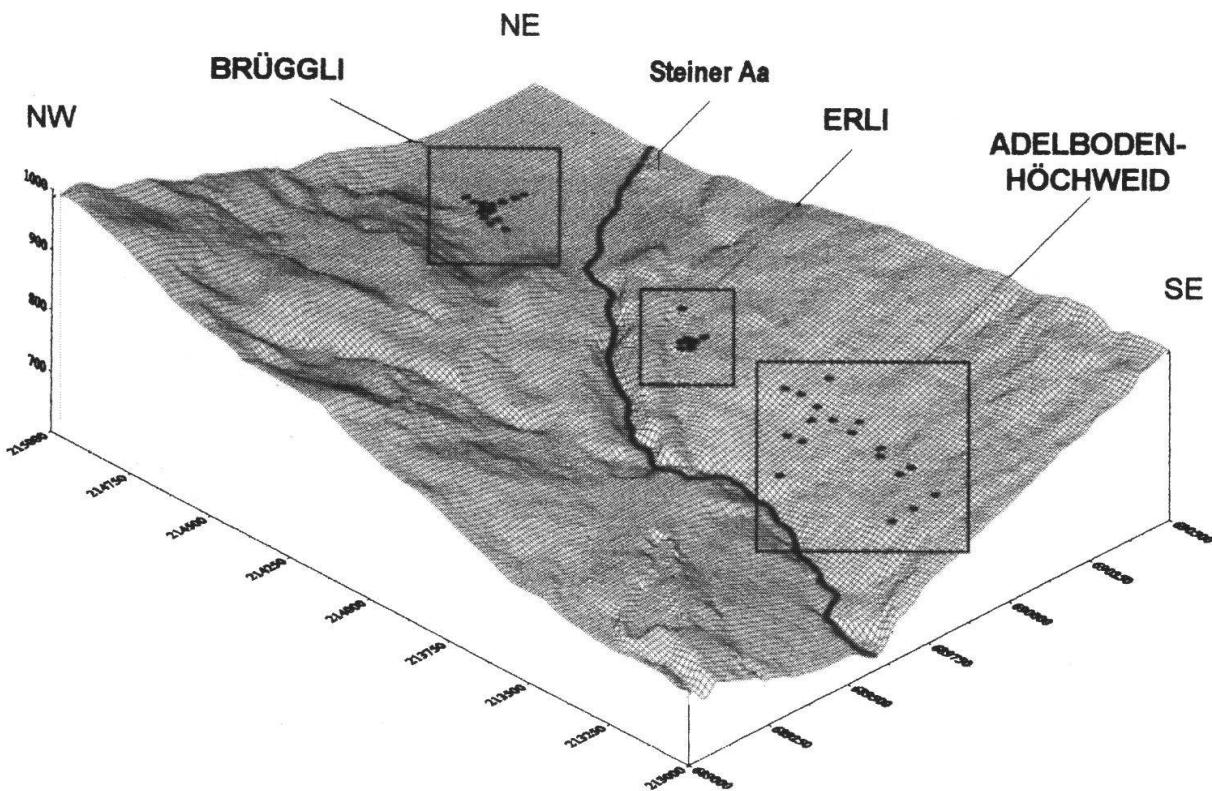


Fig. 5: Bohrstellen im Fussgebiet der Hauptrutschung Sattel und bei Brüggi (1.2 km SW von Satteldorf).

2 - 30 m Anstehende, hart gelagerte Moräne. Siltig-sandig-tonig, mit viel Kies, Steinen und vereinzelt Blöcken, darunter viel Kalk (Muotatalgletscher), selten Molasse.

1 - 6 m Angewitterte Untere Süßwassermolasse.

Gesunder Fels: Die Felsoberfläche wurde in 7.8 - 35 m Tiefe erreicht.

Die Lage der Gleitfläche(n) konnte dank Inklinometermessungen in drei Querprofilen ermittelt werden, welche von der Steiner Aa bis hinter die Strasse Sattel-Schwyz hinaufgreifen. In den beiden südlichen Schnitten erfolgte die Hauptverschiebung an der Basis des lehmigen Gehängeschutts in 4 - 5.8 m Tiefe. Zudem wurde die gleitende Masse intern plastisch verformt. Nur andeutungsweise zeichneten sich zudem Verschiebungen zwischen der verrutschten und der anstehenden Moräne ab. Im nördlichsten Profil dagegen verlagert sich die Hauptbewegungen in diesen Horizont und damit in grössere Tiefe (12 - 19 m unter OKT). Kleinere Verschiebungen sind zudem an der Untergrenze des lehmigen Gehängeschutts festzustellen. Nirgends griff eine Gleitfläche in die anstehende Moräne oder gar in den angewitterten Fels. Neben einer Verschiebung an Gleitflächen kann auch plastische Verformung beobachtet werden. Ihr Anteil an der Gesamtverschiebung variiert zwischen 0% und 77% und erreicht im Mittel 36%.

Erli:

Auch dieses Teilgebiet liegt im Fussbereich der Hauptrutschung Sattel. Es wird hier aber nicht mehr durch die Erosion der Steiner Aa beeinflusst, sondern läuft in flachem Gelände auf. Da ebenfalls Schäden an der Strasse auftraten, wurden hier 1981 acht Kernbohrungen und fünf Rammsondierungen abgetieft, wobei von oben nach unten folgende Schichtreihe festgestellt wurde:

0.3 - 1.2 m	Humus, humose Tone, Torf, sehr weich.
7 - 15.4 m	Lehmiger Gehängeschutt, tonig-siltig-feinsandig, im oberen Teil sehr weich und durchfeuchtet, im unteren deutlich fester gelagert, was auch die Rammsondierungen bestätigen. Regellos eingelagert Kies, Steine und Blöcke (Molasse und alpines Material, meist Kalke).
0.4 - 4.9 m	Angewitterte Untere Süßwassermolasse.

Gesunder Fels: Dieser wurde in 10.3 - 21.1 m Tiefe erreicht.

Inklinometermessungen ergaben, dass Gleitbewegung und interne plastische Verformung nur im oberen, durchnässten Teil des lehmigen Gehängeschutts stattfinden.

Brüggli:

Geotechnische Untersuchungen wurden 1992/93 hier angesetzt, weil der Baugrund inhomogen aufgebaut und setzungsempfindlich ist, doch liegt dieses Gebiet bereits ausserhalb des Einflussbereichs der Rutschungen. In eine glazial übertiefte und zudem von der Stirnmoräne des Gisiker Stadiums abgestaute Mulde kamen siltig-tonig-feinsandige Schwebstoffe zur Ablagerung, welche sich mit Bachschutt verzahnten und teilweise von Torf überdeckt wurden. Die darunterliegende, bis 9.4 m mächtige Moräne kann in zwei Teile gegliedert werden: Unten hartgelagerte Grundmoräne, darüber stark kiesige, eventuell etwas verschwemmte glaziale Ablagerungen. Die Untere Süßwassermolasse wurde in 2.45 - 16.15 m Tiefe erreicht.

3.2 Lage der Gleitfläche, Zusammensetzung der Rutschmassen

Im Fussbereich der Hauptrutschung Sattel greifen die heute aktiven Gleitflächen nirgends auf den Fels hinunter, sondern verlaufen innerhalb der Lockergesteinsdecke. Dies geschieht aber auf wechselhafte Weise, indem teils verrutschte Moräne über anstehende Moräne verschoben wird, teils nur der lehmige Hangschutt gesamthaft in Bewegungen ist, teils sogar nur dessen oberer, durchnässter Teil. In den meisten Fällen greifen die heutigen Gleitflächen weniger tief als dies einst der Fall war. Es ist anzunehmen, dass die höheren Partien der Rutschmasse - ob heute aktiv oder passiv - mindestens teilweise auf den Fels hinuntergreifen und die Moränendecke dort entfernt wurde. Darauf deutet der hohe Anteil an Molasse-trümmern und alpinen Gesteinen in der instabilen Masse. Diese besteht zur Hauptsache aus lehmigem Material, welches mit Kies, Steinen und Blöcken durchsetzt ist und auch ausserhalb der grossen Rutschungen verbreitet als Deckschicht auftritt. Frühere Bearbeiter haben diese als Gehängelehm oder als Gehängeschutt bezeichnet, wobei beide Bezeichnungen unbefriedigend wirken. Echter Gehängelehm - eine flächige Abschwemmung von feinkörnigem Material in vegetationsarmen Zeiten - mag lokal zwar auftreten, baut aber sicher nicht den Hauptteil der Rutschmassen auf. Mit Hangschutt verbindet sich die Vorstellung eines relativ grobkörnigen Lockergesteins, weswegen unser Komplex als lehmiger Hangschutt bezeichnet sei. Zur Hauptsache handelt es sich um verwitterten, meist verrutschten Schutt mergelreicher Gesteine mit Beimengung von Moräne. Die tonig-siltig-sandige Matrix überwiegt, weshalb die grobkörnigen Komponenten bis hin zu zimmergrossen Blöcken sich in der Regel nicht berühren.

3.3 Labordaten für den lehmigen Gehängeschutt

Bei der Ermittlung der Kornverteilung wurden die Fraktionen mit Durchmesser über 20 cm nicht berücksichtigt. Verfügbar sind 23 Proben von lehmigem Gehänge-

schutt, welche im Rahmen von Baugrunduntersuchungen im Labor analysiert wurden. Hinzu kommen 13 Proben, welche für die Dissertation aus künstlichen Einschnitten zwischen Höchweid und Erli entnommen und untersucht wurden (Fig. 6). Es ergibt sich ein recht homogenes Feld der Variation der Summationskurven, wobei der Anteil der Tonfraktion zwischen 12 % und 33 % schwankt, jener der Siltfraktion zwischen 35 % und 54 %. Die Sandfraktion erreicht 19 - 30 %, während der Kiesanteil bis 22 % steigen kann, meist aber klein ist oder fehlt.

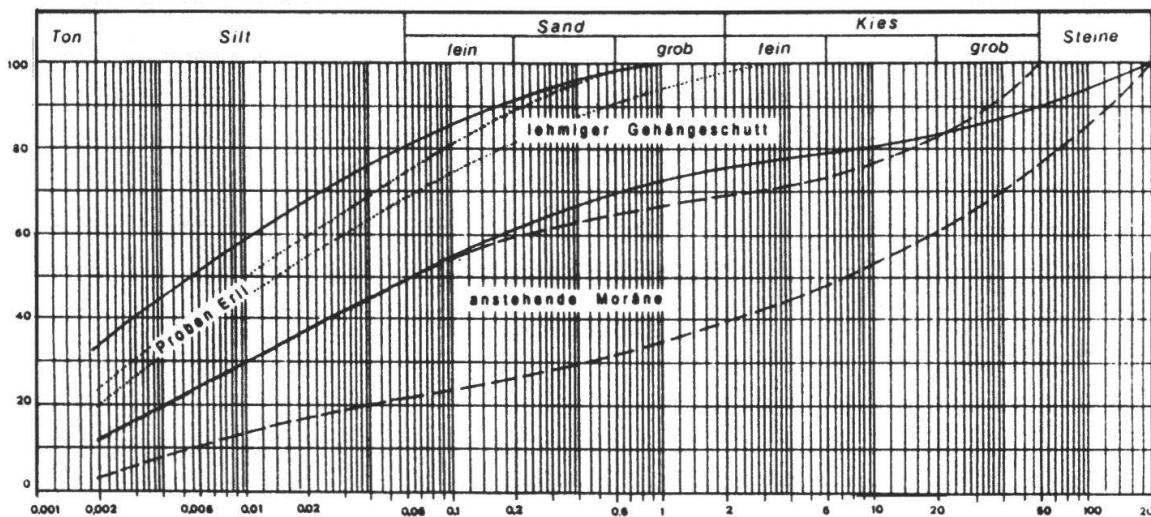


Fig. 6: Variationsbreite der Summationskurven der Fraktionen unter 20 cm Ø, Proben aus dem Gebiet Adelboden, Höchweid und Erli.

Auch die Plastizität schwankt innerhalb gut erfassbarer Grenzen, dies mit Ausnahme der zwei von uns bei Erli entnommenen Proben, welche deutlich höhere Werte ergeben.

Die tonmineralogische Zusammensetzung wurde an den 13 von uns entnommenen Proben ermittelt, dies am Tonmineralogischen Labor des Instituts für Geotechnik an der ETHZ. Der erstaunlich hohe Gehalt an hochquellbaren Tonen bei Erli dürfte auf die hier überwiegenden Verwitterungsprodukte der Mergel der USM zurückzuführen sein. Leider fehlen im Untersuchungsgebiet Daten über deren Tonmineralogie, generell aber weiß man, dass diese häufig beträchtliche, wenn auch stark schwankende Mengen von Smektit enthalten.

Herkunft Probe	Tonfraktion	Verteilung echter Tonmineralien %			Plastizität in %		
		% Gesamtprobe	Kaolinit	Illit	Smektit	Ausrollgr.	Fliessgr.
Höchweid	12 - 23	38 - 60	20 - 35	15 - 38	12.6 - 17.7	25.0 - 47.5	10.0 - 30.0
Erli	20 - 21	30 - 38	17 - 20	45 - 50	19.4 - 24.2	51.3 - 67.5	31.9 - 43.3

Tab. 1: Schwankungsbereich des Anteils Tonfraktion, der Tonmineralogie und der Plastizität bei den 11 Proben von Höchweid und den 2 Proben von Erli

Im Rahmen der Baugrunduntersuchungen bei Höchweid wurden am Institut für Geotechnik ETHZ auch vier Ringscherversuche ausgeführt, davon zwei in der Grenzschicht lehmiger Gehängeschutt/verrutschte Moräne. Sie ergaben ein ϕ' von 25.9° und 26.4° , respektive ein ϕ_R von 23.1° und 24° . Die zwei übrigen sind innerhalb der verrutschten Moräne angesetzt worden und zeigten erstaunlicherweise tieferen Werte: $\phi' 22.7^\circ$ und 23.1° resp. $\phi_R 21.8^\circ$ und 20.8° . Eine Überprüfung des Probenmaterials ist nicht mehr möglich. Wir vermuten, dass innerhalb der verrutschten Moräne Pakete von verschleppten Molassemergeln eingeschaltet waren, wie dies in verschiedenen Bohrungen beobachtet wurde. Die Gleitfläche könnte innerhalb einer solchen Einschaltung verlaufen.

3.4 Laborresultate von andern Lockergesteinen, Klassifikation

Proben von unverrutschter und verrutschter Moräne (M) wurden bei Höchweid entnommen, solche von Moräne und Seebodenlehm (S) bei Brüggli, wobei sich charakteristische mittlere Summationskurven ergaben. Die verrutschte Moräne nimmt dabei eine Zwischenstellung zum lehmigen Gehängeschutt ein.

Bei der Plastizität wurde folgender Schwankungsbereich ermittelt: Ausrollgrenze M 11.8 - 19%, S 14.3 - 22.0%. Fliessgrenze M 26.2 - 41.0%, S 33.3 - 45.1%. Plastizitätszahl M 11.2 - 22.7%, S 10.0 - 28.7%. Grundlegende Differenzen zum lehmigen Gehängeschutt sind nicht festzustellen. Fliess- und Ausrollgrenzen liegen bei den Seebodenlehmen tendenziell höher als bei den Moränen.

Vergleicht man im Plastizitätsdiagramm nach Casagrande Fliessgrenze und Plastizitätszahl (Fig. 7), so fallen - unabhängig von ihrer Entstehung - fast alle Proben in das Feld CL, dies ungefähr gleichmäßig unterteilt durch die Vertikale mit der Fliessgrenze 35%. Bemerkenswerterweise kommen die beiden Smektit-reichen Proben von Erli ins Feld CH zu liegen.

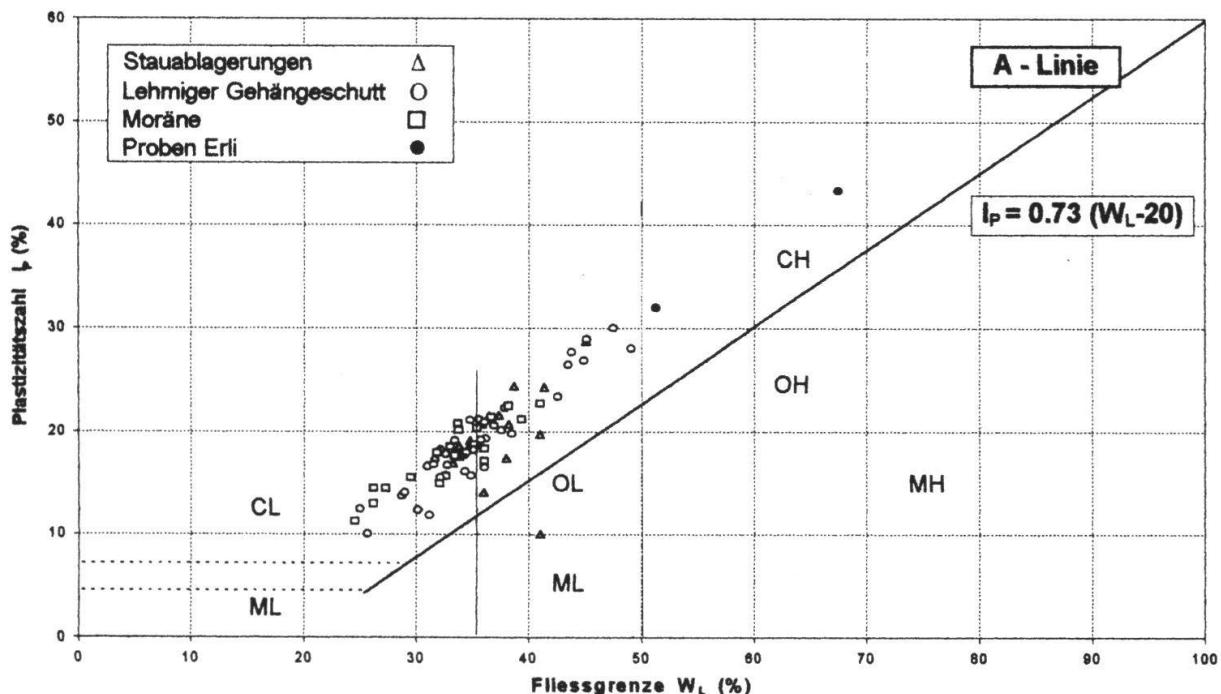


Fig. 7: Beziehung Plastizitätszahl/Fliessgrenze bei den Lockergesteinsproben von Adelboden-Höchweid, Erli und Brüggli. Wenig Unterschied nach Bodenart, alle fallen ins Feld CL. Ausnahme: Zwei Smektit-reiche Proben von lehmigem Gehängeschutt aus Erli, diese CH.

Zur Klassifikation nach USCS müssen die Grobanteile berücksichtigt werden, weshalb die anstehende Moräne zu GC-GM wird. Bei der verrutschten Moräne dürften einzelne lehmige Lagen im CL verbleiben. Es wurde die Aktivitätszahl nach Skempton ermittelt, indem die Plastizitätszahl mit dem Anteil der Tonfraktion an der Gesamtprobe verglichen wird. Wie die übrigen Böden zeigt auch der für uns besonders interessante lehmige Gehängeschutt einen sehr breiten Schwankungsbereich (0.47 - 3.4, Mittel 0.99), dies ein Hinweis auf die heterogenen Ausgangsmaterialien (USM variabler Lithologie und Tonmineralogie, alpine Gesteine, Moräne, untergeordnet Gehängelehm sowie Hang- und Bachschutt).

Wo die Tonmineralogie bekannt ist, zeigt sich eine Abhängigkeit zwischen steigendem Smektit-Gehalt und höherer Aktivitätszahl. Zudem wird aber auch die Fließgrenze generell stark erhöht, während die Ausrollgrenze nur schwach reagiert (Fig. 8).

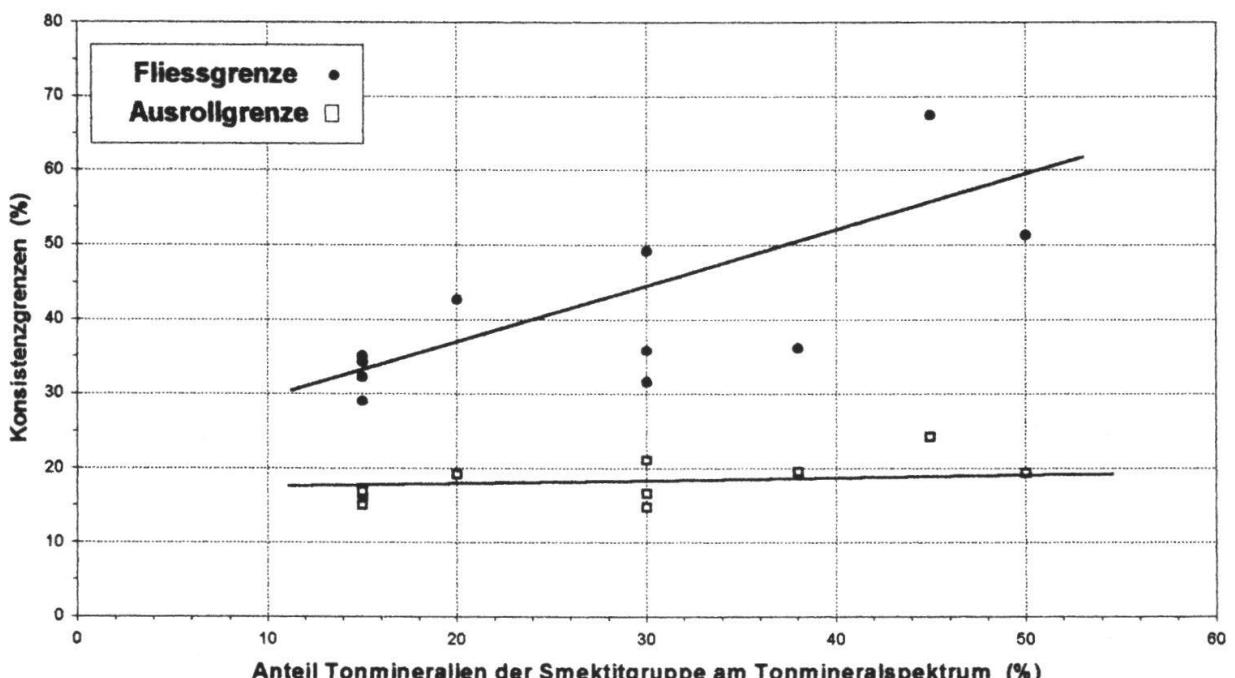


Fig. 8: Von V. Yavuz entnommene Proben von lehmigem Gehängeschutt Adelboden-Höchweid und Erli: Beziehung zwischen den Konsistenzgrenzen und dem Anteil von Smektit am Tonmineralspektrum.

4. Klima, hydrogeologische Verhältnisse

4.1 Generelle Bemerkungen

Das Einzugsgebiet des Lauerzersees umfasst eine Fläche von 69 km², wovon 28.5 km² auf die Steiner Aa entfallen. Deren Delta erreicht gut 200'000 m² Fläche. Nach Lambert und Pfeiffer (1990) konnte für die Periode 1892 bis 1989 aufgrund der Sedimentation die mittlere jährliche Ablagerungsmenge durch die Steiner Aa auf ca. 4900 m³ bestimmt werden, während deren mittlerer Jahresabfluss um 2 m³/s liegt. Die meisten der zahlreichen Seitenbäche führen ganzjährig Wasser.

Die nächstgelegene meteorologische Messstation liegt bei Sattel-Ägeri; sie meldet einen durchschnittlichen Jahresniederschlag von 1682 mm. Generell gesehen sind die Winter relativ trocken (18 % der Gesamtsumme), die Sommer dagegen feucht

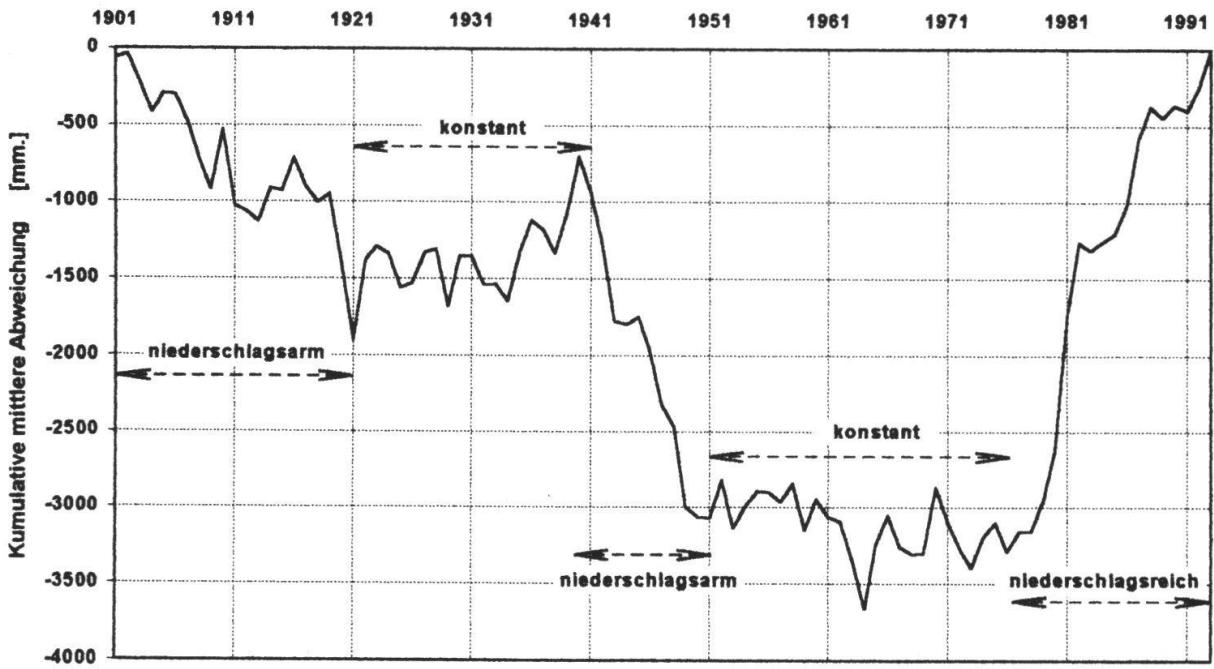


Fig. 9: Perioden relativer Nässe und Trockenheit zwischen 1901 und 1993, Messstation Sattel-Ägeri.

und oft gewitterhaft (36 % der Gesamtsumme). Frühling und Herbst liegen im Mittelfeld. Innerhalb der 93jährigen Messperiode zeichnen sich aber auch langfristige Schwankungen der Niederschläge ab. Figur 9 stellt die kumulativen Abweichungen der jährlichen Niederschläge dar. Als relativ niederschlagsarm erscheinen die Jahre 1901-1921 und 1940-1949, als gesamthaft konstant die Perioden 1922-1939 und 1950-1978. Von 1979 bis zum Ende der Beobachtungsperiode (1994) folgt eine ausgesprochen niederschlagsreiche Phase.

Die mittlere Jahrestemperatur liegt bei Sattel-Ägeri um 9.5°C. Ob sich generell infolge Klimaerwärmung eine Verkürzung der Periode mit einer Schneedecke eingestellt hat - was ähnlich zu den Freiburger Alpen die Rutschvorgänge beeinflussen könnte (Raetzo 1997) - wurde hier nicht untersucht. Klagen über die Verkürzung der Skisaison lassen dies wahrscheinlich erscheinen.

Betrachtet man die Wasserdurchlässigkeit, so erscheint der Felsuntergrund ausgesprochen anisotrop. Die inkompetenten Lagen von Mergel sind als wenig durchlässig einzuschätzen, während die kompetenten Gesteinspartien (Sandsteine und Nagelfluhen der USM, Nummulitenkalk, Sandsteine des Wägitalerflyschs) infolge Klüftung eine Wasserzirkulation erlauben. Die wasserführenden Schichten fallen gegen SSE ein. Drainierend wirken aber auch die steilstehenden Scherbruchsysteme, so gegen WNW hin die Störzone des Engelstocks.

Generell erhöhte Durchlässigkeit lässt die Auflockerungszone in den obersten Partien des Felsens erwarten, während sich die darüberfolgenden Lockergesteine sehr inhomogen und unberechenbar verhalten. Diese weisen meist eine lehmige Matrix auf, wirken also als Stauer. Ausnahmen bilden der grobe Hangschutt, Felsstürze, versackte Felspartien, aber auch sandig-kiesige Lagen oder Linsen in der Moräne, seltener im lehmigen Hangschutt. Man muss deshalb komplexe, schwer prognostizierbare Grundwasserverhältnisse und häufig eine Aufspaltung in verschiedene unabhängige Stockwerke annehmen. Tendenziell dürfte in den Rutschgebieten die Durchlässigkeit gegen den Hangfuss hin abnehmen, doch ist auch das Kräftespiel

in der Bewegung zu berücksichtigen: In Zerrungsgebieten kann viel Wasser in den Untergrund versickern, während es in Stauchbereichen tendenziell eher ausfliesst. Das Untersuchungsgebiet ist geprägt von nacheinanderfolgenden Infiltrations- und Exfiltrationsvorgängen, wobei die Wasseraustritte meist diffus erfolgen. Ausgedehnte Bereiche (Hauptrutschung Sattel: 22 %) sind flächig vernässt; häufig finden sich Hangsümpfe. Die Versickerung entlang geologisch vorgegebenen Bahnen führt zu Grundwassersystemen mit stark gespannten Spiegeln und - weiter hangabwärts - zu sekundären Quellen. Wo sich der Hang aktiv bewegt, können unterirdische Wasserwege blockiert oder umgeleitet werden. Die Situation ist deshalb labil.

4.2 Beobachtungen an Quellen

Unter den 115 auf Temperatur, elektrische Leitfähigkeit und Schüttung untersuchten Quellen lieferten 86 auswertbare Ergebnisse. Gemessen wurde in zwei Kampagnen, dies im Mai-Juni und im September-Oktober 1993. Alle Quellen führten schwach mineralisiertes Wasser (elektrische Leitfähigkeit 71 - 624 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Aufgrund ihres Verhaltens konnten zwei Typen von Wasseraustritten unterschieden werden: Eine Gruppe zeigte im Frühjahr höhere Temperaturen und Leitfähigkeit als im Herbst; die relativ stabile Schüttung dagegen war im Herbst höher. Die 34 Quellen dieser Kategorie stehen mit dem Felsgrundwasser in Verbindung und wurden deshalb als Kluftquellen bezeichnet. Die zweite Gruppe verhält sich umgekehrt, zudem variiert die Schüttung viel kräftiger. Es handelt sich hier um meist oberflächennah fliessende Grundwassersysteme, welche im Untersuchungsgebiet in der Regel an Lockergesteine gebunden sind.

4.3 Beobachtungen an Piezometern

In einem geographisch eng begrenzten Bereich der Teirlutschung Höchweid wurden in den Jahren 1984 und 1987 total über 40 Kunststoff-Piezometerkerzen eingebaut, dies in 16 Bohrungen. In den meisten Sondierungen wurden also mehrere Grundwasserstockwerke beobachtet, wobei die Spiegel nicht miteinander übereinstimmten. Glücklicherweise blieben die Piezometer auch zur Zeit der Arbeit an der Dissertation funktionstüchtig, so dass die Schwankungen des Spiegels und der Temperatur des Wassers von Juni 1992 bis Mai 1994 beobachtet werden konnten.

In Bezug auf den Grundwasserspiegel zeigte die anstehende und die verrutschte Moräne rasche und starke Schwankungen (bis zu 10.3 m, im Mittel 2.3 m), welche aber von Piezometer zu Piezometer kaum zu korrelieren sind. Die meisten Messstellen erlitten zwischen Juni und Juli 1993 einen markanten Druckabfall (bis zu 10 m), welcher sich auch andeutungsweise bei den Felsspiegeln erkennen lässt, nicht aber im darüber liegenden lehmigen Gehängeschutt. Vermutlich hängt dieses Ereignis wie auch andere Schwankungen mit internen Verschiebungen in der Rutschmasse Höchweid zusammen. Im lehmigen Gehängeschutt zeigten die Piezometer häufig Reaktionen auf intensive Niederschläge, dies aber sehr gedämpft (maximale Schwankung 1.75 m). Die Felswasserspiegel waren alle gespannt (2-19 m) und schwankten maximal 0.75 m, waren also im Gegensatz zur darüberfolgenden Moräne sehr stabil.

Auch bei den Temperaturmessungen verhielten sich die drei geologischen Einheiten verschieden (Fig. 10). Der oberflächennahe lehmige Hangschutt zeigte erwartungsgemäß die höchsten Schwankungen (bis zu 8°C, im Mittel 4°C), die Felsunterlage die niedrigsten (im Mittel 0.7°C). Die höchsten Temperaturen wurden im

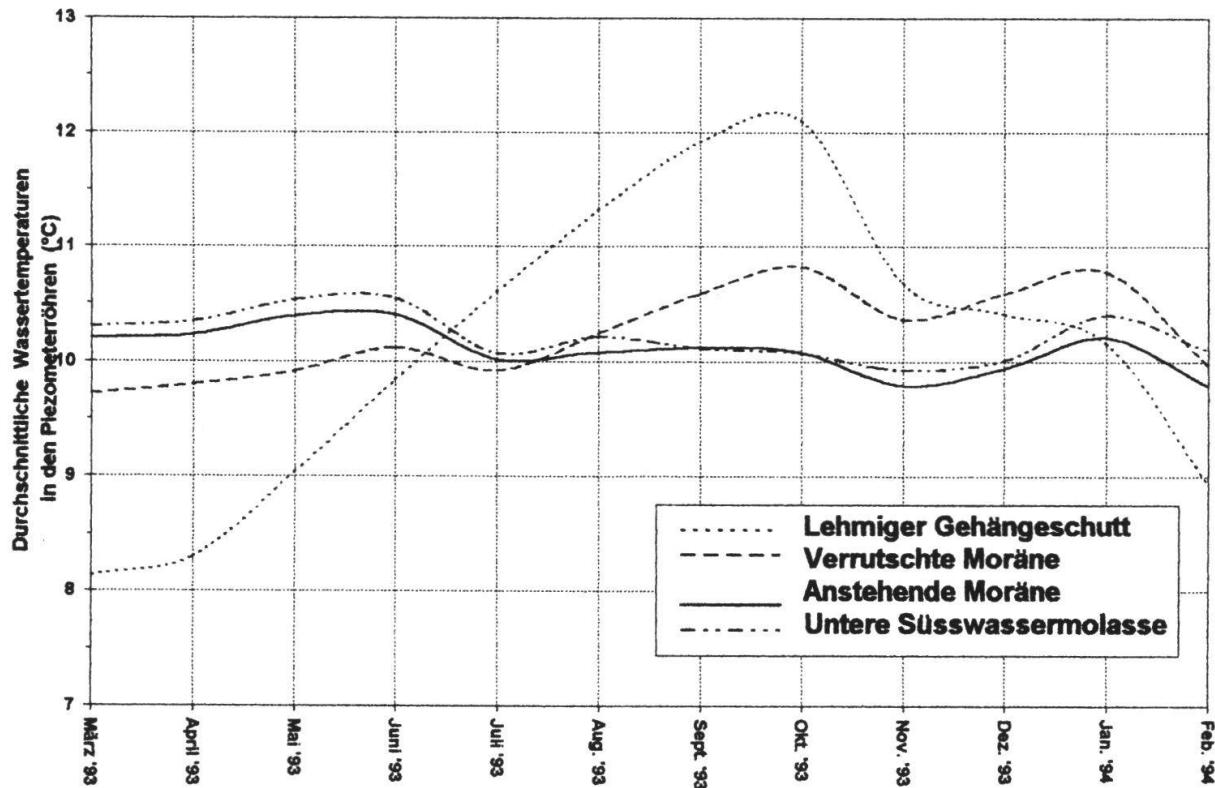


Fig. 10: Schwankungen der Grundwassertemperatur in den Bohrungen Adelboden-Höchweid. Durchschnittswerte, bezogen auf die verschiedenen Bodenarten, Messperiode März 1993 bis Februar 1994.

lehmigen Gehängeschutt im Oktober, die tiefsten im Mai gemessen, was gegenüber den Lufttemperaturen einer Verzögerung von 2-3 Monaten entspricht. Im Molassefels und in der anstehenden Moräne steigt diese auf 9-10 Monate (Maximum zwischen Mai und Juni, Minimum im November). Eine Zwischenstellung nimmt die verrutschte Moräne ein, deren Temperaturschwankungen mehrere Extrema aufweist und sowohl von oben wie von unten her beeinflusst scheint. Die mittleren Schwankungen erreichen hier 1.1°C, sind also niedrig.

Aufgrund dieser Beobachtungen ist für den Bereich Höchweid anzunehmen, dass nur wenig Grundwasser durchfliesst, dies konzentriert auf einzelne lokale Bereiche mit höherer Durchlässigkeit und mit meist gespannten Spiegeln. Die Decke aus dem gesamthaft gesehen sehr wenig wasser durchlässigen Gehängeschutt schirmt dabei den hydrogeologisch anisotropen und inhomogenen tieferen Untergrund aus Moräne und Molassefels teilweise ab.

5. Deformationsanalyse mittels Verschiebungsmessungen

5.1 Verschiebungsmessungen mit Hilfe von GPS und von Photogrammetrie

Eines der wichtigsten Ziele dieser Arbeit war die räumliche Erfassung der Hangbewegungen. Hierzu wurden 15 bestehende Triangulationspunkte sowie 187 aufgrund geologischer Kriterien ausgewählte neue Punkte im Untersuchungsgebiet signalisiert und in Zusammenarbeit mit dem Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der ETHZ (IGP) eingemessen. Das Netz von Triangulationspunkten wurde 1925

eingerichtet, wobei einzelne Punkte in der Zwischenzeit nachkontrolliert wurden. Alle Koordinaten wurden durch das IGP vorerst mit Hilfe von GPS überprüft, wobei sich gegenüber den konventionell ermittelten Daten Differenzen bis zum Zentimeterbereich ergaben. Drei Punkte allerdings lagen eindeutig auf Rutschmasse, wie dies die hangabwärts gerichtete Verschiebung um mehrere Dezimeter bis über 1 m sowie die geologische Kartierung zeigten.

Im Sommer 1992 wurden 187 neue Messpunkte eingerichtet (Figur 11), wobei jeweils ein 70 cm langes Rohr aus Kunstharzstein in den Boden versenkt wurde. Es sollte damit eine genügende Verankerung in die Tiefe gewährleistet sein. Auch sollten die Punkte wieder aufgefunden werden können. Das Untersuchungsgebiet wurde durch den Flugdienst der Eidgenössischen Flugdirektion am 20.8.1992 sowie am 24.7.1993 in sechs Streifen mit 60 % Längs- und Querüberdeckung beflogen. Der Bildmassstab liegt bei 1:4700. Die Aufnahme erfolgte mit einer Weitwinkelka-

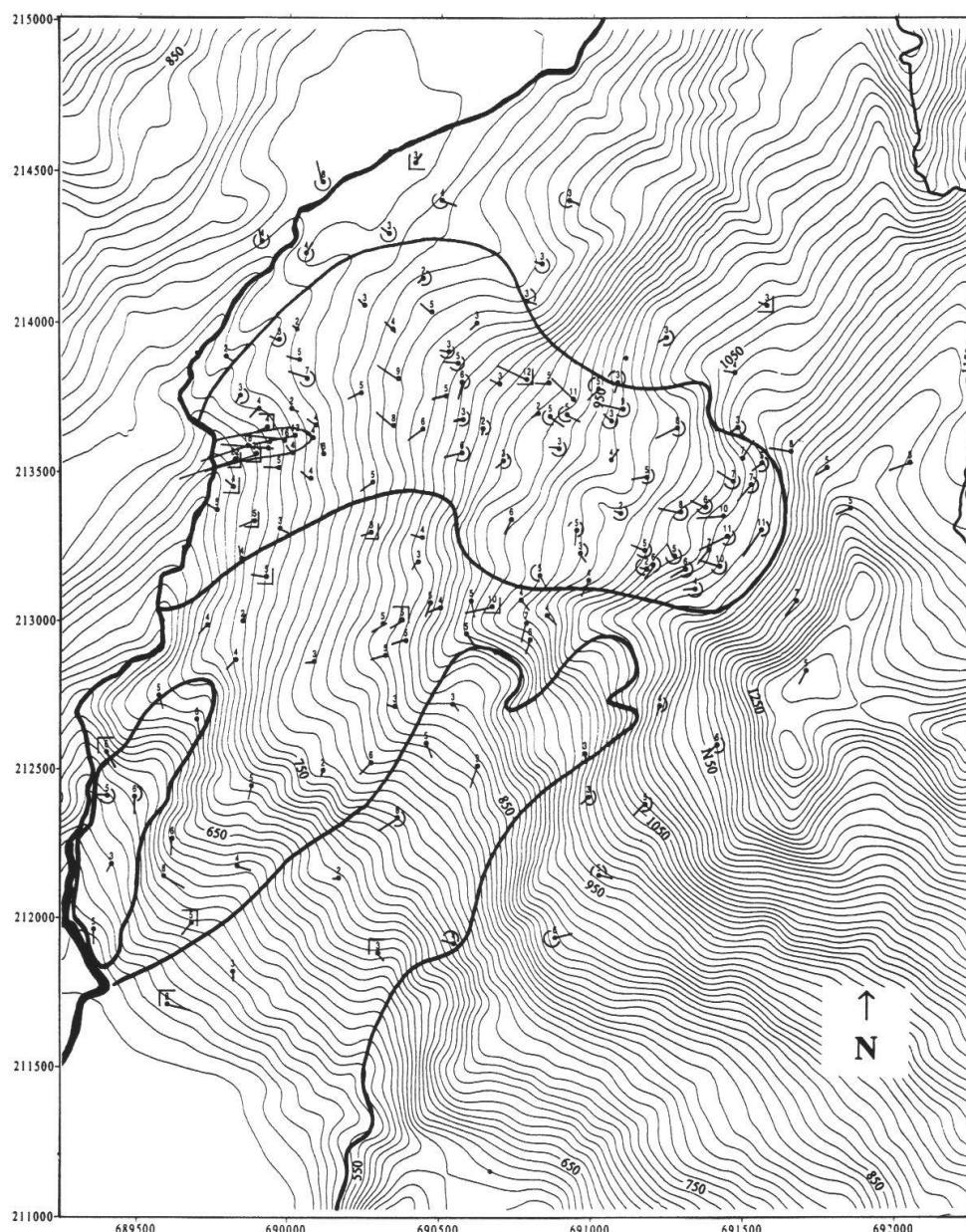


Fig. 11: Photogrammetrische Verschiebungsmessungen 1992/93. (Verschiebungen in der Horizontalen in cm, in der Vertikalen falls 6 cm und mehr: ↘ = Setzung, ⌈ = Hebung.

mera Wild RC 20^{1/4}. Die photogrammetrische Auswertung erfolgte durch Herrn Th. Kersten vom IGP. Leider beschränken sich unsere Messungen auf eine einzige Periode von 340 Tagen. Eine Wiederholung, z.B. nach fünf Jahren, wäre zwar wünschenswert, liegt aber jenseits des zeitlichen Rahmens dieser Arbeit. Wie im nächsten Kapitel dargelegt, wurde versucht, dieses Handicap durch die Auswertung älterer Luftbilder teilweise auszugleichen. Die photogrammetrische Bearbeitung der Aufnahmen 1992 und 1993 ergab eine theoretische Genauigkeit von 1.5 cm in der Horizontalen und von 3.0 cm in der Vertikalen. Nimmt man für die Auswertung Horizontalverschiebungen ab 4 cm/Jahr bzw. Vertikalverschiebungen ab 6 cm/Jahr als massgeblich an, so ergeben glücklicherweise die Mehrzahl unserer Punkte eindeutige Bewegungen (Figur 11).

Horizontalverschiebungen: Das wichtigste Untersuchungsobjekt, die Hauptrutschung Sattel, weist mit wenigen Ausnahmen eindeutige, talwärts gerichtete Bewegungen auf. Diese erreichen im obersten Teil der Rutschung Werte bis zu 11 cm, verringern sich talwärts vorerst, um dann im Bereich der Schwelle um 930 m ü.M. teilweise wieder bis auf 12 cm anzuwachsen. Gegen den Fussbereich hin schwinden sie auf 4 - 7 cm, dies mit der Ausnahme der besonders aktiven Teilrutschung Höchweid, wo eine jährliche Verschiebung von bis zu 22 cm festgestellt wurde. In Übereinstimmung mit den Feldbeobachtungen greifen diese raschen Bewegungen nur wenig über die Strasse Sattel-Schwyz zurück. Schlecht zu erfassen war infolge starker Waldbedeckung das Bewegungsbild der Rutschung Spiegelberg, doch bewegt sich ihre obere Hälfte eindeutig, wobei die Verschiebung - wie auch an Ort und Stelle zu beobachten - weit in den nördlichen Ast der Abrissnische hinaufgreift. Talseits gerichtete Bewegungen in der Grössenordnung von 4 - 5 cm/Jahr lassen sich aber auch ausserhalb der grossen Rutschgebiete feststellen, dies in Bereichen, wo auf der geologischen Karte lehmiger Gehängeschutt oder sogar Fels unter dünner Schuttbedeckung angegeben ist. Zweifellos ist ein Grossteil des Geländes als potentiell instabil einzuschätzen, wobei häufig plastische Verformungen nicht klar von eigentlichen Gleitvorgängen unterschieden werden können.

Höhenverschiebungen: Schaltet man Vertikalbewegungen unter 6 cm aus, so senkte sich trotzdem eine beachtliche Zahl von Punkten bis maximal 12 cm/Jahr. Erstaunlicherweise zeigte eine noch grössere Zahl aber eindeutige Hebungen, dies um bis zu 15 cm/Jahr. Vorerst wurden Mess- oder Interpretationsfehler vermutet, doch bestätigte eine eingehende nochmalige Überprüfung durch das IGP die Resultate. Ebenso konnten Zweifel an der Stabilität der Messpunkte beseitigt werden. Theoretisch bestand zum Beispiel die Möglichkeit einer Hebung von Vermessungspunkten durch die Bildung von Frostlinsen während des Winters. Bei deren Abschmelzen wäre die Hebung nur teilweise rückgängig gemacht worden. Verschiedene der Punkte mit starken Hebungen lagen aber im Randbereich von Asphaltstrassen, an welchen keinerlei rezente Verformungen erkennbar waren, so dass diese Möglichkeit ausgeschlossen werden kann. Die Hebungsbewegungen entsprechen demnach einer Realität, wobei auffällt, dass grössere Areale sich analog verhalten (Figur 11). Betrachtet man die Hauptrutschung Sattel, so steigt ihr oberer Teil bis hin zur Schwelle auf. Ebenso hebt sich tendenziell der nördliche Teil des Fusses, während dessen südlicher Teil tendenziell absinkt, dies insbesondere in der Teilrutschung Höchweid. Die übrigen unstabilen Bereiche können leider nur lückenhaft erfasst werden, wobei sich die Zahl steigender und sinkender Punkte ungefähr die Waage halten. Eine gesamthafte Deutung der Bewegungsabläufe soll im abschliessenden Kapitel gegeben werden.

5.2 Photogrammetrische Auswertung älterer Luftbilder

Analog dem Vorgehen beim Projekt DUTI der ETH Lausanne (1985) wurde versucht, unsere einjährigen Messungen durch die Analyse älterer Luftbilder zu kontrollieren und in die Vergangenheit zurückzuverfolgen. Vier Serien von Aufnahmen waren verfügbar, doch erwies sich deren Auswertung mit steigendem Alter als zunehmend problematisch, weshalb nur die Bilder aus den Jahren 1971 und 1983 ausgewertet wurden. Schwierig war das Auffinden eindeutig identifizierbarer Punkte. Verwendet wurden schliesslich 56 Ecken von Gebäudedächern. Die dabei erreichte Messgenauigkeit ist aber wesentlich geringer als bei signalisierten Punkten. Zudem können Häuser baulich verändert werden. Ungünstig wirkte sich der im Vergleich zu den Aufnahmen 1992/93 viel kleinere Bildmaßstab aus. Die Kummulation von Hangbewegungen über 22 Jahre war dagegen ein positiver Faktor. Die photogrammetrische Auswertung übernahm wiederum in verdankenswerter Weise Herr Th. Kersten vom IGP. Gegenüber der Kampagne 1992/93 war die Punktedichte viel geringer und die Präzision kleiner, weshalb die Resultate nur als Hinweis und als Ergänzung zu den Resultaten von 1992/93 zu bewerten sind.

Horizontalverschiebungen: Auswertbare Ergebnisse lieferte insbesondere die Messperiode 1971-1983 für die Hauptrutschung Sattel. Durchschnittlich hat sich hier der obere Teil bis hinunter zum Schwellenbereich um 4 - 9 cm/Jahr verschoben, der nördliche Fussbereich um 3-5 cm/Jahr. Die Periode 1983-1993 ergibt eher kleinere durchschnittliche Verschiebungen; zudem weist deren Richtung häufig starke Komponenten quer zum Hang auf. Für die übrigen unstabilen Gebiete sind die Resultate für eine Auswertung gesamthaft gesehen allzu lückenhaft und widersprüchlich, was auch für die Vertikalverschiebungen gilt.

Vertikalverschiebungen in der Hauptrutschung Sattel: Durch allerdings nur wenige Punkte belegt ergibt die Messperiode 1971-1983 ähnliche Tendenzen wie 1992/93, das heisst Hebung in der oberen Hälfte der Rutschmasse und teilweise im nördlichen Teil des Fusses, weiter südlich und bei der Teirlutschung Höchweid dagegen Senkung. Interessanterweise zeigte dagegen der Zeitraum 1983-1993 ein umgekehrtes Verhalten. So erfolgten insbesondere in der oberen Hälfte der Rutschmasse starke Setzungen, im südlichen Fussbereich dagegen zum Teil Hebungen.

Bewertung der Resultate: Die Auswertung älterer Luftbilder erwies sich als schwierig und lieferte nur teilweise auswertbare Resultate. Ausserhalb der Hauptrutschmasse Sattel sind einzelne Ergebnisse geologisch gesehen kaum erklärbar (Rutschbewegungen hangaufwärts, Verschiebung von höchstwahrscheinlich stabilen Felspunkten), wobei der Grund vielleicht bei Veränderungen an den eingemessenen Gebäuden zu suchen ist. Trotz allen Vorbehalten scheinen folgende Aussagen für die Hauptrutschung Sattel möglich zu sein:

- 1971-1983 erfolgten Horizontalverschiebungen nach gleichem Muster wie 1992-1993, doch wiesen diese kleinere jährliche Durchschnittsgeschwindigkeiten auf. Leider bleibt unbekannt, wie sich die Bewegungen im Detail über 12-Jahresperiode verteilt haben. Berücksichtigt man die langjährige Variation der Niederschlagsmengen (Figur 9), so lässt sich vermuten, dass die zwischen 1979 und 1982 beobachtete Abfolge ungewöhnlich regenreicher Jahre eine Beschleunigung oder gar eine Neubelebung der Rutschmassen bewirkte. Der Hauptteil der Verschiebungen zwischen 1971 und 1983 erfolgte wahrscheinlich während jener Periode. Die Bewegungen zwischen 1983 und 1993 erreichen im Durchschnitt bescheidene Werte, doch kann aus kontinuierlichen Messungen wie auch aus Feld-

beobachtungen abgeleitet werden, dass ab 1992 erneut eine Beschleunigung eintritt. Berücksichtigt man Perioden von einem Jahrzehnt und mehr, so ergeben sich für die Hauptrutschung Sattel sehr starke Schwankungen der Verschiebungsgeschwindigkeit.

- Senkungen bzw. Hebungen erfassen gleichzeitig bedeutende Teile des instabilen Terrains, doch wandern diese Felder, so dass zum Beispiel im oberen Teil der Hauptrutschung abwechselungsweise eine sinkende oder eine steigende Vertikal-komponente ermittelt werden kann. Leider erlauben die verfügbaren Unterlagen keine näheren Aussagen über Ablauf und Geschwindigkeit dieser Vorgänge.

5.3 Kontinuierliche Distanzmessungen über eine aktive Scherfläche

In der Regel wird die Verschiebung eines Geländes durch periodische Beobachtung von Vermessungspunkten beobachtet, dies je nach Bedürfnis und Möglichkeit in Abstand von Tagen bis zu mehreren Jahren. Zur Abklärung des Rutschmechanismus äußerst wertvoll wäre aber zudem eine kontinuierliche Aufzeichnung der Bewegungen, dies vorzugsweise über eine stark aktive, in der Falllinie verlaufende Scherfläche. Dank der tatkräftigen Unterstützung der Firma Veramess in Brugg konnte der Prototyp einer solchen Messanlage im Rahmen unseres Projekts eingesetzt und von Ende Januar 1991 bis April 1994 getestet werden. Für den Versuch ausgewählt wurde der südliche Rand der Teilarutschung Höchsweid, welcher unterhalb der Strasse Sattel-Schwyz als scharfe Grenzfläche identifiziert werden kann. Nördlich dieser Stelle wurden 1992/93 jährliche Verschiebungen von 20 - 22 cm gemessen, südlich dagegen von nur 4 - 5 cm. Dank zahlreicher, teilweise mit Inklinometer ausgerüsteter Bohrungen ist das geologische Profil bekannt und man weiß, dass in 4 - 6 m Tiefe an der Basis des lehmigen Gehängeschutts eine scharfe Gleitfläche auftritt. Über ihr zeichnen sich aber zusätzlich bescheidene plastische Verformungen ab.

Zur Messung kann ein dünnes Kabel aus Kevlar oder aus Invardraht verwendet werden. Das eine Ende des Kabels wird fixiert, das andere über eine Messrolle geführt und mit einem Gewicht gespannt. Der Winkel der Drehung der Messrolle ist das Maß für die Änderung der Messdistanz. Er wird durch einen Drehpotentiometer mit hohem Auflösevermögen (0.007°) aufgenommen. Alle Messwerte liegen vorerst als elektrische Widerstände vor und werden durch einen Analog-Digital-Wandler in Digitalwerte umgewandelt (H. Aeschlimann, A. Bühlmann, M. Rutschmann 1991). Voraussetzung für gute Messergebnisse sind einerseits möglichst kurze Messstrecken mit einwandfreier Fixierung der Enden, andererseits die Verwendung von korrosionsresistenten Kabeln, welche auf Temperatur- und Feuchtigkeitsschwankungen unempfindlich sind. Um dies besser kontrollieren zu können, wurde am Messpunkt auch die Lufttemperatur kontinuierlich registriert.

Eine erste Versuchsperiode ergab, dass die vorerst verwendeten Kevlarkabel in störender Weise auf klimatische Schwankungen ansprachen und deshalb durch Invardraht ersetzt werden mussten. Zur besseren Kontrolle und Absicherung der Messergebnisse wurde beschlossen, vom gleichen Messpunkt aus Drähte in zwei Richtungen schief über die Scherfläche zu spannen (Figur 12), wobei eine der beiden Strecken sich allmählich verkürzte, die andere verlängerte. Beide Massnahmen bewährten sich, so dass vom Dezember 1991 bis zum Abbruch der Apparaturen im Oktober 1994 zuverlässige Ergebnisse vorliegen, dies trotz einigen Messunterbrüchen (Figur 13). Während diesen 35 Monaten änderte sich die Länge der Messstrecken um je 48 cm, was einer sinistralen Verschiebung von 68 cm entlang der Scherfläche entspricht.

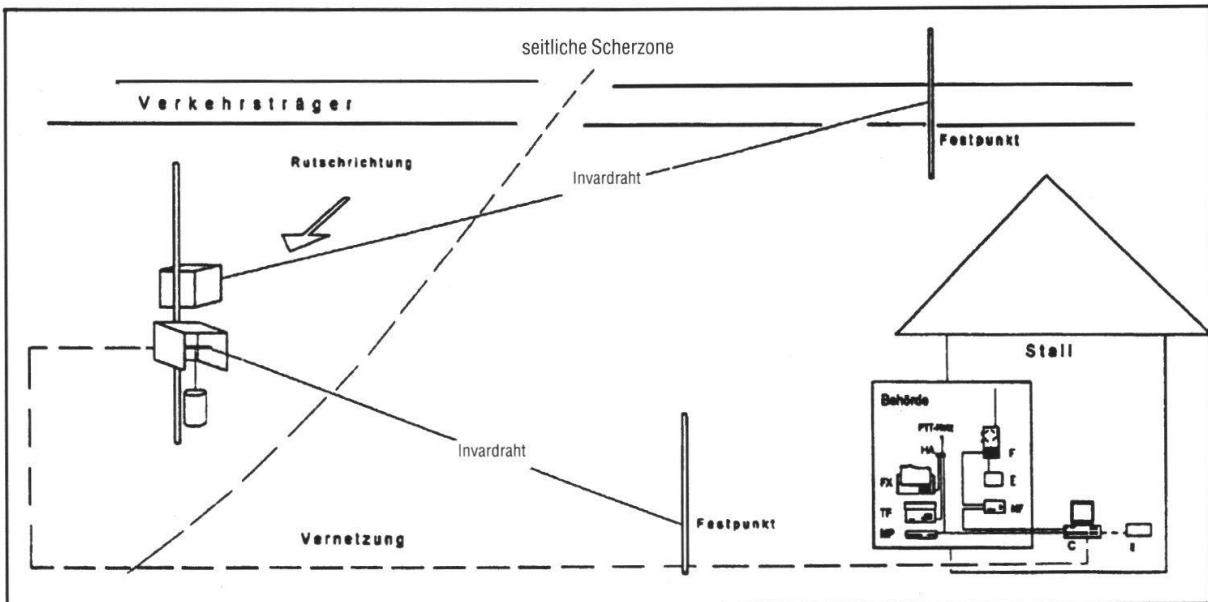


Fig. 12: Schematische Darstellung der Messanlage Veramess in Höchweid zur kontinuierlichen Registrierung der Verschiebungen entlang einer Scherfläche.

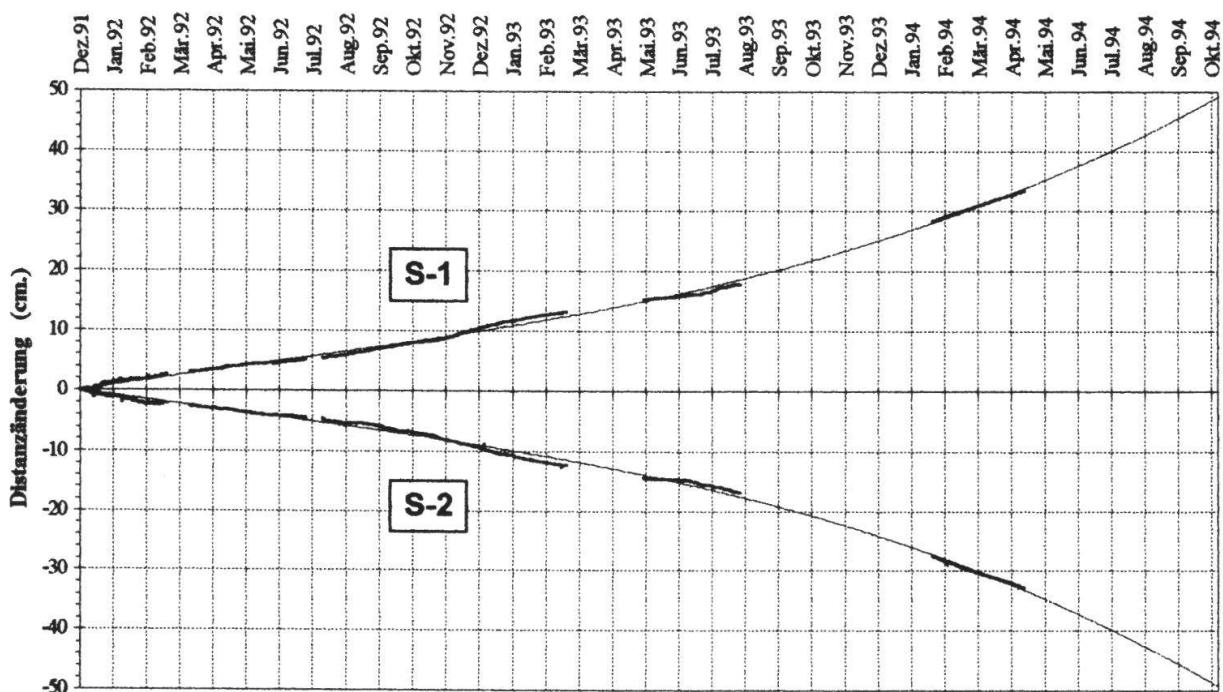


Fig. 13: Relative Distanzänderung der beiden Messstrecken der Veramess-Anlage Höchweid.

Betrachtet man das Resultat der kontinuierlichen Messungen, so fällt die Gleichmäßigkeit der Bewegungen auf, welche nie gänzlich aussetzen und nicht ruckartig, sondern stetig erfolgten. Gesamthaft gesehen ergeben die Messungen ein Bild von erstaunlicher Ausgeglichenheit. Trotzdem fallen innerhalb der intensiv beobachteten Periode (bis Ende Juli 1993) saisonale Schwankungen auf, welche den mittleren monatlichen Niederschlägen und Temperaturen der Wetterstation Sattel-Aegeri sowie den bei Höchweid 1992/93 gemessenen Werten gegenübergestellt seien (Tabelle 2):

Jahr	1991	1992												1993								
Monat	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	
Verschiebungen	erhöht				erniedrigt								erhöht				erniedrigt				mittel	
Monatliche Niederschläge Messstation Sattel Mittel 1900-1994 (mm)	109	107	95	109	134	154	204	202	198	143	113	112	109	107	95	109	134	154	204	202	198	
Monatliche Niederschläge Messstation Sattel (mm)	223	16	164	294	143	65	123	163	220	112	162	266	98	102	35	68	149	123	219	438	192	
Mittl. monatliche Temperaturen Höchweid Mittel 1991-1994 (°C)	0.5	1.2	1.0	7.0	6.3	14.7	16.3	18.9	20.7	14.7	8.1	4.9	0.5	1.2	1.0	7.0	6.3	14.7	16.3	18.9	20.7	
Mittl. monatliche Temperaturen Höchweid (°C)	-1.8	-1.9	0.6	5.3	8.3	14.4	15.5	20.9	20.7	14.4	8.0	6.1	1.5	3.2	0.0	5.2	8.2	15.0	17.0	16.9	20.6	

Tab. 2: Niederschlags- und Temperaturmessungen der Stationen Sattel und Höchweid 1991-93.

Kurzfristige Reaktionen auf Extremniederschläge waren nicht zu beobachten. Längerfristige grosse Überschüsse wie im Dezember 1991, im Februar/März 1992, im Oktober/November 1992 und im Juli 1993 scheinen dagegen die Verschiebungen zu fördern. Interessanterweise traten die Perioden erhöhter Geschwindigkeit in der kühlen Jahreszeit auf, trotzdem dann durchschnittlich bedeutend weniger Niederschläge anfallen als im Sommer. Dies dürfte mit der geringeren Verdunstung und der schwachen Evapotranspiration im Herbst und Winter zusammenhängen. Alle Reaktionen erfolgen sehr gedämpft und etwas verzögert.

Diesen Schwankungen übergeordnet zeigen die Verschiebungsmessungen zudem die Tendenz zu langfristiger Beschleunigung der sinistralen Scherung gegenüber der sich nur um 4 -5 cm/Jahr verschiebenden Umgebung:

Dez. 1991 - Nov. 1992 13.5 cm/Jahr,
 Dez. 1992 - Nov. 1993 21.2 cm/Jahr,
 Dez. 1993 - Nov. 1994 33.0 cm/Jahr (stark extrapoliert).

Das Ausmass der Relativbewegungen stimmt mit den 1992/93 photogrammetrisch ermittelten Verschiebungen überein. Rasch zunehmende Schäden an der Strasse im Anrißbereich der Teirlutschung bestätigen, dass in der Periode 1991-1994 die Verschiebungen massiv anwuchsen. Diese Zeitspanne entspricht einer Folge von ungewöhnlich regenreichen Jahren.

6. Zusammenfassung und Interpretation

Im Untersuchungsgebiet findet sich eine heterogene Abfolge von Gesteinen, deren Schichtflächen 30-60° steil gegen SSE hin abfallen. Im Liegenden findet sich wenig gestörte subalpine Molasse. Die darüberfolgende Äussere Einsiedler Schuppenzone und der Wägitaler Flysch dagegen sind teilweise intensiv zerschert und gestört.

Allen tektonischen Zonen gemeinsam ist eine Wechsellagerung zwischen harten, kompetenten Bänken (Sandstein, Nagelfluh, Kalk) und inkompetenten tonreichen Gesteinen, welche mindestens 60 % des Gebirges aufbauen. Die kompetenten Lagen können dank ihrer Klüftigkeit Bergwasser führen. Bedeutenden Einfluss auf die Wasserführung wie auch auf die Standfestigkeit des Gebirges haben zudem die steilstehenden, NNE-SSW und SE-NW verlaufenden Scherbruchsysteme. Eine breite derartige Zone zieht vom Engelstock gegen NW, drainiert das Bergwasser in jene Richtung und dürfte für die Entstehung der Hauptschlucht Sattel mitverantwortlich sein.

Das heutige Gelände wurde durch eine Kombination von fluviatiler und glazialer Erosion geprägt. Zudem hinterliess die letzte Eiszeit eine heute lückenhaft gewordene Decke von Moräne, lokal zudem verschwemmte Sedimente und Stauablagerungen. Ende des Hochwürm wurde das gesamte Untersuchungsgebiet eisfrei, worauf die Erosion durch die Bäche einsetzte, Felsstürze niederbrachen und lokal Gehängelehm entstand. Im Spät- und Postglazial wurden die meist nur mässig geneigten Hänge zunehmend instabil, dies infolge der mergelreichen Gesteinsunterlage, des bedeutenden Anfalls von Bergwasser und der hohen Niederschläge. Die geologische Kartierung und die geodätischen Messungen zeigen, dass rund 40 % der Hänge flächenhaften Rutschgebieten entsprechen. Zusätzlich werden aber mindestens weitere 20 % des Gebiets von kleinräumigeren, langsamen, vermutlich wenig tiefgreifenden Bewegungen erfasst. All diese Verschiebungen erfolgen schief oder quer zum Verlauf der Schichtflächen, dies im Gegensatz zum Beispiel zum Abrissgebiet des Bergsturzes von Goldau.

Die Hangbewegungen führten zur Bildung einer weichgelagerten Deckschicht, welche einerseits feinkörnige Lockergesteine und viel Zerfallsprodukte der mergeligen Felsarten enthält, andererseits Kies, Steine und Blöcke, welche aus Moräne, groben Bachablagerungen oder aus kompetenten Gesteinsbänken stammen. Mit Ausnahme einiger Schutthalden oder von verrutschter Moräne überwiegt volumenmäßig die Matrix, weshalb sich die Grobkomponenten in der Regel nicht berühren. Die geotechnischen Eigenschaften dieser von uns als «lehmiger Gehängeschutt» bezeichneten Lockergesteine werden deshalb weitgehend von der tonig-siltig-sandigen Grundmasse bestimmt. Mit Ausnahme einiger sandiger bis kiesiger Einschaltungen dürfte die Wasserdurchlässigkeit sehr niedrig sein. Der Wassergehalt kann nahe der Oberfläche dagegen fast bis an die Fliessgrenze steigen.

Die aussagekräftigsten Unterlagen - alle Bohrungen, Laboruntersuchungen, Messungen an Inklinometern und Piezometern sowie die besten geodätischen Resultate - stammen aus der Hauptschlucht Sattel inklusive ihrer Teilschlucht Höchweid, weshalb wir uns in der Folge auf diese konzentrieren. Sie erreicht bei einer mittleren Breite von 640 m und einer Länge von 2.1 km eine Fläche von 1.35 km², dies bei einer mittleren Neigung von 11.5°. Yavuz (1996) schätzte ihre mittlere Mächtigkeit inklusive Moränenunterlage auf 12 - 15 m, was eine Kubatur von 16-20 Millionen m³ ergäbe, dies grösstenteils noch aktive Rutschmasse. Wo der Fussbereich von der Erosion durch die Steiner Aa verschont blieb, dürften die Lockergesteine lokal auf 50 m und mehr anschwellen, doch ist diese Vermutung nicht durch Bohrungen belegt.

Im erbohrten Teil des Fussbereichs wird die Gleitfläche durch anstehende Moräne unterlagert und zerschneidet meist ehemalige Rutschmasse. Mindestens bergseits der Schwelle von Chüngstbüel (934 m, Bereich 2 auf Figur 14) muss sie aber auf den

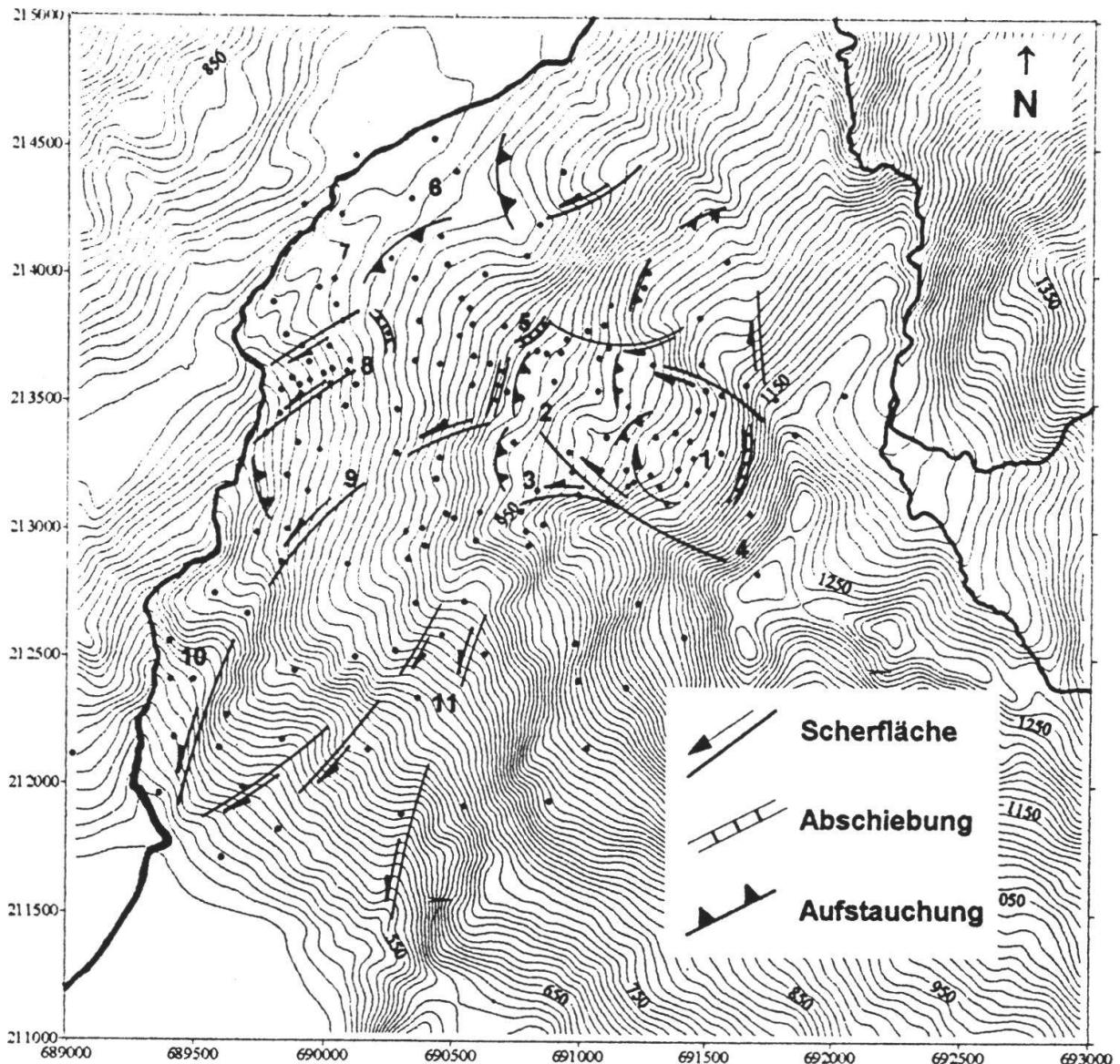


Fig. 14: Deformationsverhältnisse im Untersuchungsgebiet, basierend auf der Analyse der Verschiebungsmessungen 1992/93.

1 = oberster Bereich Rutschmasse Sattel, 2 = Schwelle von Chüngstbüel, 3 = Holzflue, 4 = Abrissbord Abigweid, 5 = Steilhang unterhalb Chüngstbüel, 6 = Feldmoos, 7 = Obere Erli, 8 = Höchweid, 9 = Adelboden, 10 = Mühlacher, 11 = Spiegelberg.

Fels absinken, denn dort liegt die Rutschoberfläche tiefer als die Felsaufschlüsse im umgebenden Gelände. Auch besteht die instabile Masse zu wesentlichen Teilen aus umgelagerter Molasse und Wägitaler Flysch. Die Schwelle selbst erweckt vorerst den Eindruck einer festen, von Moräne überlagerten Felsspartie, doch beweisen die geodätischen Messungen wie auch das Gesamtbild der Rutschung, dass es sich um eine versackte Scholle handelt. Sehr eindrücklich wirkt das gewaltige, grösstenteils von Hangschutt überdeckte Abrissbord, welches von Kote 1080 m fast bis auf den höchsten Grat hinaufgreift (1260 m) und von alpinen Gesteinen unterlagert wird. Die eigentliche Rutschmasse dagegen bedeckt fast ausschliesslich Untere Süßwassermolasse, deren Schichtflächen 30 - 50° gegen SSE fallen. Sie werden durch die gegen NW hin sinkende Gleitfläche schief geschnitten, so dass diese im Detail unruhig und etwas gestuft verlaufen muss.

Die Zusammensetzung der Matrix des lehmigen Gehängeschutts ist nur aus Laboruntersuchungen aus dem Fussbereich bekannt, wobei fast alle Proben als CL zu klassifizieren sind, in ihren Plastizitätseigenschaften aber stark schwanken. Ob die erhaltenen Bodenkennwerte auf den Gesamthang und insbesondere auch auf die Gleitfläche übertragen werden können bleibt ungewiss. Zur Vorsicht mahnen die Ergebnisse der Tonmineralanalyse: In den Proben lag der Smektit-Anteil zwischen 15 und 38 %, stieg in zwei Fällen aber unvermittelt auf erstaunliche 45 - 50 % - Werte, welche vermutlich auch in einzelnen Molassemergeln erreicht oder sogar überschritten werden. Derartige Gehalte an hochquellbaren Tonen beeinflussen die Plastizität wie auch die Schereigenschaften empfindlich. Schon deswegen können die Resultate von vier Ringversuchen an nicht näher bekanntem verrutschtem Material nur als grobe Hinweise dienen: $\phi' 22 - 26.4^\circ$, $\phi_R 20.8 - 24.0^\circ$.

Dem Rutschhang wird aus der Abrissnische und möglicherweise auch weiter unten aus kompetenten Schichten Kluftwasser zugeführt. Zudem fallen reichlich Niederschläge. Bedeutende Teile der Hauptrutschung Sattel sind deswegen versumpft. Das in Zugzonen versickernde Wasser tritt weiter talwärts häufig in Form von Sekundärquellen wieder zu Tage. Der Hang wird auf seine gesamte Länge durchsickert, wobei auch artesisch gespannte Spiegel auftreten können. Derartige geotechnische und hydrogeologische Rahmenbedingungen können die beobachtete Instabilität hinreichend erklären. Infolge der bedeutenden Unsicherheiten bei den Bodenkennwerten und ihrer Variationsbreite wurde aber auf eine Stabilitätsrechnung verzichtet.

Bei der Teilrutschung Höchweid herrschen die für den Fussbereich typischen Verhältnisse. Einzigartig ist aber die starke Erosion ihrer Basis durch die Steiner Aa, was zu einer starken Beschleunigung der Bewegungen in einem beschränkten Areal führte (durchschnittliche Länge 400 m, Breite 100 m, mittlere Neigung 14°). Die heute bewegte Masse erreicht nach Yavuz (1996) eine mittlere Mächtigkeit von 7 m. Darunter folgt meistens passiv gewordene Rutschmasse, dann überall anstehende Moräne. Messungen in Bohrlöchern ergaben, dass neben einer oder mehreren klassischen Gleitflächen auch plastische Verformung auftritt. Entlang der Steiner Aa sind aktive Abrissränder und zahlreiche Wasseraustritte zu beobachten, wobei der völlig durchnässte Boden lokal breiartig ausfliest.

Die Analyse der Bewegungen der Hauptrutschung Sattel während der Periode 1992/93 lässt ein komplexes Wechselspiel von Scherung, Zerrung und Stauchung erkennen (Figur 14). Für die Bereiche 1, 2 und 3 scheinen Rotationsgleitflächen in Kombination mit Stauchungen zu überwiegen, woraus sich neben Horizontalverschiebungen auch Hebungen ergeben. Knapp unterhalb des Weilers Chüngstbüel dagegen setzt kräftige Zerrung und Senkung ein (5), welche hangabwärts aber allmählich wieder durch Stauchung und Hebung abgelöst wird, dies insbesondere im frontalsten Bereich (6). Bei 8 ist die seitlich durch Scherflächen abgegrenzte Teilrutschung Höchweid zu erkennen. Nahe oberhalb der Hauptstrasse zeigen sich bogenförmige Anrisse. Hier wie auch weiter südlich bis Adelboden (9) senkt sich das instabile Gelände.

Eine Verbindung zwischen Zerrung, Abscherung und Senkung herzustellen ist naheliegend. Wie aber sind die Hebungen zu deuten? Drei Möglichkeiten bieten sich hierfür an: a) Rotationsgleitflächen, welche in diesem Bereich hangabwärts aufsteigen, b) plastische Stauchung einer weichgelagerten Lockergesteinsmasse, c) zunehmender Grundwasserdruck, sei dies als artesischer Druck in wasserdurchlässigen,

aber blockierten Linsen oder als Porenwasserüberdruck. In den Bereichen 1, 2 und 3 dürften alle drei Faktoren kombiniert aufgetreten sein.

Faktor a und b erzeugen eine talwärts gerichtete Massenverlagerung, während das Grundwasser und sein Druck in einer Rutschung mannigfaltigen, wechselnden Einflüssen unterworfen ist. Wie bereits dargelegt, entspricht Figur 14 einer Momentaufnahme und können insbesondere die Vertikalkomponenten der Verschiebungen rasch und in grösseren Feldern ihren Sinn wechseln. Ähnlich einer wandernden Raupe scheint sich die Hauptrutschung Sattel also lokal zu verdicken, andernorts aber zu verdünnen, dies in talwärts sich verschiebenden Wellen. Raetzo (1997) beschreibt von der ungleich dynamischeren, in Ausmass und Materialaufbau aber ähnlichen Rutschung Falli-Hölli das Eintreffen einer Stauchungswelle im ehemaligen Feriendorf, begleitet von Horizontalverschiebungen und Hebung in der Grössenordnung von 1 m und mehr. Nach Aktivierung der talseits anschliessenden Lockergesteinsmassen setzten Zerrung und Senkung ein. Wie insbesondere die kontinuierlichen Messungen zeigen, reagieren Hauptrutschung Sattel und Teilarutschung Höchweid sehr träge und gedämpft auf die Änderung äusserer Einflüsse wie z.B. langanhaltende, intensive Niederschläge. Während die Akkumulation einiger Rutschmassen im Gurnigelflysch (Raetzo 1997) oder im Grenzbereich Flysch/Subalpine Molasse westlich Hergiswil (Colombi et al. 1985) auf eine Folge katastrophaler Ereignisse mit Murgängen, Schuttströmen und sehr raschen Bewegungen zurückgeführt werden kann, fehlen anscheinend Spuren derartiger Vorgänge bei der Hauptrutschung Sattel. Ob diese wirklich harmloser als die genannten anderen Rutsche ist, könnte erst eine gezielte Bohrkampagne überprüfen. Zweifellos wäre es sehr aufschlussreich abzuklären, von welchen geotechnischen Faktoren das Verhalten einer weitgehend wassergesättigten lehmigen, mit Steinen und Blöcken durchsetzten Rutschmasse gesteuert werden.

Dank

Ermöglicht wurde die Dissertation durch Stipendien aus der Türkei, aber auch dank Förderung des Projekts durch das Tiefbauamt des Kantons Schwyz unter der Leitung von J. Gasser. Sehr wertvoll war die Mitwirkung des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich mit den Professoren A. Grün und H.G. Kahle sowie der Herren Dr. A. Geiger und Th. Kersten. Die Firma Veramess stellte den Prototyp einer automatischen Anlage für kontinuierliche Verschiebungsmessungen zur Verfügung. Dr. H. Aeschlimann, M. Rutschmann und A. Bühlmann halfen tatkräftig bei der Überwindung der Anfangsschwierigkeiten wie auch bei der Auswertung. Gesamthaft gedankt sei schliesslich all den vielen Personen, welche in der einen oder anderen Form zum Gelingen des Projekts beigetragen haben.

Literatur

- AESCHLIMANN, H., BÜHLMANN, A., RUTSCHMANN, M. 1991: Bauwerks- und Hangüberwachung. Fachtagung Vernetzte Automatische Messsysteme, 23. April 1991, Veranstalter Leica AG.
- BALDERER, W. 1984: Hydrogeologische Gesamtsysteme in quartären Lockergesteinsablagerungen. Steir. Beitr. Z. Hydrogeologie, 36, 115-125, Graz.
- BUCHER, F. 1975: Die Restscherfestigkeit natürlicher Boden, ihre Einflussgrössen und Beziehungen als Ergebnis experimenteller Untersuchungen. Mittl. IGB, ETH Zürich, 103.
- COLOMBI, C., GEES, R., HAEFELI, CH., KELLERHALS, P., SCHINDLER, C. UND ZINGG, M. 1985: Exkursion der Schweiz. Geologischen Gesellschaft vom 7./8. Oktober 1984 in den Kantonen Obwalden und Bern. Eclog. geol. Helv. 78/1, 205-214.
- DUTI 1985: Projet d'école: Détection et utilisation des terrains instables. Rapport final. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1-229.

- FREI, R. 1963: Die Flyschbildungen in der Unterlage von Iberger Klippen und Mythen. Mitt. Geol. Inst. der ETH-Zürich und Uni-Zürich, NF Nr. 14.
- GEIGER, A. 1993: GPS-Passpunktbestimmung und Verzerrungsanalyse im Gebiet Mostelberg, Kanton Schwyz. ETH Zürich, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie. Unveröffentl. Bericht.
- GRÜN, A. 1986: Projekt Uster, ein Beispiel moderner photogrammetrischer Punktbestimmung. Zeitschrift für VPK, Nr. 4.
- HABICHT, K. 1945: Neuere Beobachtungen in der subalpinen Molasse zwischen Zugersee und Rheintal. Eclog. geol. Helv. 38/1, 121-149.
- HANTKE, R. 1980: Eiszeitalter 2: Die jüngste Erdgeschichte der Schweiz und ihrer Nachbargebiete, Ott-Verlag Thun, 291-340.
- HANTKE, R. 1985: Zur Relief-, Tal- und Klimageschichte der zentralen und östlichen Schweizer Alpen. Teil. 1. Vjschr. Natf. Ges. Zürich, 130/1.
- HASENPATT, R., DEGEN, W. & KAHR, G. 1988: Durchlässigkeit und Diffusion in Tonen. Mittl. IGB, ETH Zürich, 133.
- KOPP, J. & BUXTORF, A. 1943: Über das Unterstampfen der Rigi und über Querbrüche in der Molasse zwischen Vierwaldstättersee und Zugersee. Eclogae geol. Helv. 36/2.
- KOPP, J. 1960: Alte Flussläufe der Muota und der Steiner Aa zwischen Rigi und Rossberg. Eclogae geol. Helv. 53/2.
- LAMBERT, A. UND PFEIFFER, C. 1990: Neuvermessung des Lauerzerseebeckens. Wasser-Energie-Luft, 82. Jahrgang, Heft 9, 190-194.
- LEUPOLD, W. 1943: Neue Beobachtungen zur Gliederung der Flyschbildungen der Alpen zwischen Reuss und Rhein. Eclogae geol. Helv. 35, 247-291.
- LOKEN, T. & MÜLLER-VONMOOS, M. 1988: Das Scherverhalten der Tone. Mittl. IGB, ETH-Z, 133.
- MADSEN, F.T. & MÜLLER-VONMOOS, M. 1988: Das Quellverhalten der Tone. Mittl. IGB, ETH-Z, 133.
- MÜLLER-VONMOOS, M. 1983: Die Bedeutung der Tonminerale für das bodenmechanische Verhalten der Lockergesteine. Mittl. Schweiz. Gesell. Für Boden- und Felsmechanik, 109.
- RAETZO, H. 1997: Massenbewegungen im Gurnigelflysch und Einfluss der Klimaänderung, Diss. Uni Fribourg, vdf-Verlag.
- RISSI, A. 1968: Geologische Untersuchungen in der Unteren Süsswassermolasse des Rossberggebietes. Unpubl. Diplomarbeit, ETH Zürich.
- SCHINDLER, C. 1980: Geologisch-geotechnische Voruntersuchung der N8 zwischen Sarnen und Giswil. Strasse u. Verkehr 5/1980, 157-163.
- SCHLANKE, S. 1974: Geologie der voralpinen Molasse zwischen Biberbrugg SZ, Hütten ZH und Ägerisee ZG. Eclog. geol. Helv. 67/2, 243-331.
- STAMMBACH, M. 1988: Rutschungen im hintern Alpthal (Kanton Schwyz), Diplomarbeit Uni Zürich.
- STÜRM, B. 1973: Die Rigischüttung: Sedimentpetrographie, Sedimentologie, Paläographie, Tektonik. Diss. Uni Zürich.
- WINKLER, W., WILDI, W., VAN STUIJVENBERG, J. UND CARON, CH. 1965: Wäggital-Flysch et autres flyschs penniques en Suisse centrale - Stratigraphie, sédimentologie et comparaisons. Eclog. geol. Helv. 78/1, 1-22.
- YAVUZ, V. 1996: Analyse der Bewegung grosser, tonreicher Rutschgebiete am Beispiel des Gebietes Engelstock-Sattel-Steinen (SZ). Diss. ETH-Zürich Nr. 11706.
- Unpublizierte geologische und geotechnische Berichte aus dem Bereich Höchweid, Erli und Brüggli:
- Dr. Heinrich Jäckli AG: 1958, 1985, 1987, 1991 (Adelboden -Erli und weitere Rutschgebiete)
 - Dr. Hugo Buser AG: 1972, 1981, 1983, 1986, 1990 (Baugrunduntersuchungen)
 - Solexpert AG; 1986, 1988 (Auswertung von Inklinometermessungen)
 - Luigi Balestra AG: 1987, 1990 (Adelboden-Erli)
 - Gebrüder Mengis: 1974 (Höchweid und andere Rutschgebiete)
 - Dr. Max Korner: 1990, 1994 (Brüggli)
 - Urs Engel AG: 1976 (Techn. Bericht Sanierung Erlirieter)
 - Institut für Grundbau und Bodenmechanik, ETH Zürich: 1985, 1986 (Laborversuche)

