Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich (1984) *129*/3: 294–315

Eine chronische Rutschung in tonigem Material

E. K. Gerber†, Schinznach, und A. E. Scheidegger,
Technische Universität Wien

Geomorphologische Vorgänge werden durch drei Faktoren beeinflusst: Topographie (Form), Material und dynamische Prozesse. Als Beispiel einer Studie eines morphologischen Vorganges wird hier ein chronischer Rutsch in tonigem Material im Aargauer Jura untersucht. Es wird gezeigt, dass die Eigenschaften des Materials den Verlauf der Rutschung entscheidend beeinflussen. Wegen der charakteristischen Materialeigenschaft (Übergänge von festem zu plastischem und zu fliessfähigem Zustand) verläuft die Rutschung in «Schüben», mit langen Ruheperioden dazwischen. Auslöser von Schüben sind grosse Winterniederschläge, kombiniert mit der Schneeschmelze. Eine Korrelationsstudie zeigt, dass sich der Regen am Anriss der Rutschung nach einem Tag, im oberen Teil derselben nach 3–6 Tagen und im unteren Teil nach 10–12 Tagen auswirkt. So kann ein komplettes dynamisches Modell des geomorphologischen Vorganges gewonnen werden.

A chronic slide in argillaceous material

Geomorphological processes are influenced by three factors: the topography (form), the material involved and the dynamic conditions. As an example of a geomorphological process, a chronic slide in argillaceous material in the Jura Mountains in the Canton of Aargau, Switzerland, has been investigated over a period of 18 years. It is shown that the properties of the material influence the course of the slide decisively: because a transition from solid to plastic and thence to fluid behavior has to take place, the slide occurs intermittently: short periods of activity alternate with long periods of quiescence. The active phases are triggered by heavy precipitation in winter combined with melting of the snow. A correlation-study shows that the precipitation causes motion at the fissures at the head of the slide after 1 day, in its upper part after 3–6 days, and at its bottom after 10–12 days. In this fashion, a complete dynamic model of the process is obtained.

1 Einleitung

Zu den Grundproblemen zum Verständnis der Oberflächenform gehören die Vorgänge in den Gehängen. Damit ist gleich gesagt, dass die Gehänge als sich stetig verändernde Formen betrachtet werden. Die Oberflächenformen sind grundlegende Bestandteile der Landschaft.

Um Oberflächenformen zu erfassen und zu verstehen, sind drei Gesichtspunkte zu berücksichtigen:

a. Die *Form*, die geometrisch durch Karten und Pläne zu erfassen ist.

b. Das *Material*, das die Oberfläche bildet, wobei vor allem das Verhalten bei der Verwitterung, die Festigkeit, die Schichtung und Klüftung sowie Brüche und ihre Systeme zu berücksichtigen sind.

c. Die *Vorgänge*, welche auf das Material von aussen und innen einwirken und das Material verändern.

Alle drei Gesichtspunkte sind miteinander verknüpft. Ihre Wirkung soll in dieser Arbeit am Beispiel einer hochaktuellen und aktiven Rutschung in tonigem Material illustriert werden.

† Verstorben am 19. April 1983

2 Lage, Geologie und Morphologie der Rutschung

Die Rutschung liegt am Ostende des Juras im Kanton Aargau. Hier wird der Faltenjura zwischen Wildegg und der Habsburg vom Aaretal durchquert. Von der linken Seite münden zwei Talungen ins Quertal, das Schenkenbergertal und das kleine Tälchen des Längibaches. Im letzteren, nicht weit vom Bahnhof Schinznach-Dorf der Linie Zürich–Brugg–Basel, liegt in deren rechtem Hang die Rutschung. Das Gebiet heisst «Mösern». Bilder 1 und 2 zeigen eine Planskizze und eine Aufnahme des Untersuchungsgebietes. Die Rutschung befindet sich dort, wo der Hang am steilsten und höchsten ist und wo am Gehängefuss die Kalke des Lias vom Talgewässer zerschnitten wurden. Dadurch fehlt dem Opalinuston, dem Hauptmaterial der Rutschung, die Stütze, auf der er im übrigen Gehänge aufruht. Hier hat der Längibach ein Tobel gebildet, in das die Rutschmassen absinken und teilweise erodiert werden.

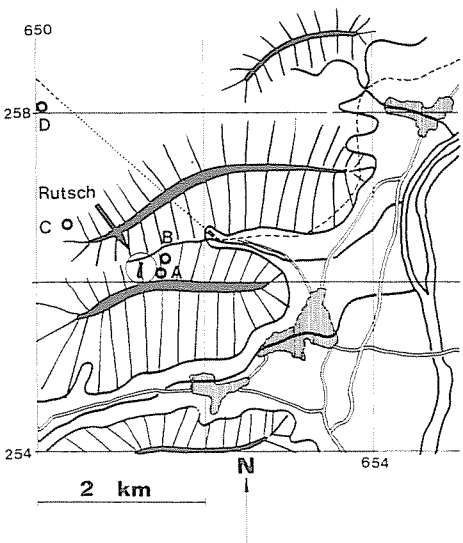


Bild 1 Lage der Rutschung. Die mit A–D bezeichneten Punkte sind Kluftmessstellen.

Fig. 1 Location of the slide. The points denoted by the letters A–D are the locations of joint orientation measurements.

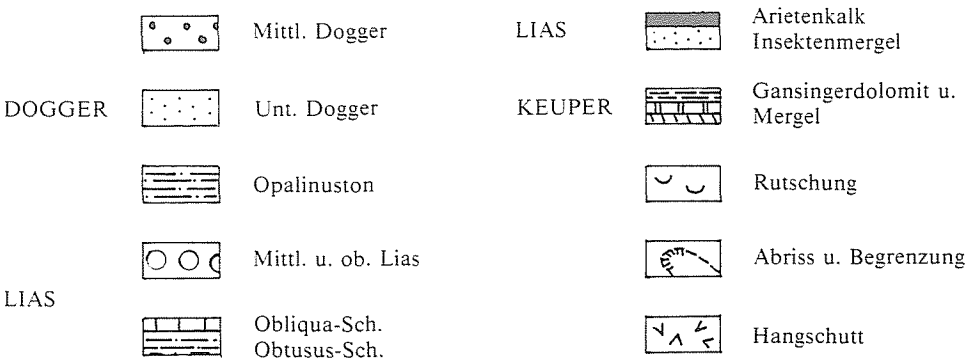
In bezug auf den geologischen Baustil ist festzuhalten, dass im Aargauer Jura die grossen Antiklinalrücken fehlen. Die Antiklinalen sind aufgerissen und die Nordschenkel der Synklinalen auf die Südschenkel der nächsten Synklinale überschoben. Der Baustil ist also isoklinal. Die Südhänge sind Schichtflächenhänge, die Nordhänge Schichtkopfhänge, die ersten sind im allgemeinen trocken, die zweiten schattig und feucht. Der Opalinuszug, in dem sich die Rutschung befindet, liegt in einem Nordhang. Nach dem oben Gesagten befindet er sich in einem feuchten Schichtkopfhang. Bild 3 zeigt ein geologisches Kärtchen und Bild 4 ein Querprofil aus dem Jahr 1968.

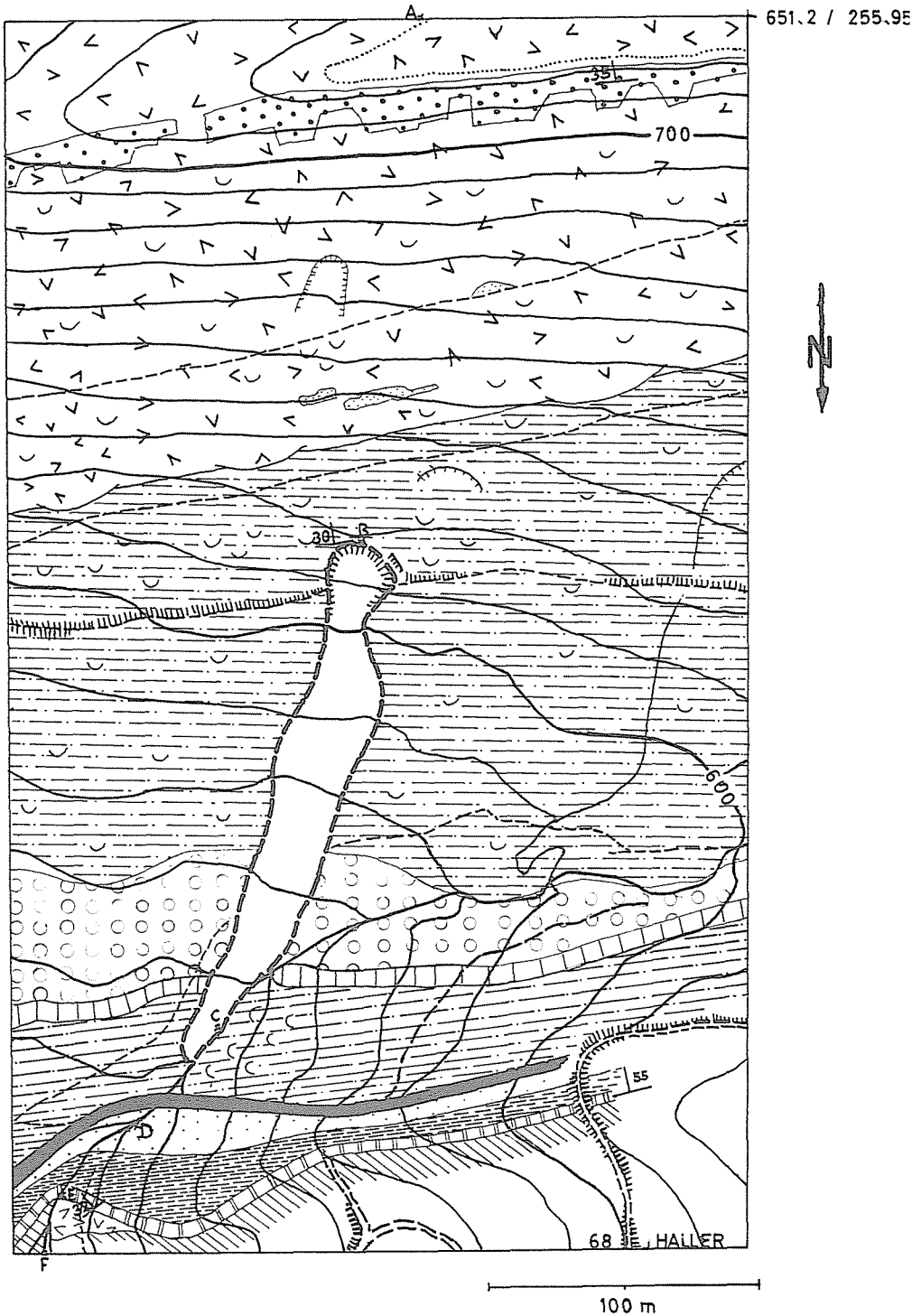
Bild 2 Aufnahme des Rutschungsgebietes.

Fig. 2 Photograph of the slide area.

Bild 3 Geologische Karte der Rutschung.

Fig. 3 Geological sketch map of the slide area.




A
651.2 / 255.95
35
700
N
30
B
600
C
55
D
E
F
68 HALLER
100 m

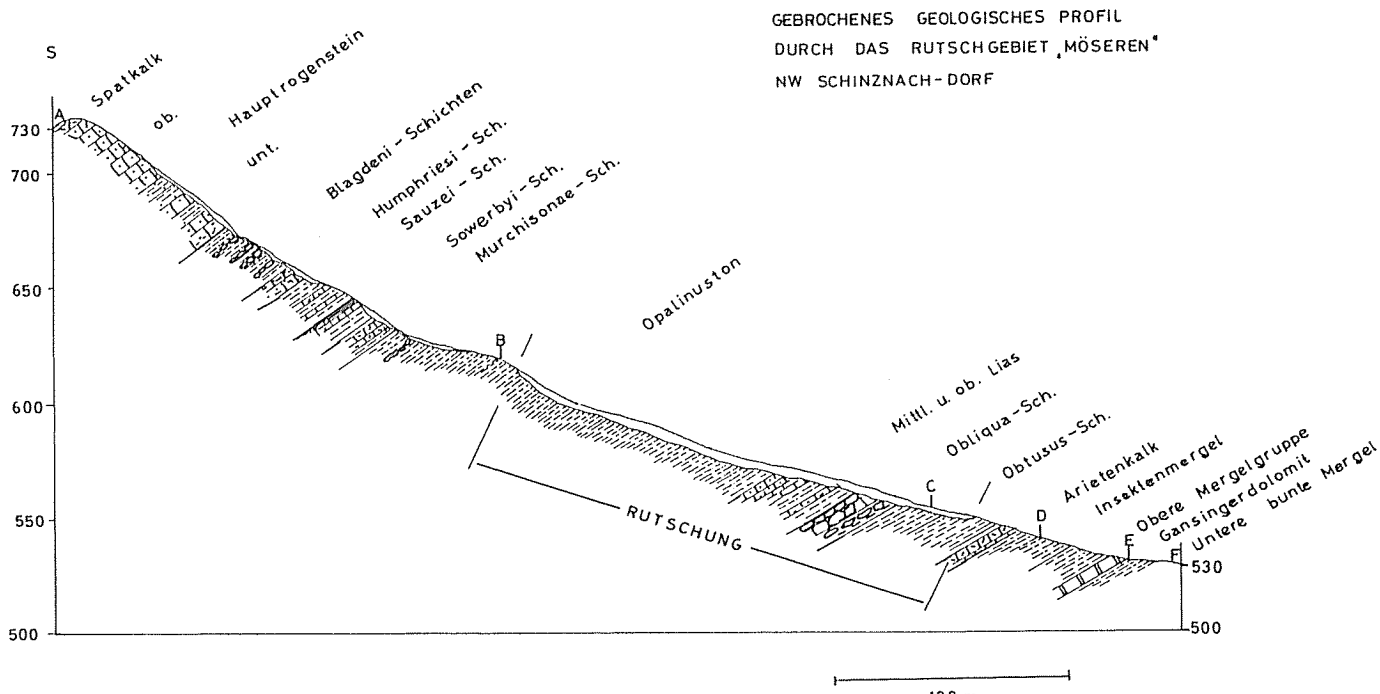


Bild 4 Längsprofil der Rutschung, Zustand 1968.

Fig. 4 Longitudinal profile of the slide: condition of 1968.

3 Der Opalinuston als Material

Im frischen Zustand als Innengestein ist der Opalinuston ein grauschwarzer Schieferton und gehört zu den weltweit verbreiteten marinen tonigen Sedimenten mit Beimengung von organischem Material. Der Ton ist durch die Auflagerung jüngerer Sedimente maximal verdichtet und durch ein Kalkskelett verfestigt. Er ist sehr gut geschichtet und lässt sich den Schichtflächen entlang leicht aufspalten. Auf den Schichtflächen sind von blossem Auge Glimmerschüppchen sichtbar. Bergfeucht ist er sehr standfest. Bei sorgfältigem Austrocknen wird er steinhart. Beim raschen Austrocknen reisst er und zerfällt innerhalb kurzer Zeit. Im Winter kommt dazu noch die Zertrümmerung durch Gefrieren. Neben der Schichtung ist das Gestein oft von zwei Kluftscharen durchzogen, die senkrecht aufeinander stehen, so dass beim Zerfall Quaderstücke entstehen. Einzelne Klüfte reichen viele Meter in die Tiefe. Die Kluftstellungen passen genau mit den in der Schweiz üblicherweise gefundenen zusammen und wurden schon in einer früheren Arbeit rapportiert (A. E. Scheidegger, 1979). Danach sind die bevorzugten Fallrichtungen (Azimut NE) und Fallwinkel aus 82 an den in Bild 1 mit A–D bezeichneten Stellen gemessenen Klüften: $282 \pm 14/86 \pm 12$ und $14 \pm 13/74 \pm 10$. Dies ergibt, wenn man die Klüfte als Mohrsche Bruchflächen in einem neotektonischen Spannungsfeld betrachtet, einen Maximaldruck in Richtung N 143 E, was genau der «europäischen» Hauptspannungsrichtung entspricht. Bild 5 zeigt das Poldichtediagramm der Klüfte.

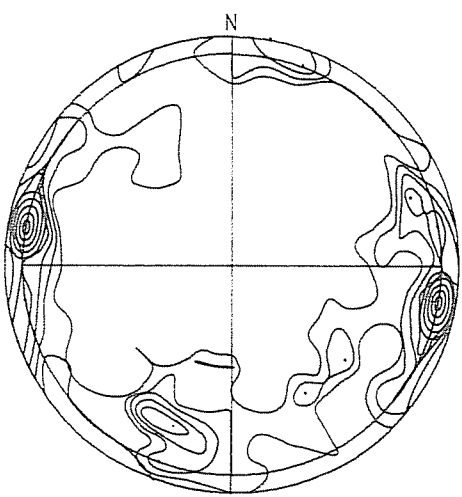


Bild 5 Poldichtediagramm der Kluftstellungen, die in den mit A–D bezeichneten Stellen (siehe Bild 1) gemessen wurden.

Fig. 5 Pole density diagram of the joint orientations which had been measured in the locations denoted by A–D in figure 1.

Unverwitterter Opalinuston ist selten zu sehen. Er kann etwa in Bachläufen und Flankenanrissen sichtbar sein. Auch in der Rutschung, die wir hier besprechen, war meist nur vorübergehend anstehender Opalinuston in klei-

nen Aufschlüssen zu sehen. Bei der Verwitterung entsteht zuerst ein Gemisch von kleinen Bröckeln und plastischem Ton. Die Verwitterung ist ein irreversibler Vorgang. Dabei wird das Kalkskelett ausgewaschen und durch die Risse kann Wasser eindringen. Die oberste Schicht wird durch die Vegetation zu Boden. Es ist ein schwerer und fruchtbarer Boden, der aber, weil das Wasser nicht abfliessen kann, leicht durchnässt wird. Unter dem Boden verwittert der Opalinuston 2–3 m tief. Dabei wird er durch Oxydationsvorgänge gelblich. Es ist zu beachten, dass der Opalinuston wasserundurchlässig ist; Wasser kann also nur durch Spalten und entlang von Wurzeln eindringen. Opalinuston tritt je nach Wassergehalt in verschiedenen Zustandsformen auf, wie in Tabelle 1 gezeigt wird. Spezifische Werte aus der von uns untersuchten Rutschung sind in Tabelle 2 angegeben. Daraus geht hervor, dass das Material mit zunehmender Entkarbonatisierung, Durchknetung und Durchmischung beweglicher wird. In der Tat ist Opalinuston in Ingenieurkreisen berüchtigt wegen seiner Quellhebung und seinem Quelldruck. Aus einer Tabelle von F.T. Madsen (1976) entnimmt man eine Quellhebung bis zu 20% und einen Quelldruck bis zu 28 kg/cm^2.

Tabelle 1 Schematische Darstellung des Verhaltens von Opalinuston

Table 1 Schematic representation of the comportment of Opalinus-clay

Wassergehalt	Zustand		
0	fest		reversibel
W_s	halbfest		
W_p	steif weich sehr weich breiig	plastisch	
W_l	fliessfähig		
	in Wasser aufgeschlemmt		

Anmerkung: Man nennt W_s die Schrumpfgrenze, W_p die Plastizitätsgrenze (Ausrollgrenze), W_l die Fliessgrenze (Liquiditätsgrenze). Als «Index» I_p bezeichnet man die Differenz W_l-W_p. Der Übergang von geschichtetem zu strukturlosem Material ist irreversibel.

Tabelle 2 Kritische Grenzen im untersuchten Opalinuston

Table 2 Critical limits in the investigated Opalinus-clay

	Fliessgrenze	Ausrollgrenze	Index
Abriss	40%	17%	23
Zunge	81%	30%	51

Bei Bewegungen kann man nach der Tiefe 3 Arten unterscheiden:

(1) Bewegungen des Bodens. Im Wiesland kommt es im Opalinuston gelegentlich zu Rasengleiten, wobei die Unterseite der Rasendecke als schmierige Gleitfläche auftritt. (2) Bewegungen im verwitterten Opalinuston bis zum Übergang zum Unverwitterten. (3) Bewegungen im unverwitterten und geschichteten Opalinuston entlang von Klüften.

(1) und (2) gehören zu den Bewegungen in Lockergestein, (3) zeigt schon wesentliche Eigenschaften von Bewegungen in Festgestein.

4 Geschichte der Beobachtungen

Das heutige Rutschgebiet war schon im letzten Jahrhundert als rutschempfindlich bekannt, doch diente der Wald damals weit mehr als heute der Brennholzbeschaffung. Dieses wurde geschlittet. Waldwege gab es nur wenige. Im Jahre 1910 wurde ein neuer Waldweg durch das heutige Rutschgebiet erstellt. 1924 musste er saniert werden, da eine Partie abgesunken war. Man versuchte, mit 2,5 m langen und 20 cm dicken Pfählen das Wegstück sozusagen anzunageln, was nicht gelang.

Auf dem Grundbuchübersichtsplan von 1930 ist eine Rutschung von ca. 25 m Länge angegeben. Im Winter 1958/59 fand die *erste grosse Rutschung* statt, in dem grösserer Waldschaden entstand. Die Rutschung umfasste damals ein Gebiet von ca. 30 a. Im Winter 1959/60 wurde das noch brauchbare Holz geborgen. Damit lag die Rutschfläche kahl.

Am 1. Mai 1960 wurden mit den laufenden, hier berichteten Messungen begonnen. Diese wurden bis Ende 1978 fortgesetzt. Die Jahre 1960–70 waren vor allem eine Zeit der Beruhigung. Es gab nur kleinere und grössere Ausgleichsbewegungen. Immerhin ist zu bemerken, dass nie ein vollständiger Stillstand eintrat. Es waren vor allem Rutsch- und Gleitbewegungen im plastischen Zustand. Fliessfähiges Material trat nur in kleinen Anrissen zu Tage. Im Jahre 1970 lösten sich im Abrissgebiet grössere Massen mit neuem Waldschaden *(zweite grosse Rutschung).* Wiederum trat in den folgenden Jahren eine Beruhigung ein, bis es 1977 und dann 1978 zu ganz grossen Abrissen kam *(dritte grosse Rutschung).* Die Veränderungen waren 1978 so gross, dass es nicht mehr möglich war, die 1960 begonnenen Messungen danach kontinuierlich fortzusetzen: die ursprünglichen Messpunkte waren im Schlammbrei verschüttet worden.

Die Entwicklung von kleinen Anfängen zu einer immer grösseren Rutschung reicht also Jahrzehnte zurück. Es handelt sich somit um eine progressive Rutschung. Der Vorgang ist auch heute noch nicht abgeschlossen.

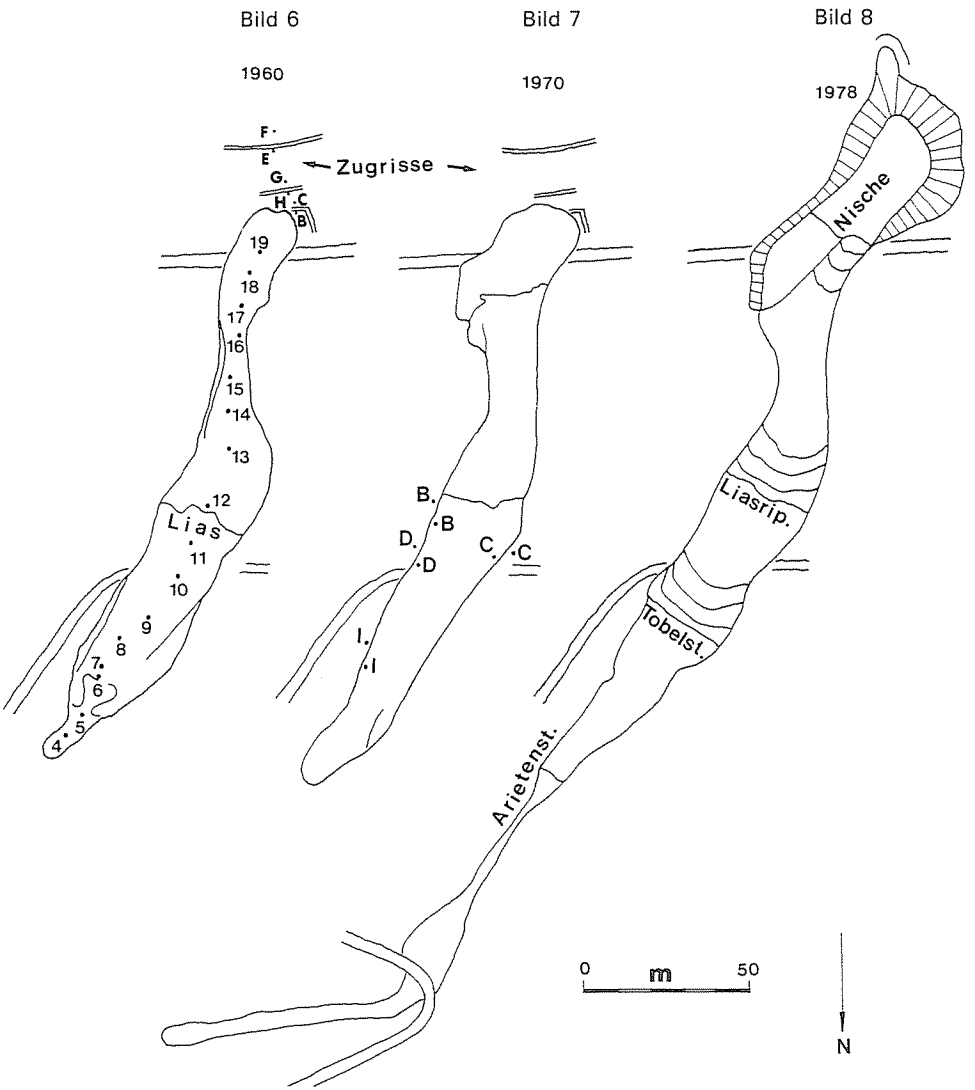


Bild 6 Zustand des Rutschgebietes im Jahre 1960. Lage der Messpunkte und der Zugspalten.

Fig. 6 Condition of the slide area in 1960. Location of the measurement points and of the tear cracks.

Bild 7 Zustand der Rutschung im Jahre 1970 mit Lage der Scherflächen.

Fig. 7 Condition of the slide in 1970. Location of the shear surfaces.

Bild 8 Zustand der Rutschung im Jahre 1978 nach der Grossrutschung.

Fig. 8 Condition of the slide in 1978 after the large slide event.

5 Die Messdaten

5.1 Allgemeines

Genaue Bewegungsdaten der Rutschung bei Schinznach wurden ab 1. Mai 1960 («Tag 1») bis zur Grossrutschung von 1978 aufgenommen. Messpunkte wurden durch Pflöcke markiert, deren Relativbewegungen mit einem Massband festgehalten wurden. Die Messungen erfolgten z. T. in wöchentlichen, z. T. in längeren Intervallen.

Bild 6 zeigt eine Planskizze des Zustandes des Rutschgebietes im Jahre 1960. Die Messpunkte sind durch die Zahlen 4 bis 19 markiert. Die im Abrissgebiet oberhalb des Rutschgebietes beobachteten Zugspalten wurden ebenfalls durch Pflöcke, die mit Buchstaben von B bis F bezeichnet wurden, markiert.

Bild 7 zeigt den Zustand der Rutschung im Jahre 1970. Es wurden an deren Rande Scherflächen beobachtet, die ebenfalls durch Pflöcke markiert (BB, CC, DD und II) und deren Relativbewegungen gemessen wurden.

Schliesslich zeigt Bild 8 noch den Zustand der Rutschung im Jahre 1978 nach der Vollendung der letzten Grossbewegung.

5.2 Regendaten

Es standen tägliche Regenmessungen für Schinznach (ab 1943) zur Verfügung. Die Regendaten wurden in «Regensummen» (totale Regenmenge seit dem 1. Mai 1960) umgerechnet. Für Korrelationsanalysen wurden auch noch die Regensummen für 63 Tage vor dem 1. Mai 1960 berechnet. Diese sind dann negativ.

5.3 Erste Messserie

Bewegungsmessdaten wurden für das Rutschungszungenende sowie eine Serie von 16 Punkten («Punkt» 4 bis 19 in Bild 6) über eine Periode von 3108 Tagen aufgenommen. Wie oben erwähnt, erfolgten die Messungen nicht an jedem dieser Tage, sondern nur an gewissen «Messtagen». Abgelesen wurde die Totalbewegung («Bewegungssumme») ab dem 1. Mai 1960. Zwischen den eigentlichen «Messtagen» wurde dabei linear interpoliert. Die Daten wurden in Bild 9 graphisch dargestellt; sie zeigt die totale Bewegung: die letztere wurde für den letzten Messtag auf 1 normiert. Zur Ermittlung der Absolutwerte sind in der Bildlegende die Endwerte für Tag 3108 aufgeführt.

5.4 Lange Serie

Bewegungsdaten für das Zungenende und Punkt 4 wurden zudem über 6132 Tage aufgenommen. Die Vorgangsweise war wie oben; zwischen den einzel-

nen wirklichen Messtagen wurde linear interpoliert. Graphisch sind die Daten in Bild 10 dargestellt.

5.5 Zugspalten

Die drei Zugspalten, die in Bild 5 mit CB, EF und GH bezeichnet sind, wurden von Tag 1 bis 6144 in ähnlicher Weise wie die vorigen Punkte vermessen. Die Daten sind in Bild 11 dargestellt.

5.6 Scherflächen

Schliesslich wurden noch unterhalb der Liasrippe die Bewegungen an den vier in Bild 7 mit BB, DD, II und CC bezeichneten Scherflächen für die Tage 2135–3634 aufgenommen. Die Daten sind graphisch in Bild 12 dargestellt.

5.7 Allgemeine Folgerungen aus den Beobachtungen

Nach den langjährigen Beobachtungen kann aus den oben aufgeführten Daten festgestellt werden, dass in keiner Trockenperiode je eine Rutschung

---

Bild 9 Totale Bewegungen der Messpunkte der 1. Serie; Endwert auf 1 normiert. Diese Endwerte sind für Tag 3108: Regensumme 8524,2 mm; Zunge 7,90 m; Punkt 4: 16,00 m; Punkt 5: 16,00 m; Punkt 6: 16,24 m; Punkt 7: 16,85 m; Punkt 8: 19,85 m; Punkt 9: 11,85 m; Punkt 10: 12,85 m; Punkt 11: 16,80 m; Punkt 12: 18,50 m; (Punkt 13: 8,10 m); Punkt 14: 13,70 m; Punkt 15: 8,40 m; Punkt 16: 29,45 m; Punkt 17: 37,20 m; Punkt 18: 41,85 m; Punkt 19: 12,95 m. ▷
Es ist zu beachten, dass Punkt 13 nach Tag 167 verlorengegangen ist, er wurde danach in der Rechnung künstlich als «stationär» angenommen.

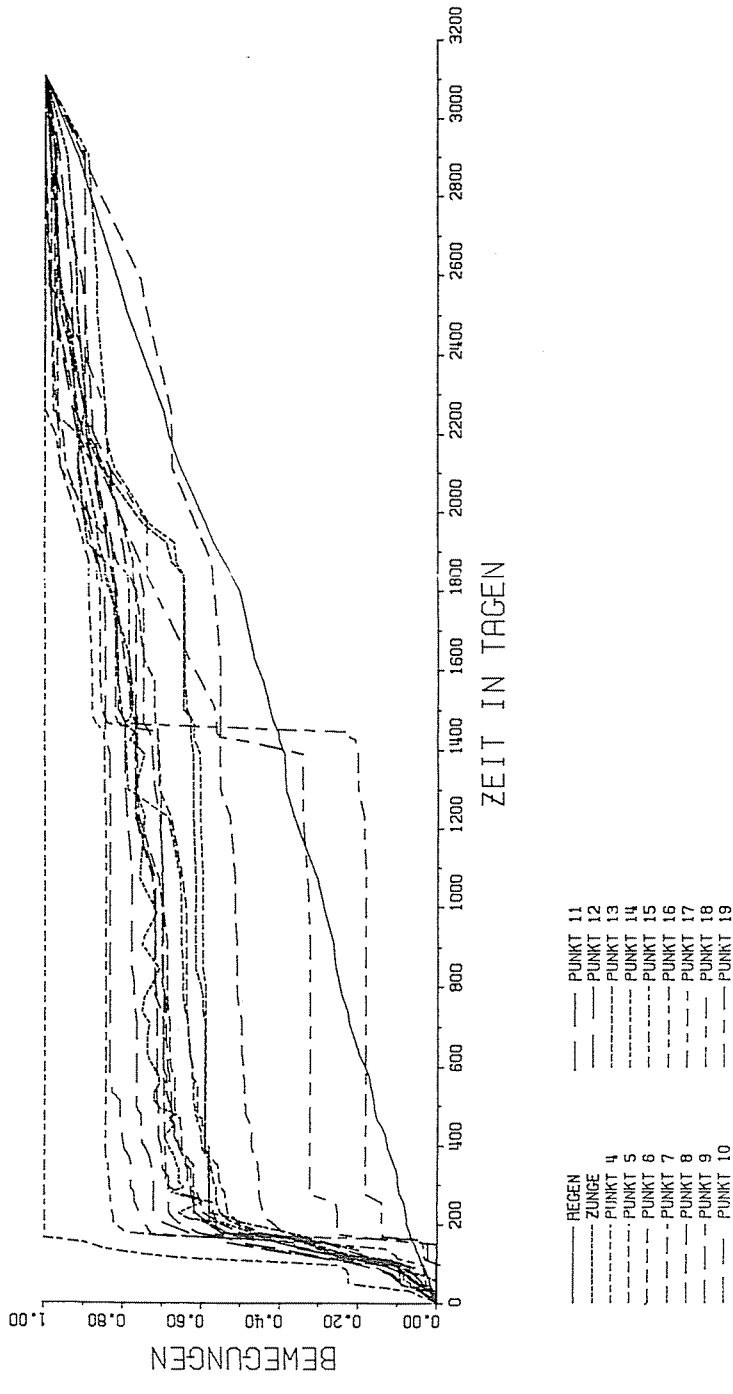
Fig. 9 Total displacement of the measurement points in the first series of measurements. Final value normalized to 1. These final values are for day No. 3108: Total rain: 8524.2 mm; tongue: 7.90 m; point 4: 16.00 m; point 5: 16.00 m; point 6: 16.24 m; point 7: 16.85 m; point 8: 19.85 m; point 9: 11.85 m; point 10: 12.85 m; point 11: 16.80 m; point 12: 18.50 m; (point 13: 8.10 m); point 14: 13.70 m; point 15: 8.40 m; point 16: 29.45 m; point 17: 37.20 m; point 18: 41.85 m; point 19: 12.95 m.
It should be noted that point 13 was lost after day 167; it was artificially assumed as "stationary" thereafter.

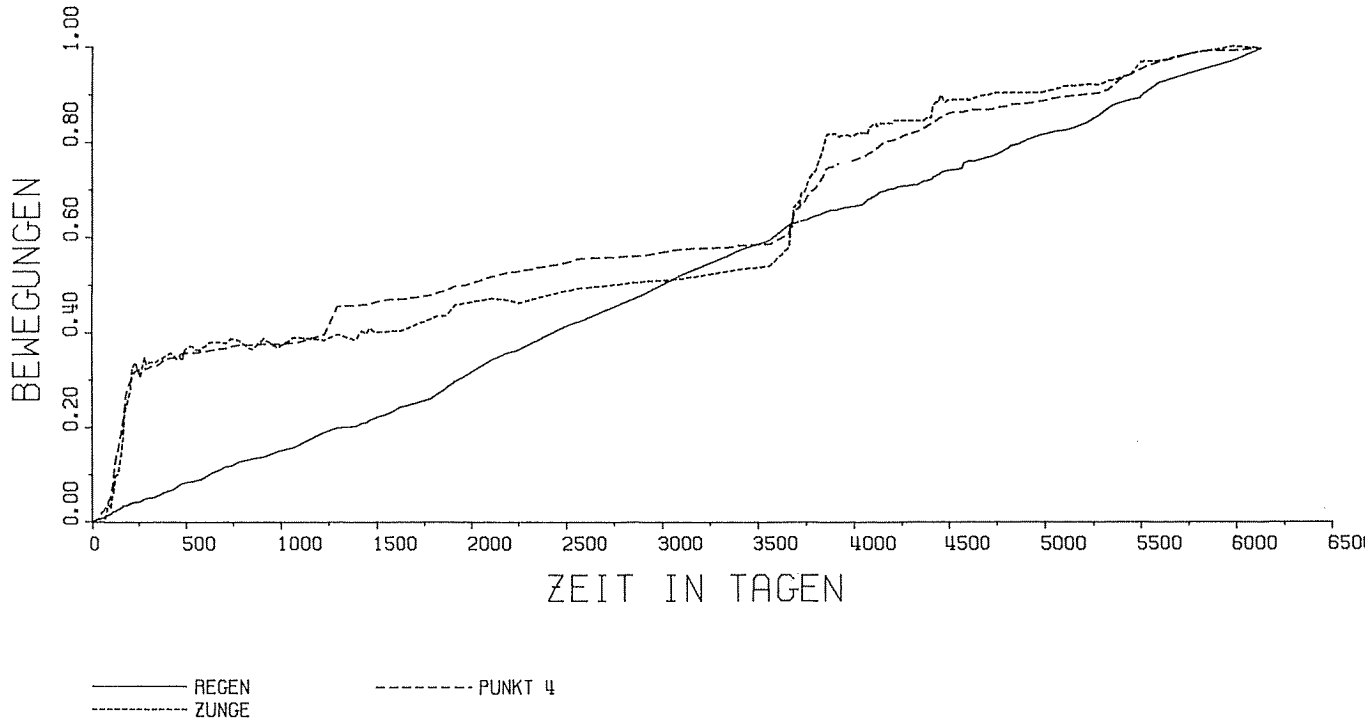
Bild 10 Bewegungsdaten für das Zungenende und Punkt 4 über 1632 Tage; Endwert auf 1 normiert. Diese Endwerte sind für Tag 6132: Regensumme: 16297,9 mm; Zunge 15,32 m; Punkt 4 27,68 m. ▷▷

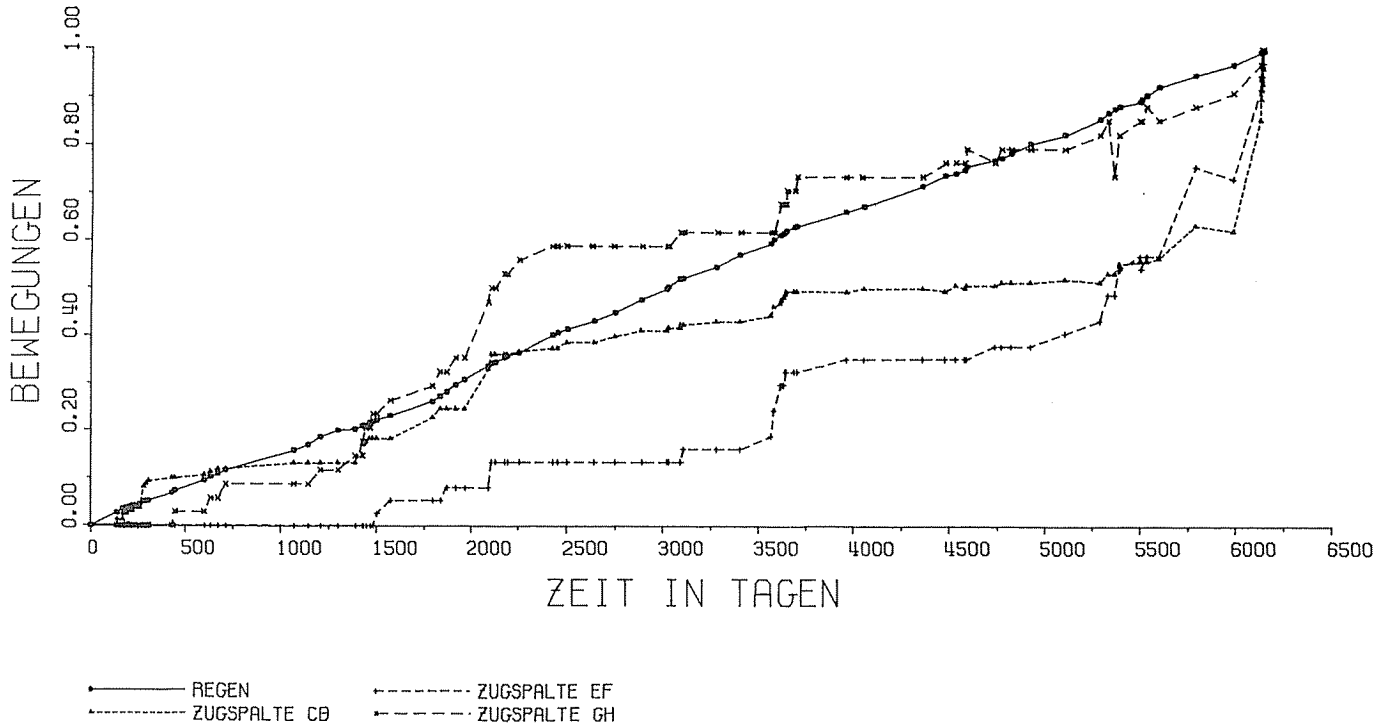
Fig. 10 Displacement data for the end of the tongue and point 4 for 6132 days; the final value was again normalized to 1. These final values were for day No. 6132: Rain: 16297.9 mm; Tongue: 15.32 m; point 4: 27.68 m.

Bild 11 Bewegungsdaten für die drei Zugspalten; Endwert auf 1 normiert. Die Endwerte sind (am Tag 6144) Regensumme: 16352,7 mm; CB: 1,58 m; EF: 0,37 m; GH 0,34 m. ▷▷

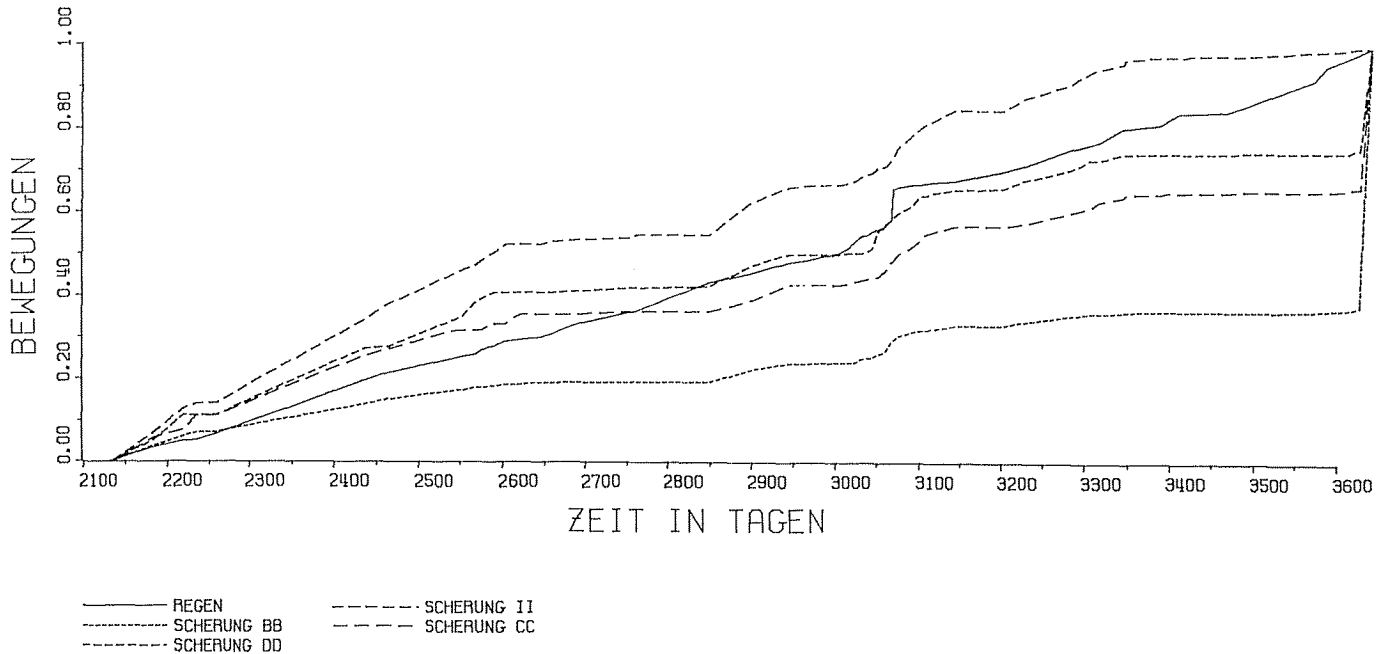
Fig. 11 Displacement data for the three tear cracks, final value normalized to 1. These final values were (for day No. 6144): Rain 16352.7 mm; CB: 1.58 m; EF: 0.37 m; GH: 0.34 m.


BEWEGUNGEN
0.00
0.20
0.40
0.60
0.80
1.00
ZEIT IN TAGEN
0
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
2000
2200
2400
2600
2800
3000
3200
REGEN
ZUNGE
PUNKT 4
PUNKT 5
PUNKT 6
PUNKT 7
PUNKT 8
PUNKT 9
PUNKT 10
PUNKT 11
PUNKT 12
PUNKT 13
PUNKT 14
PUNKT 15
PUNKT 16
PUNKT 17
PUNKT 18
PUNKT 19
79/01/31 - 18.14H


BEWEGUNGEN
0.00
0.20
0.40
0.60
0.80
1.00
0
500
1000
1500
2000
2500
3000
3500
4000
4500
5000
5500
6000
6500
ZEIT IN TAGEN
REGEN
ZUNGE
PUNKT 4



DB/A- - 79/01/31 - 15.24H



[- 79/02/01 - 10.34H

ausgelöst wurde: durch Austrocknen verfestigt sich der Opalinuston. Es konnte auch festgestellt werden, dass die Bewegungen gestoppt wurden, wenn durch kaltes Winterwetter sich oberflächlich eine Eisschicht wie ein Panzer auf dem Rutsch ausbildete. Alle Rutschungen begannen bei und unmittelbar nach grossen Niederschlägen, besonders wenn diese in Schnee fielen.

Der obige Satz lässt sich aber nicht umkehren: Nicht jeder grosse Niederschlag löste eine grössere Rutschung aus, wenn auch im allgemeinen die nie ganz aufhörenden Bewegungen belebt wurden. Es brauchte also für die Auslösung nicht nur viel Wasser, sondern noch eine Bereitschaft, eine Schwächung der inneren Festigkeit.

Gemäss den Regendaten fanden die grössten Niederschläge jeweils in den Monaten Juni, Juli und August statt. Das Minimum wurde im Winter im Februar oder März erreicht. Nun zeigte sich aber, dass die Mittelwerte wohl wertvolle Hinweise geben, dass es aber kein einziges Jahr gab, das den Mittelwerten nur einigermassen entsprach. In der nun 40jährigen Serie wurde im Februar 1970 die grösste Monatssumme mit 323 mm gemessen, auf gleiche Monatslänge ausgeglichen 351 mm. Die grösste Sommermonatssumme ergab sich im August 1968 mit 235 mm respektive 231 mm. Für die Rutschung ist festzustellen, dass die wichtigsten Auslöser von Grossrutschungen eindeutig nicht grosse Sommerniederschläge mit ausgiebigen Gewittergussregen waren, sondern vielmehr immer sehr grosse Winterniederschläge, die in Schnee fielen und von diesem wie durch einen Schwamm aufgesogen wurden. Beim Schmelzen konnte dann das Regen- und Schneewasser an Ort und Stelle sukzessive eindringen.

Nun darf nie vergessen werden, dass Opalinuston an sich praktisch wasserundurchlässig ist. Nur in der obersten, von Vegetation durchsetzten Schicht kann Wasser leicht eindringen, aber dies sind nur einige Dezimeter. Auch Trockenrisse reichen nur unbedeutend in die Tiefe. In grössere Tiefe reichen nur Zugrisse und Bruchflächen, die mit der Tektonik zusammenhängen. Jeder grossen Rutschung ging die Bildung von Zugrissen voraus, die sich langsam erweiterten, auch zu kleineren Verlagerungen führten, bis dann plötzlich grössere Massen in Bewegung gerieten. Bei grossen Niederschlägen und viel Schmelzwasser drang Wasser in diese Klüfte ein. Bei den grossen Quelldrükken, die nach Angaben im vorigen Kapitel 20 kg/cm^2 übersteigen können, mögen diese bei der Klufterweiterung mitgewirkt haben. Die Hauptbewegungen konnten nie direkt beobachtet werden, wohl aber am folgenden Tag die grossen Verwüstungen, der Wirrwarr gestürzter Tannen und einzelner

---

◁ Bild 12 Bewegungen der Scherflächen, Endwert auf 1 normiert. Die Endwerte am Tag 3640 (Beginn der Messung am Tag 2135) sind: Regensumme: 4758,3 mm; BB: 8,82 m; CC: 2,64 m; DD: 2,62 m; II: 2,51 m.

Fig. 12 Movement at the shear surfaces, final value normalized to 1. These final values on day 3640 (beginning of measurements on day 2135) were: Rain: 4758.3 mm; BB: 8.82 m; CC: 2.64 m; DD: 2.62 m; II: 2.51 m.

Buchen, die durch sie angerichtet wurden. Das Hauptergebnis der Beobachtungen aller Grossrutschungen besteht in der Feststellung, dass es dabei nie nur zur Verlagerung trockener und plastischer Massen kam, sondern dass immer grosse Mengen von breiartigem Opalinuston dabei wegflossen. Der Übergang vom plastischen zum fliessfähigen Zustand vollzog sich offensichtlich nur, wenn das Wasser «eingeknetet» wurde. Das Spaltenwasser wurde eingearbeitet, sobald die Massen in Bewegung gerieten. Dies zeigten auch bei langsameren Bewegungen die Verhältnisse an den seitlichen Scherflächen, wo man während Grossrutschungen besonders leicht einsank.

5.8 Stufen in der Rutschung und Zyklizität im Ablauf

Die Rutschung hat im Längsverlauf charakteristische Stufen. Die steilste ist beim Abriss. Sie folgt hier Zugrissen, und die Gleitflächen scheinen in der Tiefe parabolisch zu verlaufen. Die Bäume auf den obersten abgesunkenen Schollen neigten sich entsprechend einer Rotationsbewegung nach rückwärts, und am innern Rand der einen Scholle entstand vorübergehend ein Nackenweiher.

Drei Stufen sind lithologisch bedingt, eine weitere steht im Zusammenhang mit dem Tobel, in welches das Rutschmaterial absinkt, eine weitere entstand durch einen Waldweg, der auf einem Damm das Tobel querte.

Der Ablauf verläuft in Zyklen, von denen drei beobachtet werden konnten. Bei demjenigen von 1958/59 konnte nur die Beruhigungsphase beobachtet werden. Doch die Zyklen, welche 1970 und 1977/78 begannen, konnten von Anfang an verfolgt werden. Wir können in jedem Zyklus drei Phasen unterscheiden.

1. Jede Grossrutschung wurde durch Zugrisse oberhalb der alten Abrisswand vorbereitet, welche sich ausweiteten und vertieften, und in die auch alles Regen- und Schmelzwasser versickern konnte. Die Grossrutschungen begannen mit Absacken grosser Schollen, die im geschichteten Verband blieben und z. T. die erwähnten Rotationsbewegungen vollzogen.

2. Am Fuss der Schollen floss breiartiges bis dünnflüssiges Material aus und bewegte sich als Schwall abwärts. Das erste Absacken findet wohl in wenigen Minuten statt. Dadurch wird das Spaltenwasser in das gelockerte Material eingearbeitet. Im Schlammstrom wurden bei 28° Neigung Geschwindigkeiten bis zu 60 cm/Minute gemessen. In jeder Verflachung breitete er sich teigartig aus. Das Erlengebüsch wurde mitgerissen, grosse Bäume umgeworfen.

Der erste grosse Schwall füllte die breite Rinne älterer Rutschungen und uferte teilweise über die seitlichen Wälle aus. Nach dem ersten grossen Schwall sank der Schlammbrei ein. Nur auf den Seiten, wo das Material schneller austrocknet, blieben Wälle stehen mit ausgeprägten Scherflächen, denen entlang das langsam in den plastischen Zustand übergehende Material sich rutschabwärts bewegte.

3. Die «flüssige» Phase ging vor allem im Sommer bei heissem und trockenem Wetter rasch in die plastische über. Zunächst bildete sich eine trügerische Kruste, die man durchbrechen konnte. Die Bewegungen verlangsamten sich, zuerst in den flacheren Strecken. Aber in den Stufen bewegte sich die plastische Masse 1–1,5 m tief. Am Stufenscheitel entstanden Zugrisse, am Fuss Stauchwälle. Dieser Zustand hielt jahrelang an mit Bewegungen von 1–2 cm pro Woche.

Über dem Abriss bilden sich wieder Zugrisse, und damit wird ein neuer Zyklus vorbereitet. Heute liegt der Abriss unter den mergelig-kalkigen Murchisonaeschichten. Da die Bewegungen anhalten, ist früher oder später mit neuen Grossrutschungen zu rechnen.

6 Korrelationsanalyse

6.1 Vorgangsweise

Obwohl eine grundlegende Zyklität in der Auslösung von *Grossrutschungen* im Rutschgebiet von Schinznach festgestellt werden konnte, war doch zu erwarten, dass eine Korrelation im einzelnen zwischen Bewegungen und Regen bestand. Zur Ermittlung der Korrelation zwischen Bewegungsdaten und Regendaten wurden differenzielle Werte für jeden Tag von den Summenwerten berechnet. Ein Computer wurde so programmiert, dass als Wertepaare für die Korrelationsrechnungen die Summenwerte vom Tage t–1 von den Summenwerten vom Tag t abgezogen wurden; in dieser Weise ergaben sich der «Bewegungswert» b_t und der «Regenwert» r_t für den Tag t. Der letztere ist natürlich gleich der ursprünglich gemessenen Regenmenge an diesem Tag.

Bei vielen ($N > 100$) Wertepaaren ist der minimale Korrelationskoeffizient, der notwendig ist, dass eine Korrelation mit einer 95%-Vertrauensgrenze angenommen werden kann, durch die auf der Studentschen Verteilung beruhenden Näherungsformel

$$r_{95\%} \approx \frac{1{,}960}{\sqrt{N}}$$

gegeben (siehe L. Sachs, 1971, S. 331). Für 3108 Wertepaare (erste Serie von Messungen) ist der Grenz-Koeffizient somit $r_{95\%} = 0{,}0352$; für 6132 Wertepaare (lange Serie von Messungen) gar nur $r_{95\%} = 0{,}0250$.

6.2 Erste Messserie

Die täglichen (differentiellen) Bewegungen eines jeden der 16 Punkte sowie des Zungenendes, die aus der «ersten Messserie» hervorgingen, wurden mit den täglichen (differentiellen) Regenmengen korreliert. Der Korrelationskoeffizient wurde für eine Verschiebung der Regendaten jeweils von −25 bis +15

Tagen berechnet. Man ersah, dass die Korrelationsmaxima bei Verschiebungen von −10 Tagen unterhalb und −4 Tagen oberhalb der Liasstufe liegen. Das besagt, dass oberhalb der Liasstufe der Effekt des Regens nach 4, unterhalb der Liasstufe nach 10 Tagen wirksam wird. Die Maxima der Korrelation und die Verschiebungen sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Ausser für die Punkte 18, 19 und das Zungenende liegen die Koeffizienten im 95%-Signifikanzintervall. Mit dem Zungenende ergibt sich keine vernünftige Korrelation, was wohl mit dem wiederholten Abbrechen (und somit Rückschreiten) desselben zu tun hat.

Tabelle 3 Korrelationsmaxima für die 1. Messserie

Table 3 Correlational maxima in the first series of measurements

Punkt	Verschiebung	Maximum
Zunge	+ 5	0.048
4	−12	0.068
5	−10	0.082
6	−11	0.075
7	−10	0.073
8	− 4	0.088
9	−12	0.083
10	−11	0.068
11	−10	0.067
12	− 6	0.067
13	−11	0.082
14	− 4	0.080
15	− 4	0.079
16	− 4	0.039
17	− 6	0.050
18	− 3	0.036
19	− 8	0.030

6.3 Volle Messserie und Regendaten

Es wurde auch die gesamte Messserie für Zunge und «Punkt 2» mit den Regendaten korreliert. Für die Zunge ergab sich wieder kein vernünftiger Wert; für «Punkt 4» wurde ein Maximum von 0,098 bei einer Verschiebung von −12 Tagen erreicht; bezeichnend ist, dass die Verschiebung dieselbe ist wie bei der kürzeren Messserie.

6.4 Zugspalten und Regendaten

Als nächstes wurden die Zugspalten mit dem Regen korreliert. Diese Korrelation erstreckte sich über die Tage 1 bis 3710. Tabelle 4 resümiert die Maxima. Man sieht, dass die Zugspalten CB und EF ein Maximum bei einem Tag Verschiebung haben. Danach würden also die Zugspalten, die sich ja im oberen

Teil der Rutschung befinden, innert einem Tag auf den Regen reagieren. Die Zugspalte GH hat ihr Maximum erst nach 8 Tagen.

Tabelle 4 Maxima für Zugspalten

Table 4 Maxima for the tension cracks

Spalte	Verschiebung	Maximum
CB	−1	0.0655
EF	−1	0.0734
GH	−8	0.0641

6.5 Scherflächen und Regen

Schliesslich wurden noch die Scherflächen BB, CC, DD und II mit den Regendaten für die Tage 2135–3640 korreliert. Die Maximalwerte sind in Tabelle 5 gezeigt. Es ist ersichtlich, dass die in der Umgebung der oberen Liasstufe sich befindlichen Scherflächen schon nach 2 Tagen durch den Regen beeinflusst werden, die weiter unten gelegenen erst nach 6–7 Tagen.

Tabelle 5 Maxima für Korrelation von Scherflächen und Regen

Table 5 Maxima for the correlation of shearing surfaces with rain data

Scherfläche	Verschiebung, Tage	Maximum
BB	−2	0.050
CC	−2	0.049
DD	−6	0.054
II	−7	0.063

6.6 Diskussion

Die erhaltenen Resultate sind physikalisch eminent sinnvoll:

1. Auf die sich durchwegs im Abrissgebiet befindlichen Zugspalten wirkt sich der Regen schon nach einem Tag aus.
2. Auf die Messpunkte oberhalb der oberen Liasstufe (Punkte 12–19) wirkt sich der Regen nach 3–6 Tagen aus.
3. Auf die Punkte unterhalb der Liasstufe (Punkte 4–11) wirkt sich der Regen erst nach 10–12 Tagen aus.
4. Dasselbe Bild ergibt sich mit Bezug auf die Scherflächen. In der Umgebung der Liasstufe wird der Effekt des Regens schon nach zwei Tagen bemerkbar, weiter unten erst nach 6–7 Tagen.

Man kann sich daher folgendes physikalische Bild über die Mechanik des Rutsches machen: der Effekt des Regens macht sich im Rutschgebiet von

oben nach unten bemerkbar. Der obere Teil reagierte vor dem unteren. Man würde daher schliessen, dass der obere Teil instabil wird und auf den unteren drückt.

7 Zusammenfassung

Abschliessend kann man die Resultate der vorliegenden Studie wie folgt zusammenfassen:

1. Die untersuchte Rutschung in den Mösern ist eine progressive Rutschung im Opalinuston, die sich in Schüben immer weiter aufwärts ausgeweitet hat.
2. Der anstehende Opalinuston ist ein schwärzlicher, gut geschichteter Schieferton, der an und für sich völlig wasserdicht ist. Er enthält aber Klüfte, durch die Wasser in die Tiefe eindringen kann.
3. Durch die Verwitterung verliert der Opalinuston die Schichtstruktur und das Kalkskelett und wird durch Oxydationsvorgänge gelblich.
4. Die Stabilität des Materials ist vom Wassergehalt abhängig, durch den Zustandsänderungen von fest über plastisch bis fliessfähig auftreten. Die Verwandlung von geschichtetem zu verwittertem Material ist irreversibel, diejenige von festem zu plastischem und fliessfähigem Material reversibel.
5. Auslöser von «Grossbewegungen» sind vor allem grosse Winterniederschläge, kombiniert mit der Schneeschmelze. In neuerer Zeit konnten drei Perioden von «Grossbewegungen» erfasst werden: 1958/59, 1970 und 1977/78.
6. In jedem Fall wirkt sich der Regen auf die Zugspalten am oberen Abriss der Rutschung schon nach einem Tag aus, auf die Vorgänge im oberen Teil der Rutschung nach 3–6 Tagen und auf die Vorgänge im untersten Teil nach 10–12 Tagen.
7. Im Vorgelände der Rutschung wird durch den Bach Schlamm bis in die Aare verfrachtet.
8. Blickt man in die Vorzeit zurück, so stellt man fest, dass die Vorgänge in den Glazialzeiten in den Mergeln und Tonen weit aktiver gewesen sein müssen als heute. Auf den Niederterrassenschottern des Aaretales befinden sich im Bereich des mündenden Längibachtälchens 3–4 m Feinmaterial, das zu einem guten Teil aus dem Opalinuston stammt, wodurch die durchlässigen Schotter so abgedichtet sind, dass bei starken Niederschlägen Tümpel entstehen.
9. Blickt man in die nähere Zukunft, so stellt man fest, dass durch das Aufwärtsschreiten die Obergrenze des Opalinustones erreicht wurde. Die dortige Steilwand im Opalinuston von 50° Neigung und 9 m Höhe wird rasch verwittern. Dadurch wird die Basis der Murchisonaeschichten geschwächt, so dass über kurz oder lang Felsstürze und Gleitungen zu erwarten sind, was wieder zu weiteren progressiven Rutschungen führen wird. Durch Abbrüche ob der

heutigen Rutschung wird diese so belastet, dass es auch in dieser zu erhöhter Tätigkeit kommen wird.

10. Die hier gebotene Untersuchung kann als Beispiel einer einschlägigen Studie der Dynamik einer geomorphologischen Erscheinung dienen. Solche Erscheinungen sind durch drei Elemente beeinflusst: durch ihre topographische Form, durch das involvierte Material und durch die dynamischen Prozesse, die in diesem Material stattfinden.

Zum Schluss bleibt den Autoren die angenehme Pflicht, all denen zu danken, die sich während der nun über zwanzig Jahre dauernden Forschungen aktiv daran beteiligten. Der Gemeinderat von Schinznach-Dorf ermöglichte Rammsondierungen, die Ing. Linder vermittelte. Durch den schweizerischen Nationalfonds wurden Bohrungen ermöglicht, durch welche die Tiefe des oberen Lias unter der Rutschung und die Klüftigkeit des Opalinustons ermittelt wurden. Tonmineralogische Untersuchungen führte Dr. Müller-Vonmoos durch. Die geologischen Aufnahmen stammen von J. Haller. Durch das Baudepartement des Kantons Aargau erhielten wir Fliegeraufnahmen. Förster Lüem unterstützte uns mannigfach; die Gebrüder Stahel waren jahrelang Messgehilfen. Die statistischen Auswertungen und die Calcomp-Zeichnungen wurden am Rechenzentrum der Technischen Universität Wien ausgeführt. Das Kuratorium gemäss Kulturgesetz des Kantons Aargau unterstützte die Publikation dieser Arbeit durch die Bereitstellung eines Druckkostenbeitrages. Ihnen allen und vielen Nichtgenannten, nicht zuletzt Frau Dr. Gerber, sei für ihre Unterstützung gedankt.

8 Literatur

Madsen, F. T.: Quelldruckmessung an Tongesteinen und Berechnung des Quelldruckes nach der DLVO-Theorie. Mitt. Inst. Grundbau & Bodenmech. der ETH Zürich *108:* 1–65 (1976).

Sachs, Lothar: Statistische Auswertungsmethoden. 3. Aufl., 545 S. Berlin: Springer 1971.

Scheidegger, A. E.: Orientationsstruktur der Talanlagen in der Schweiz. Geogr. Helv. *34* (1): 9–15 (1979).

Prof. Dr. A. E. Scheidegger, Institut für Theoretische Geodäsie und Geophysik, Abteilung Geophysik, Technische Universität, Wien, Gusshausstr. 27–29, A-1040 Wien.