

# **Böschungsverhalten in zweisecharig geklüftetem Material**

Werner L. Furlinger

10 Abb.

**Anschrift:**

Werner L. Furlinger  
Geol. Inst. Univ. Wien  
Universitätsstr. 7  
A-1010 Wien

Mitt. Ges. Geol. Bergbaustud.

22. Bd.

S. 233—242

Wien, Dez. 1973

### Zusammenfassung

Bei Vorversuchen zu einer Modellversuchsreihe, die zur Klärung eines speziellen Bewegungsmechanismus in Quarzphylliten (W. L. FÜRLINGER, 1972 b) diente, sind Verformungsbilder entstanden, die als anschauliche Grundlage zur Erklärung bestimmter hangtektonischer und tektonischer Phänomene herangezogen werden können. Anhand einiger Versuchsphotos werden Bewegungsbilder, die zu ihrer Entstehung führenden kinematischen Vorgänge und Versuchsabläufe beschrieben.

### Summary

In an experimental serie which helped to clear a special tectonic mechanism in quartz phyllite (W. L. FÜRLINGER, 1972 b) deformations resulted which can be used as a basis for the explanation of certain slope-tectonic and tectonic phenomena. With the illustration of some experimental photos pictures of dynamics, the cinematic process which effected them and experiments are described.

### Résumé

Pendant les recherches préalables d'une série d'expériences modèles qui a servi à clarifier un mécanisme de mouvement spécial dans des phyllades de quartz (W. L. FÜRLINGER, 1972 b) il se sont montrés des images de déformation qui peuvent servir comme base évidente pour expliquer certains phénomènes tectoniques et tectoniques de versant. A l'aide de quelques photos d'essai on décrit des images de mouvement ainsi que les procédés cinématiques et le déroulement des expériences qui ont mené à leur formation.

## 1. EINFÜHRUNG

Herr Professor L. MÜLLER hat anlässlich einer Sitzung des Sonderforschungsbereiches 77 — Felsmechanik — in Karlsruhe \*) das Kräfte-spiel in einer Böschung treffend charakterisiert indem er sagte, eine Böschung sei eine Rutschung, die noch nicht abgegangen ist.

Überaus deutlich tritt uns in der Tat das Bestreben zum Hangausgleich im alpinen Raum in Form großer Bergstürze (A. HEIM, 1932), der Bergzerreißen (O. AMPFERER, 1939) und des Talzuschubs (J. STINI, 1941) entgegen. Es sind dies Teilakte jenes, mit den Worten O. LANSERS (1966) „... an sich unaufhaltsamen und vom Menschen nicht wesentlich beeinflussbaren Geschehens ... das auf die Einebnung der gesamten Erdoberfläche hinarbeitet“ — Teilprozesse exogener Dynamik also.

Diese in Böschungen allgegenwärtige latente Bewegungsbereitschaft wird überall dort zu einem Faktor über dessen Wirksamkeit Rechenschaft gegeben werden muß, wo Bauwerke des Menschen sich in ihrem Einflußbereich befinden, um nicht überraschenden und unerwarteten Katastrophenereignissen Raum zu geben.

\*) Jahresversammlung des Sonderforschungsbereiches 77 — Felsmechanik — am Inst. f. Boden- u. Felsmechanik d. Universität Karlsruhe, K-he 1971.

Eines der letzten solcher Ereignisse war das Unglück von Longarone (L. MÜLLER, 1964, 1968; L. BROILI, 1967) wo eine unkontrolliert abgelaufene Großrutschung einen Großteil des Staurauminhaltes aus der Vajontschlucht verdrängte und über die Ortschaft ergoß.

Dieses Beispiel möge als Hinweis für die Bedeutung solcher Vorgänge in Stauräumen stehen.

Über die Schwierigkeiten, die ein Talzusub einem Bergbaubetrieb bereiten kann, haben E. CLAR u. H. P. WEISS (1965) am Beispiel der Millstätter Alpe bei Radenthein berichtet. Sie lassen sich klar an der überdurchschnittlichen Unfallhäufigkeit ermessen, die nach dem Erkennen der Bewegung und dem Ergreifen planerischer, technischer und organisatorischer Gegenmaßnahmen beträchtlich gesenkt werden konnte.

Die praktischen Belange der Wildbachverbauung sind durch die Wirkungen tiefgreifender Bewegungen im Fels in zweierlei Hinsicht betroffen: Einmal verursachen Druckerscheinungen am sich vorwölbenden Böschungsfuß Zerstörungen an Sperrbauwerken (G. KRONFELLNER-KRAUS, 1970), zum anderen gehen Talzuschiebe mit einer weitestgehenden Zerrüttung und Zertrümmerung der betroffenen Felsbereiche einher, wodurch dem erodierenden Wasser eine schier unbegrenzte Menge sich ständig ergänzenden Geschiebes zur Verfügung steht.

Aus solchen Beispielen wird deutlich, wie wichtig die Kenntnis des Verhaltens von Böschungen ist, um deren Weiterentwicklung zumindest qualitativ beurteilen zu können.

Im folgenden soll über Modellversuche berichtet werden, die zur Klärung einiger im Verlauf der Geländearbeiten zu meiner Dissertation über „Talzusub und Wildbachverbauung“ beobachteter Phänomene am Institut für Boden- u. Felsmechanik der Univ. Karlsruhe, als Beitrag zum Sonderforschungsbereich 77 — Felsmechanik — durchgeführt wurden (W. L. FÜRLINGER, 1972 a).

## 2. METHODE

Der von J. STINI (1953) und E. CLAR (1960) angeregte und von U. ZISCHINSKY (1966, 1967, 1969) eingeschlagene Weg, große Hangbewegungen als „Großversuche der Natur“ mit geologischen Mitteln zu analysieren um daraus auf das mechanische Verhalten des Materials „Fels“ schließen zu können, wurde bei den Feldarbeiten weiter verfolgt und mit Modellversuchen ergänzt.

Da Fels — das „Gebirge“ im bergmännischen Sprachgebrauch — eine geregelte Häufung von Kluftkörpern, oder mit STINI ein „wohlgefügtes Trockenmauerwerk“ ist, unterscheiden sich seine Materialeigenschaften deutlich von denen des Gesteins. Diese Tatsache ist mit den Worten: Festigkeit und Formänderung felsigen Gebirges hängt vornehmlich vom Trennflächengefüge und nur wenig vom Gesteinsmaterial ab — als erster Hauptsatz des sogenannten Salzburger Kreises der Österreichischen Felsmechanik-Schule formuliert worden.

Das berechtigt dazu, bei den geologischen Untersuchungen die Analyse des Trennflächengefüges in den Vordergrund zu rücken und bei Modell-

versuchen über das Böschungsverhalten die Ähnlichkeitsbedingungen zwischen natürlichem Gebirgssystem und Modellsystem auf jenes Gefüge zu beschränken.

### 3. MODELLVERSUCHE

Die bevorzugte Modellierung eines, für einen zu untersuchenden Vorgang als wesentlich erachteten Einflußfaktors, unter Vernachlässigung anderer unwesentlicher, ist ein im Modellversuchswesen gebräuchliches Vorgehen (G. N. KUZNECOW, 1962). Deshalb wurde beim Aufbau der Experimentalmodelle, mit deren Hilfe auf heuristischem Weg Auskünfte über das kinematische Verhalten zweischarig geklüfteter Felsmassen gesucht werden sollten, Wert auf bestmögliche Gefügeäquivalenz gelegt.

#### 3.1 Ausgangssituation

Die gefügekundlichen Untersuchungen im Einzugsgebiet der Salzach NE des Gerlospasses haben gezeigt, daß in einigen, durch Talzuschübe charakteristisch verformten Hängen das Auftreten zweier mechanisch wirksamer Kluftscharen typisch ist (W. L. FÜRLINGER, 1972 a, b).

Es handelt sich dabei um eine straff geregelte Schieferungskluftschär die mit  $55-60^\circ$  gegen N fällt und um eine tautozonale h01-Kluftschär, deren Fallen mit etwa  $70^\circ$  nach S dagegen gerichtet ist.

Die betreffenden Hänge folgen mit ihrer Oberfläche im wesentlichen der Stellung der Schieferung (Isoklinalhänge).

Daraus ergeben sich die inneren Randbedingungen für den Aufbau des Modellsystems, das als zweidimensionaler Lotschnitt in der Deformationsebene (N-S) betrachtet werden kann.

#### 3.2 Modellmaterial

Als Modellmaterial wurden Lochkarten gewählt, da diese dem dünnstiefriig — großplattigen Habitus des Quarzphyllites im Untersuchungsgebiet am besten entsprechen.

Die geringe Kartenstärke ermöglicht eine Simulation der Schieferung, die Höhe der Karten die Vorzeichnung der zweiten Kluftschär.

Durch entsprechende Wahl der äußeren Randbedingungen läßt sich die Stellung der Klüftung und der Schieferung unabhängig voneinander variieren. Kartenstärke, damit Schieferungskluftabstand  $d_s$ , und Kartenhöhe  $b$  sind bekannt und nicht variabel. Veränderliche Parameter hingegen sind Neigung der Schieferungsklüftung  $\alpha_s$  und der zweiten Kluftschär  $\beta_{kl}$ . Davon abhängig ist der Kluftabstand  $d_{kl}$ .

Der Reibungswinkel parallel zu den Kartenflächen liegt zwischen  $18$  und  $22^\circ$ .

#### 3.3 Versuchsaufbau

Zur Aufnahme der Lochkartenpakete diente ein aus Profilstahlteilen zusammengesetzter Versuchsrahmen am Inst. f. Boden- u. Felsmechanik in Karlsruhe. Die gewünschten Kluftstellungen lassen sich durch Orien-

tierung an geeignet zugeschnittenen, randlich eingelegten Holzkeilen erreichen.

Nach dem systematischen Aufbauen der Kartenpakete bis zu einer Höhe von 120 bis 150 cm können Böschungen durch teilweisen lagenweisen Abbau von Kartenstapeln angestrebt werden (Erosion). Dabei wurden die unter dem Eigengewicht des Böschungskörpers sich einstellenden Verformungen beobachtet. Charakteristische Abbauphasen wurden fotografisch festgehalten, Bewegungsvorgänge zur weiteren Auswertung der Kinematik mit 16 mm Filmen z. T. in Zeitlupe dokumentiert \*).

### 3.4 Versuchsreihe ohne Zwischenkarten

Abbauversuche, bei denen eine flachere als die der Schieferung entsprechende Neigung angestrebt wurde, zeigten keine mit freiem Auge sichtbaren Deformationen des Böschungskörpers. Erst bei Annäherung der Böschungslinie an die mit  $60^\circ$  nach links fallende Schieferungsneigung wurde die Bewegungstendenz deutlich.

Erwartungsgemäß kam es im wesentlichen zu einem schieferungsparallelen Abgleiten von Kartenpaketen das in Bruchteilen von Sekunden ablief.

Der Auslösemechanismus, der Tiefgang der Bewegung sowie die Kinematik der abgleitenden Massen zeigten jedoch interessante Besonderheiten, die eine eingehendere Beschreibung rechtfertigen.

#### 3.41 Phase 002—03

Die in der Abbildung 1 dargestellte Situation zeigt den Auslösemechanismus der Abgleitungen, welcher sich für die gesamte Versuchsreihe als typisch erwies. Bei fortgeschrittenem Abbau kommt es im Böschungsfuß zu einem tiefgreifenden Ausknicken zweier aneinander grenzender Modellelementpakete entlang einer Kluffläche. Dabei wird die Schieferungsstellung im tiefer liegenden Paket aus ursprünglichem links-Fallen überkippt, das darüberliegende Paket rotiert um etwa den gleichen Winkelbetrag spiegelbildlich in flachere Stellung.

Die im Prinzip anfänglich als Internrotation durch Gleitung an den engständigen Schieferungsfugen ablaufende Deformation der ausknickenden Kartenpakete führt zu deren Plättung, das heißt zu einer Verkürzung des ursprünglichen Abstands zwischen den betroffenen gegenfallenden Klüften.

Dadurch entsteht Platz für ein Nachgleiten des darüberliegenden Böschungskörpers entlang der Schieferungsfugen, was sich entweder in einem „Hakenwerfen“ (Abb. 2) oder in Abschiebungen (Abb. 4, 7) der durch die h01-Klüfte begrenzten Modellelementssäulen ausdrückt. Der Tiefgang des Hakenwerfens ist von der Tiefe des Ausknickens abhängig (Abb. 2).

---

\*) Film „Bewegungsmechanismus von Hangbewegungen in zweischarig geklüftetem Material — Modellversuche“ am Inst. f. Boden- u. Felsmechanik, Univ. Karlsruhe.

Der Endzustand in Abb. 2 ist aus Abb. 1 hervorgegangen. Er zeigt, daß im Verlaufe der Bewegung mehrere Knickfugen entstehen können. Der ursprüngliche Knick in der 3. Kluffuge (Abb. 1) wurde funktionslos, es entstanden neue Knickstellen in der 6. und 11. Fuge (Abb. 2). Diese lassen sich an dem gegensinnigen Einfallen der angrenzenden Kartenpakete gut durch die Gleitmasse verfolgen. Indem sie einen überschobenen von einem überschiebenden Körper trennen, stellen sie Überschiebungsbahnen dar.

#### 3.42 Phase 002—01

In den Abbildungen 4 und 5 ist deutlich der durch Überfahren überkippte ursprüngliche Böschungsfuß zu erkennen, über den sich ein Deckenstapel durch Übereinandergleiten des abgerutschten Böschungsteiles gelegt hat. Die interne Verformung der an einer deutlich ausgeprägten Gleitbahn abgerutschten Scholle erfolgte hier fast affin (Abb. 4).

#### 3.43 Phase 002—02

Die Abbildung 6 zeigt eine zweiphasig entstandene Struktur. Nach teilweise Abräumen der Gleitmasse der Abb. 5 kam es zu einem neuerlichen Ausbrechen des Böschungsfußes und zu einer „Überfaltung“ der noch vorhandenen Reste der ersten Gleitphase. So entstand diese vergente Gleitbrettfalte (Abb. 6) die prinzipiell dem Mechanismus, der zur Bildung des in Abb. 2 u. 3 dargestellten Bewegungsbildes führte, gehorcht. Auch dort bewirkt das nochmalige Ausknicken ein teilweises Überfalten des tiefer liegenden Systems. Es ist hier jedoch während eines einzigen Bewegungsablaufes entstanden.

#### 3.44 Phase 001—09

Die Abbildung 7 stellt eine Gleitung dar, bei der der Gesamtgleitweg aus vielen, auf zahlreiche Gleitbahnen verteilte Teilbeträgen summierbar ist. Bemerkenswert sind auch hier die zwei Knickfugen im Böschungsfuß.

Durch das Branden der extrem ausgedünnten Gleitdecken am linken Rahmenrand (Abb. 8) ist eine überkippte Falte mit verkehrter Serie im Liegendschenkel entstanden. Entlang der Achsenebene ist sie fast durchgeschert.

Die große Mobilität des Materials, die zu den eindrucksvollen Überschiebungsphänomenen (Abb. 2, 8) führt, liegt in seiner Fähigkeit, entlang der Schieferung zu zergleiten begründet. Interessant ist dabei, daß sich die Karten benachbarter Pakete nicht ineinander verhaken sondern daß die Modellelementssäulen eigenständig reagieren und sich ausdünnend in langen Lamellen übereinander fortbewegen (Abb. 2, 8).

### 4. ANALOGIEN ZU „HANGTEKTONISCHEN“ PHÄNOMENEN

Bezüglich einiger im Gelände an Hangbewegungen beobachteter Erscheinungen haben die Modellversuche anschauliche Grundlagen zu deren mechanischer Deutung geliefert.

#### 4.1 Brucheck Bach

Gegen den Einschnitt eines Nebenastes des Brucheckbaches, eines Zuflusses der Salzach in ihrem hinteren Einzugsgebiet NE des Gerlospasses, drängt, vom Larmach K. (2158) sich ablösend, eine Hangbewegung.

Auf die, gegenüber dem umgebenden Homogenbereich selbst schon versteilte, aber noch NE-fallende Schieferung (s 030/50), folgt im Uferanriß unvermittelt und ohne erkennbare Übergänge flach S- bis SW-fallende Schieferung (s 210/35).

Die Abbildung 9 zeigt einen charakteristischen Ausschnitt aus dem rechten Ufer des Gerinnes und vermittelt einen Eindruck von den gefügekundlichen Verhältnissen. Man sieht, wie die steil N-fallenden Schieferungsklüfte (rechte untere Bildhälfte) durch eine Zerrüttungszone mit kleinstückigem Schutt von den darüberliegenden flach S-fallenden getrennt sind. Im Bacheinschnitt selbst, soweit er nicht durch Geröll und Schutt verlegt ist, trifft man auf senkrecht stehende, bisweilen sehr steil S-fallende (also überkippte) s, die Schieferungsklüfte sind eng geschlossen, erscheinen zusammengepreßt. Das Einfallen der Schieferung im Gegenhang, in der linken Uferböschung, ordnet sich wieder in das regional recht einheitliche Bild (s 030/50) ein.

Eine Erklärungsmöglichkeit für diese Situation bietet der vorhin dargestellte Mechanismus des Ausknickens (3.41), der im Verlauf der Bewegung zu einer analog ausgeprägten Diskordanz zwischen übereinanderliegenden Schieferpaketen führt (vgl. Abb. 3).

Die Steilstellung und Pressung der Phyllite im Bachbett fügt sich zwanglos in dieses Bild.

Eine andere Deutungsmöglichkeit ist natürlich die des Hakenwerfens infolge Überkipfung der Schieferung.

#### 4.2 Brucheck

Einen weiteren Hinweis auf das Vorhandensein des anhand der Abbildung 1 erläuterten Ausknick-Mechanismus finden wir am Fuße des Bruchecks, einer fast 500 m hohen Bergsturzniche nahe der Salzachbrücke (1435), mit der die alte Gerlos-Bundesstraße die junge Salzach quert.

Dort trifft man auf Phyllitpakete, die im Handstückbereich brechend deformiert erscheinen, was die an den Knickstellen sich öffnenden Klüfte belegen (Abb. 10).

### 5. ANALOGIEN ZU GROSSTEKTONISCHEN PHÄNOMENEN

Die beschriebenen Modellversuche haben Formen entstehen lassen, die zunächst rein phänomenologisch zahlreichen alpin-tektonischen Bildungen wie Überschiebungen, Decken, Stirneinrollungen, Stirnschuppen, Reibungsteppichen, vergenten und durchgescherten Falten usw. gleichen.

Mag das Gefälle der hier entstandenen Gleitflächen zur Erklärung tektonischer Phänomene zu steil erscheinen, so sei auf den von M. K. HUBBERT u. W. W. RUBEY (1959) dargestellten und von E. CLAR (1965) zur Deutung ostalpiner Deckenbewegungen herangezogenen Mechanismus erinnert, wo gespanntes Porenwasser den Reibungswinkel in mächtigen

Sedimentpaketen bis auf wenige Grade abmindern kann. Unter solchen Verhältnissen ist es dann denkbar, daß verwandte Strukturen durch Gleitungen an wesentlich flacheren Bahnen entstehen können.

Die Unterschiede zwischen den schwerkraftgetriebenen Versuchsgleitungen und gravitationstektonischen Phänomenen liegen im wesentlichen nur in der Größenordnung des Böschungswinkels, die Qualität der Vorgänge sollte jedenfalls vergleichbar sein.

## 6. SCHLUSSBEMERKUNGEN

Die dargelegten Experimente und deren Ergebnisse sind Realitäten in ihrem — gemessen an den tatsächlichen Erscheinungen, die sie erklären helfen sollen — bescheidenen Maßstab. Inwieweit sie für die Klärung großmaßstäblicher Phänomene herangezogen werden können, muß von Fall zu Fall durch gewissenhafte Vergleiche mit den natürlichen Verhältnissen geprüft werden.

„Experimente ‚beweisen‘ freilich nichts und sollen auch nichts beweisen als Möglichkeiten und Verträglichkeiten, aber das ist ja schon viel“ (L. MÜLLER).

Mögen diese Versuche als Beitrag zur Klärung der kinematischen Abläufe in großen hochteilbeweglichen Gleitmassen verstanden werden, die Vorstellbarkeit einer für derartige Vorgänge brauchbaren Mechanik fördern und zu weiterem Vorgehen in dieser Richtung ermuntern.

## LITERATUR

- AMPFERER, O., 1939: Über einige Formen der Bergzerreißung. — Sber. Akad. Wiss. Wien, mathem.-naturw. Kl., Abt. I, 148. Bd., Wien.
- BROILL, L., 1967: New Knowledges on the Geomorphology of the Vaiont Slide Slip Surface. — Rock Mech. and Eng. Geol., Vol. V/1.
- CLAR, E., 1960: Gebirgsbau und Geomechanik. — Geol. Bauwes., 25, 186—190.
- CLAR, E., 1965: Zum Bewegungsbild des Gebirgsbaues der Ostalpen. — Verh. Geol. Bundesanst., Sonderh. G., Wien.
- CLAR, E. u. H. P. WEISS, 1965: Erfahrungen im Talzusub des Magnesit-Bergbaues auf der Millsttter Alpe. — Berg- u. Httenmnn. Mh., 110, H. 12.
- FURLINGER, W. L., 1972 a: Talzusub in schiefrig-plattigem Fels und die Klrung ihres Bewegunsmechanismus im gefgequivalenten Modellversuch. — Sonderforschungsbereich 77 — Felsmechanik — Univ. Karlsruhe, Jahresber. 1971, 80—95, K-he, Mrz 1972.
- FURLINGER, W. L., 1972 b: Mechanismus einer Hangbewegung in Quarzphylliten und dessen Kontrolle im gefgequivalenten Modellversuch. — Geol. Rdsch., Bd. 61, H. 3, 1972.
- HEIM, A., 1932: Bergsturz und Menschenleben. — Vierteljahrshr. d. Naturf. Ges., Jg. 77, Zrich.
- HUBBERT, M. K. u. W. W. RUBEY, 1959: Role of fluid pressure in mechanics of overthrusting faulting I. — Bull. Geol. Soc. Am. 70, 115.

- KRONFELLNER—KRAUS, G., 1970: Über offene Wildbachsperren. — Mitt. d. Forstl. Bundes-Versuchsanst. Wien, H. 88, 1970.
- KUZNECOW, G. N., 1962: Die Modellierung von Gebirgsdruckprozessen mit Hilfe äquivalenter Materialien. — Ber. 3. Ländertr. Int. Büro f. Gebirgsmech., Leipzig 1961; Berlin, 1962.
- LANSER, O., 1966: Felsstürze und Hangbewegungen in der Sicht des Bauingenieurs. — Geol. Bauwes.
- MÜLLER-Salzburg, L., 1964: The Rock Slide in the Vaiont Valley. — Rock Mech. and Eng. Geol. Vol II/3—4.
- MÜLLER-Salzburg, L., 1968: New Considerations on the Vaiont Slide. — Felsmech. u. Ing.-Geol., VI/1—2.
- STINI, J., 1953: Behelfsmäßige Untersuchungen der Gebirgsfestigkeit. — Geol. u. Bauwesen 20, H. 1, 34—36.
- ZISCHINSKY, U., 1966: On the deformation of high slopes. — Sitz. Ber. 1. Kongr. intern. Ges. Felsmech. 2, 179—185, Lissabon 1966.
- ZISCHINSKY, U., 1967: Bewegungsbilder instabiler Talflanken. — Mitt. Ges. Geol. Bergbaustud. Wien, 17 (1966).
- ZISCHINSKY, U., 1968: Über Sackungen. — Felsmech. Ing. Geol. 6/4, 1968.

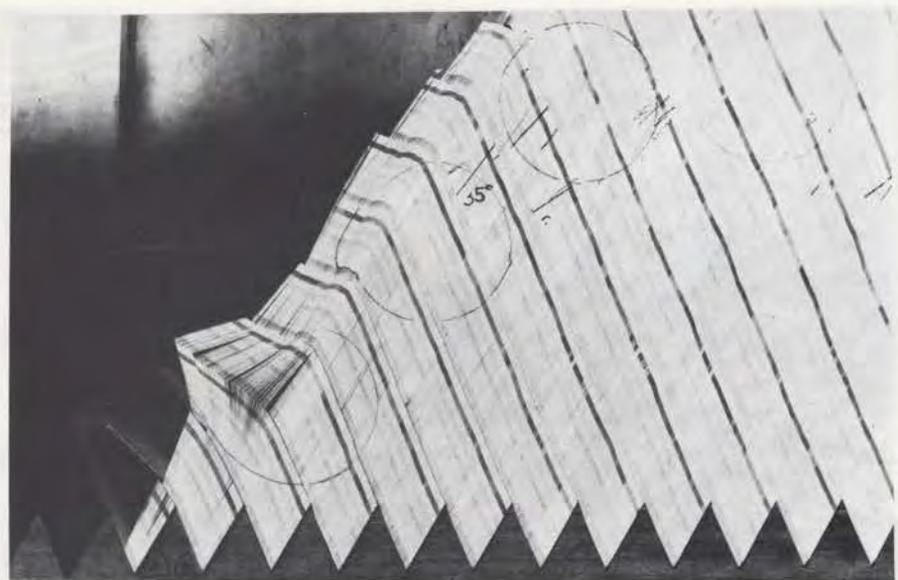


Abb. 1

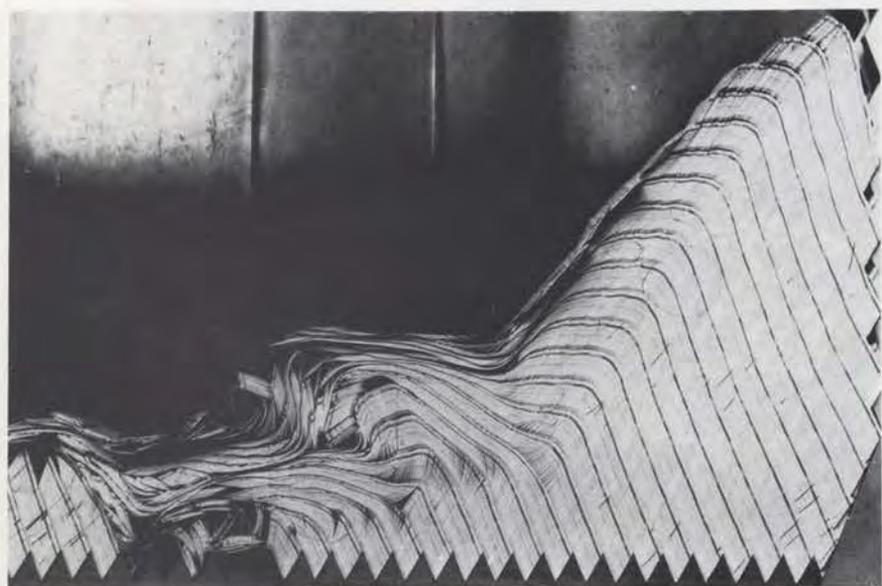


Abb. 2



Abb. 3



Abb. 4

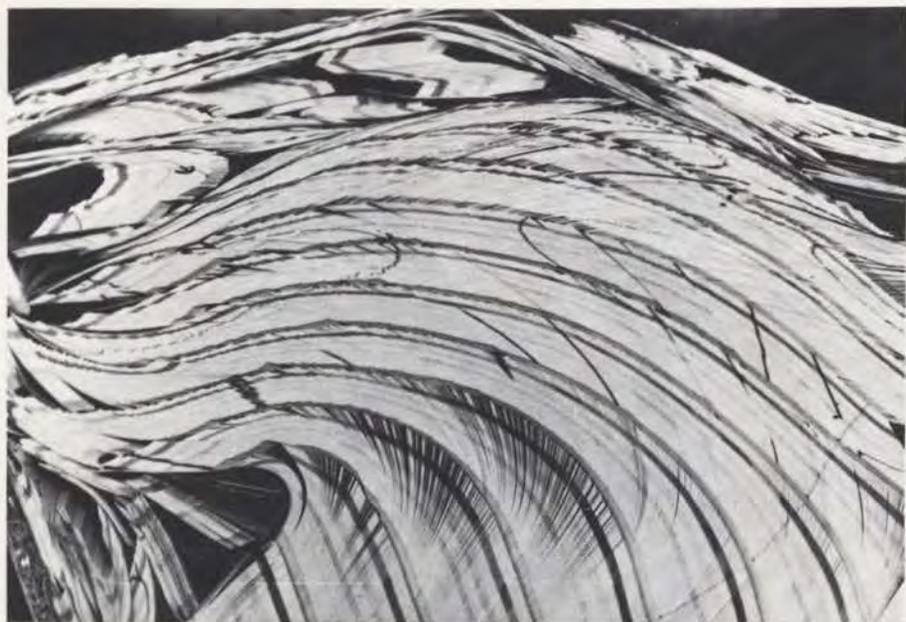


Abb. 5



Abb. 6



Abb. 7



Abb. 8



Abb. 9



Abb. 10