

Fels- und Eisabsturzprognosen mittels Deformationsmessungen

André Flotron

SYMPOSIUM DER FIG-KOMMISSIONEN

- 5. INSTRUMENTE UND VERMESSUNGSMETHODEN
 - 6. INGENIEURVERMESSUNGEN
-

29. September bis 8. Oktober 1976

TECHNISCHE HOCHSCHULE DARMSTADT

FELS- UND EISSTURZPROGNOSEN AUS DEFORMATIONSMESSUNGEN

André Flotron, Meiringen

Beobachtungen von Deformationen an den natürlichen Objekten Fels und Eis sind in der vermessungstechnischen Literatur im Vergleich mit Angaben über Bauwerksvermessungen recht spärlich zu finden. Die zahlreichen Erfahrungen aus den Messungen an Ingenieurbauten können wohl bezüglich der Messmethoden, nicht aber zur Interpretation der Ergebnisse auf die Deformationen von natürlichen Objekten übertragen werden. Dies geht eindeutig aus den verschiedenen Problemen hervor:

Deformationsvermessungen an Bauten sollen die Richtigkeit der Berechnungen und der angenommenen Randbedingungen nach Fertigstellung des Bauwerkes und im Laufe der Zeit beweisen. Die Sicherheit des Werkes ist gewährleistet, wenn die Deformationen infolge der Spannungen in festgelegten Grenzen innerhalb den elastischen Bereichen der Materialien liegen. Im Gegensatz dazu werden Deformationsmessungen an natürlichen Objekten immer erst eingesetzt, wenn die Elastizitätsgrenze des Gesteins beziehungsweise die viskose Fließgrenze des Eises bereits überschritten ist. Der Bruchvorgang hat in diesem Zeitpunkt also bereits begonnen. Die Frage lautet somit nicht mehr nach der Stabilität, sondern nach der weiteren Entwicklung des Bruchablaufes und nach einer möglichst genauen Angabe des noch verbleibenden Zeitraumes bis zur vollständigen Zerstörung.

Die physikalischen Gesetzmässigkeiten, speziell beim Bruch von Eis, sind bis heute nicht bekannt. Die Mechanik der Bewegung muss aus den Messresultaten interpretiert werden. Die angreifenden Kräfte sind schwer abzuschätzen und über die Materialkonstanten wie Druckfestigkeit und Homogenität ist man zumeist auf Vermutungen angewiesen. Willkürliche Lastveränderungen, mit welchen

Bauwerksdeformationen im Sinne von Experimenten bestimmt werden können, sind bei der Beobachtung von natürlichen Objekten kaum durchführbar.

Im Folgenden werden anhand von drei Beispielen die Resultate von Deformationsmessungen und ihre Interpretation gezeigt.

G l e t s c h e r a b b r u c h a m W e i s s h o r n

Das Dorf Randa unterhalb Zermatt wurde durch den Bisgletscher am Weisshorn schon mehrmals bedroht. Die Eisabstürze von 1736 und von 1819 forderten Menschenleben und richteten grossen Schaden an. Als sich Ende August 1972 am Hängegletscher des Weisshorns eine ungewöhnliche Entwicklung zeigte, wurden Glaziologen zur Beurteilung der Lage beigezogen. Diesen Experten war bekannt, dass der Eissturz von 1819 aus dem Gebiet dieses Hängegletschers ausbrach. Damit war klar, dass der weiteren Entwicklung volle Aufmerksamkeit geschenkt werden musste. Das eidgenössische Institut für Schnee- und Lawinenforschung erstellte ein Gutachten über die Ausbreitung eines eventuellen Absturzes. Nach dieser Expertise war zu erwarten, dass ein Abbruch von ca 200'000 m³ den Rand des unten liegenden Gletscherplateaus nicht überschreiten werde. Sollte die Ausbruchmasse wesentlich grösser sein, würden die Eistrümmer die Talsohle erreichen und damit das Dorf Randa ernstlich gefährden.

Die Experten, die die Absturzgefahr laufend beurteilen mussten, stellten folgendes Vermessungsprogramm auf:

- Berechnung der bewegenden Eismasse und Geschwindigkeitsbestimmung durch photogrammetrische Kartierung der Flugbilder, die im Programm der Gletscherüberwachung seit 1968 alljährlich im Herbst aufgenommen wurden

- genaue Einmessung einiger Punkte des Gletschers in kurzen Zeitintervallen um Geschwindigkeitsänderungen, vor allem grosse Beschleunigungen, festzustellen
- häufige Fotoaufnahmen des Gletschers um Zeitpunkt und Masse der Abbrüche, Veränderungen der Gletscherform und der Spalten zu registrieren.

Da die Vermessungsaufgabe nicht gerade alltäglich war, soll ihre Lösung hier näher beschrieben werden.

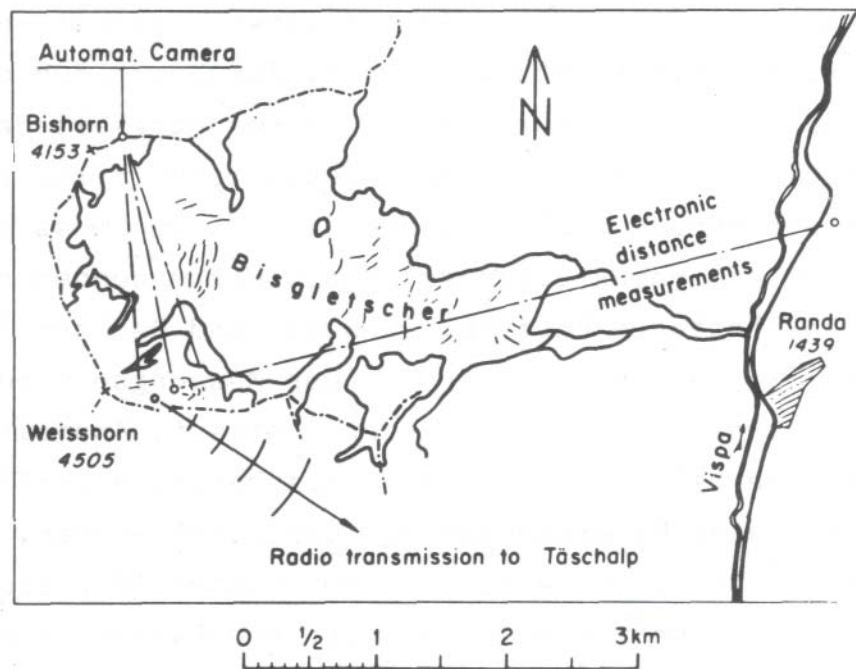


Fig. 1 Uebersichtskarte des Bisgletschers

Die erste Aufgabe, die Kartierung der vorhandenen Luftbilder, bot keine Schwierigkeiten. Die Aufnahmen konnten aufgrund von Kontrollpunkten der amtlichen Karte 1 : 10'000 am Stereoautographen eingepasst und im Massstab 1 : 2000 mit 10 m Höhenkurven ausgewertet werden. Aus dem Kurvenbild wurde die absturz-

gefährdete Masse zu 500'000 m³ ermittelt. Für einige in allen Fotomodellen genau identifizierbare Punkte konnte die jeweilige mittlere Jahres-Fliessgeschwindigkeit bestimmt werden. Für die kurzfristige und häufige Vermessung mehrerer Punkte des Gletschers wurden etliche Möglichkeiten studiert. Wegen der extremen Höhenlage auf 4200 Meter, der schwierigen Zugänglichkeit und der ständigen Abbruchgefahr musste ein öfters Begehen des Eises vermieden werden. Als einfachste und sicherste Methode ergab sich die Vektormessung von einem Punkt im Tal zu permanent im Eis versetzten Miren. Die Messdistanz betrug ca. 6 Kilometer bei 2900 Meter Höhenunterschied. Zur Distanzmessung wurde ein Laser-Geodimeter eingesetzt. Die Punkte im Eis wurden mit Stahlstangen signalisiert, die auf einem speziell konstruierten Stangenkopf die Reflektoren trugen. Zur Korrektur der Distanzmessung bezüglich Temperatur, Druck und Feuchtigkeit der Luft standen nur die Ablesungen bei der Messstation im Tal zur Verfügung. Die entsprechenden Werte bei den Reflektoren mussten aus den Angaben der beiden nächst liegenden Radio-Wettersonden der Meteorologischen Stationen Payerne (Schweiz) und Mailand interpoliert werden. Zur laufenden Kontrolle der Messungen wurde am Grat zum Weisshorn ein fixer Reflektor montiert. Anomalien, bedingt durch instrumentelle Fehler oder atmosphärische Einflüsse konnten mittels dieser Referenzmessung korrigiert werden. Aus den Differenzen der total 56 Messungen vom Oktober 1972 bis Juli 1973 zu diesem Fixpunkt konnte der mittlere Fehler einer (schiefen) Distanzmessung zu +/- 12 mm bestimmt werden. Derselbe Fixpunkt diente auch zur Kontrolle, Korrektur und Genauigkeitsberechnung der Winkelmessung. Als mittlerer Fehler einer Horizontalrichtung ergab sich +/- 2 cc und einer Höhenwinkelmessung +/- 6 cc vor, resp. +/- 3 cc nach der Einführung der Refraktionskorrektur. Mit diesen Werten wurde der mittlere Lagefehler einer Punktmessung zu +/- 22 mm sowohl längs wie quer zum Messstrahl und der mittlere Höhenfehler zu +/- 20 mm berechnet.

Diese Vermessungsmethode bewährte sich gut. Schwierigkeiten waren ausschliesslich durch ungünstige Wetterverhältnisse bedingt. Mitte Juli, ca. einen Monat vor dem endgültigen Abbruch, waren zwei Miren mit den vorgängigen, kleineren Eisabbrüchen abgestürzt und eine dritte wurde durch Eistrümmer verdeckt. Die Rekonstruktion dieser Messpunkte auf dem nun rasch fliessenden Eis war wegen der drohenden Absturzgefahr nicht mehr möglich. Glücklicherweise war zu diesem Zeitpunkt das durch die Abteilung für Hydrologie und Glaziologie montierte mechanische Messmittel, ein sogenannter Kryokinegraph, betriebsbereit. Dieses Instrument arbeitet nach folgendem Prinzip: Im bewegenden Eis wird das Ende eines dünnen Stahlseils verankert. Das Seil läuft über eine Trommel der Messstation, die im ruhenden Eis montiert ist. Die Eisbewegung wird damit als Drehung dieser Trommel gemessen. Die Messwerte wurden drahtlos nach einer Empfangsstation in der Nähe vor Randa übertragen. Dank dieser Messeinrichtung sind die Endgeschwindigkeiten der Eismasse in den letzten Tagen vor dem Absturz bekannt.

Die dritte Aufgabe wurde mittels einer auf dem Bishorn installierten automatischen Kamera gelöst, die täglich zwei Aufnahmen des Gletschers machen sollte. Die niedrige Temperatur auf 4100 m Höhe setzten sowohl den elektrischen Batterien wie der Kameratechnik zu, so dass leider etliche Ausfälle entstanden. Immerhin war es dank dieser Fotos möglich, Zeitpunkt und Ort einzelner, kleiner Teilabstürze und die Formen der Ausbruchflächen festzuhalten.

Die Aufnahmen gaben ferner gute Grundlagen zur photogrammetrischen Kartierung der Eisbewegung. Die Auswertung geschah am Stereogerät, indem zwei Aufnahmen im zeitlichen Abstand von ca. 10 Tagen in die Auswertekammern eingelegt wurden. Die durch die Bewegung des Objektes verursachten Bildparallaxen sind bei dieser Methode als räumlich-stereoskopischer Eindruck erfassbar und können analog wie Höhenschichtlinien gezeichnet werden. Ein Beispiel von total sieben Auswertungen ist in Fig. 2 abgebildet.

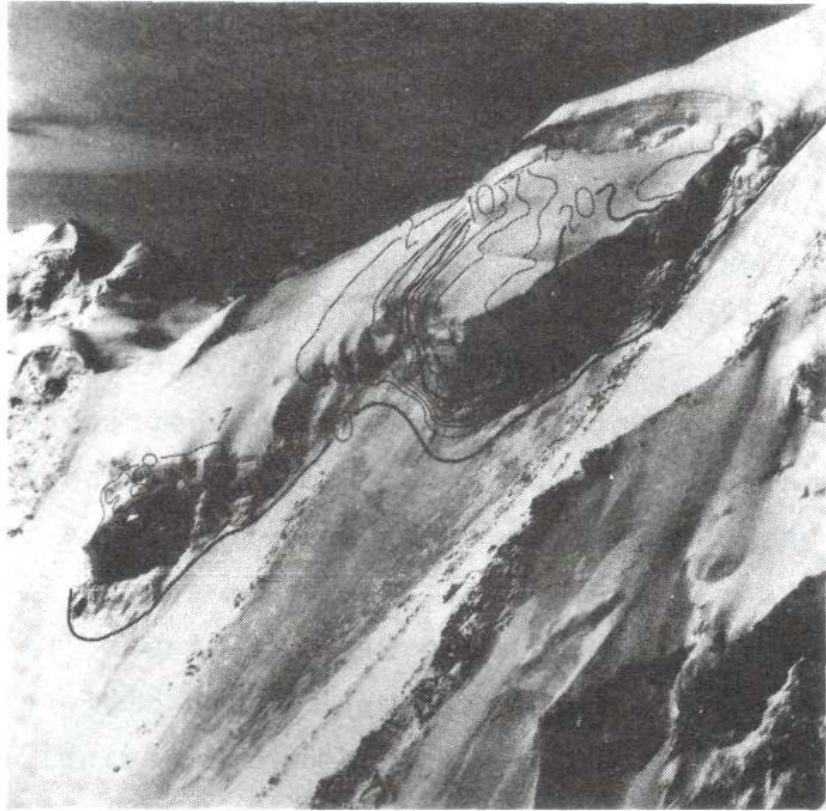


Fig. 2 Linien gleicher Geschwindigkeiten in cm/Tag
Aufnahmen vom 13. 5 und 25. 5 1973
Dargestellt ist die Bewegungskomponente in
der Bildebene und in der Bilddiagonale von
oben rechts nach unten links.

Aufgrund der Auswertung der Luftbilder und der ersten geodätischen Messungen zeigte sich, dass die Geschwindigkeit des Eises progressiv mit der Zeit zunahm. Die Messwerte liessen sich durch Polynome oder Exponentialfunktionen kaum annähern, hingegen ergab die Hyperbelkurve

$$u_i = u_0 + a/(T_E - T_i)^{1/2}$$

u_i = gemessene Geschwindigkeit

u_0 = Anfangsgeschwindigkeit

T_i = Datum der Messung

T_E = Datum für $u = \text{unendlich}$

a = Parameter

sehr gute Übereinstimmung mit den Messungen.

Eine erste Einrechnung dieser Funktion in die Messdaten bis anfangs Februar 1972 mittels Ausgleichsrechnung ergab folgende Werte :

$$u_0 = 3.0 \pm 0.5 \text{ cm/Tag}$$

$$T_E = 4. \text{ September } 1973 \quad m_F = 40 \text{ Tage}$$

Die Residuen der Funktion zu den Beobachtungen ergaben einen mittleren Fehler von ± 0.6 cm/Tag, was der Messgenauigkeit entsprach. Aus diesem Wert wurde aufgrund des Fehlerfortpflanzungsgesetzes der mittlere Fehler am Datum T_E zu ± 40 Tagen berechnet.

Bei der Annahme, dass die Geschwindigkeit vor dem Absturz 1 bis 2 m/Tag betragen werde, konnte das Absturzdatum bereits im Februar auf Ende August prognostiziert werden. Der Abbruch ereignete sich am 19. August, gut innerhalb der geschätzten Fehlerschranke.

Allerdings entsprach die Kurvencharakteristik am Absturztag schlecht den Kryokinegraphenmessungen. Die effektiven Beschleunigungen waren wesentlich grösser. Dieser Abweichung konnte Rechnung getragen werden, indem ein weiterer Parameter als Exponent

des Zeitgliedes in die Näherungsfunktion eingeführt wurde. Der Wert des Exponenten wurde zu 0.5 ermittelt. Die Ausgleichung der Messwerte auf diese Näherungsfunktion

$$u_i = u_0 + a / (T_E - T_i)^{1/2}$$

ergab folgende Resultate für den Messpunkt 3:

M e s s u n g e n bis	Anzahl	u_0 cm/d	$u_{\text{unendl.}}$	Datum für $u_i=200$ cm/d	eff. Fehler	mittl. Fehler
21.2. 1973	2c	+0,7 +/-0,9	8.8. 1973	7 .8.1973	- 18 Tage	+58 Tage
19.3. 1973	24	+0,5 +/-0,7	31.8. 1973	30 .8.1973	+ 11 Tage	- 33 Tage
7.7. 1973	34	-0,6 +/-0,6	26.8. 1973	25 .8.1973	+ 6 Tage	- 7 Tage

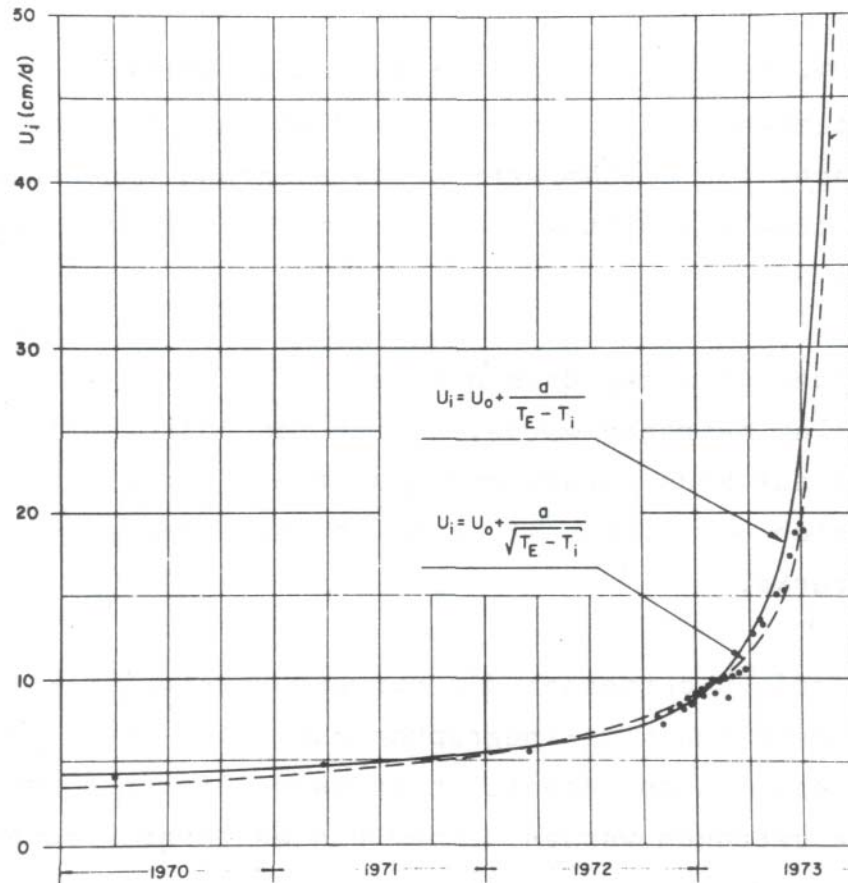
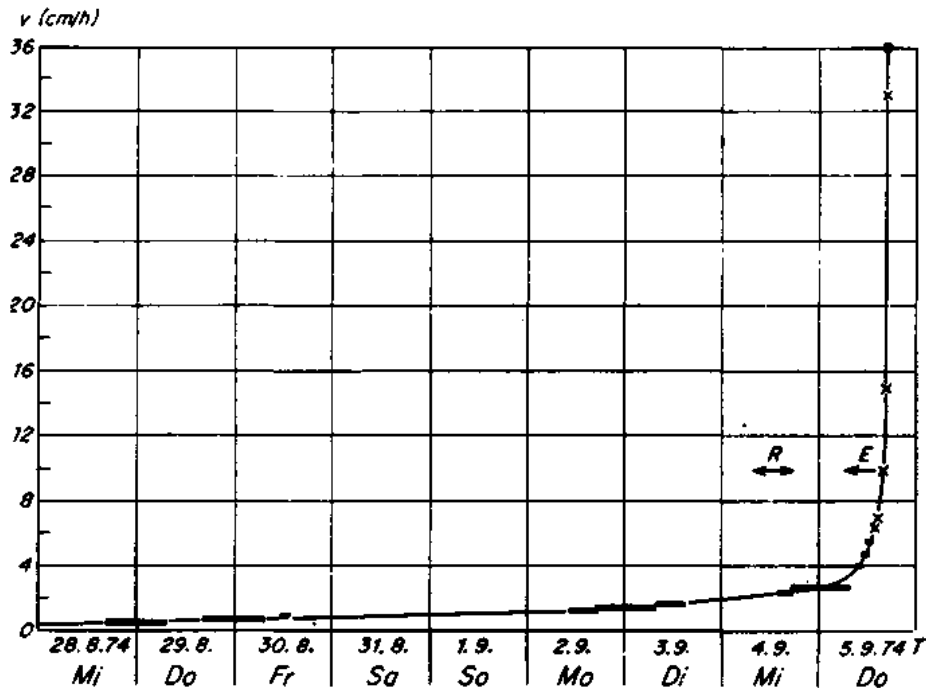


Fig.3 Bisletscher am Weisshorn
Geschwindigkeiten des Messpunktes 3

Zum Schluss dieses Kapitels sei noch kurz der Hergang der weiteren Ereignisse geschildert: Dank dem Umstand, dass sich die kompakte Eismasse allmählich etwas auflöste und der Absturz in zwei um etliche Stunden getrennten Abbrüchen in der Nacht und am Morgen des 19. Augustes ereignete, erreichten die einzelnen Teilmassen die kritische Masse von 200'000 m³ nicht. Die Eistrümmer blieben auf dem Gletscherplateau liegen.

E i s a b b r u c h a m G r u b e n g l e t s c h e r

Der Grubengletscher im Kanton Wallis staute einen Gletschersee, der öfters, in unberechenbaren Zeitabständen, plötzlich auslief und Überflutungen mit erheblichen Schäden verursachte. Zur Sanierung musste ein künstlicher, subglazialer Ablauf geschaffen werden. Während diesen Arbeiten drohte eine Eislamelle des Gletschers in den See abzustürzen. Die Flutwelle, verursacht durch diesen Absturz, hätte den Arbeitsplatz im Stollenvortrieb um einige Meter überspült. Die Bewegung der Eislamelle wurde deshalb mit einem Kryokinographen überwacht. Vermessungstechnisch ergaben sich keine Probleme. Die Messungen wurden durch Dr. W. Häberli vom Institut für Hydrologie an der ETH durchgeführt. Die Auswertung bestätigte die am Beispiel des Bisgletschers am Weisshorn aufgestellte Hypothese des zeitlichen Ablaufes des Bruchvorgangs gut. Die Ausgleichung ergab unter Beizug aller Messungen bis zur Absturz einen mittleren Fehler gerechnet aus den Residuen zur Ausgleichskurve von ± 6 cm/Tag mit den Funktionswerten $u_0 = 3,0$ cm/Tag $\pm 5,0$ cm/Tag und $a = 56$ cm/Tag^{1/2}.



F

Fig. 4 Grubengletscher, Absturzgeschwindigkeit der Eislamelle

B e r g s t u r z b e i M e i r i n g e n

Etwa 400 Meter oberhalb des Dorfes Meiringen im Berner Oberland drohte eine überhängende Felsmasse von ca. 80'000 m³ auf ein Wohnquartier abzustürzen. Kleinere Vorabbrüche, die nur bescheidenen Schaden verursachten, zeigten die latente Gefahr. Die Sanierung wurde in den Jahren 1973 bis 1975 ausgeführt, indem am Bergfuss im Talboden, knapp hinter den Wohnhäusern eine Fanggrube ausgehoben wurde und die Felswand in mehreren Etappen von je 5000 bis 10'000 m³ Masse abgesprengt wurde.

Bis zu dieser Lösung wurden seit 1967 monatlich Deformationsmessungen an Klüften durchgeführt, die als zukünftige Abrissstellen vermutet wurden. Die Messungen geschahen mittels Invarsetzlatten und Neigungsmessungen, Verfahren die von den Deformationsmessungen an Staumauern bekannt sind. Während den Bohr- und Sprengarbeiten wurden zusätzlich zu den Kluftrmessungen weiträumigere Ueberwachungen mittels einer Kleintriangulation vorgenommen, um eventuelle Ablösungen ausserhalb der beobachteten Klüfte feststellen zu können.

Die Interpretation der Resultate war anfänglich problematisch, da die durch die thermische Ausdehnung bedingten Bewegungen wesentlich grösser waren als die plastischen Deformationen. Durch Reduktion der Messungen aufgrund der monatlichen Mittelwerte der Lufttemperaturen konnten die bleibenden Verformungen erfasst werden. In der Skizze Fig. 5 sind die Jahresbewegungen dargestellt.

Im September 1973 erfolgte ein Teilabsturz von kleinem Ausmass, der die Messstellen 2 und 4 zerstörte. Die Resultate dieser Messungen gaben bereits im Winter 1971 Anlass zur Beschleunigung der Sanierungsarbeiten.

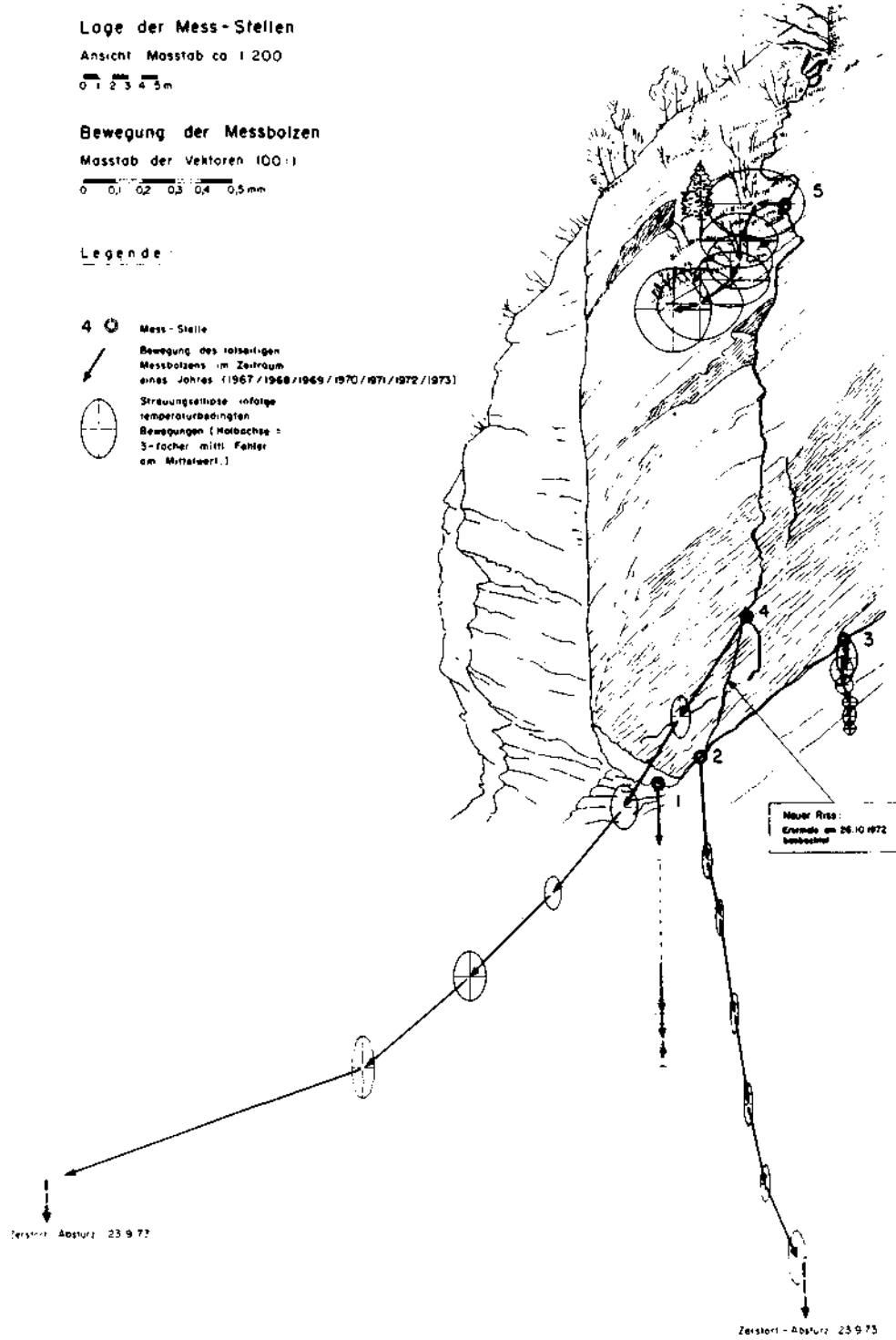


Fig. 5 Bergsturz Meiringen
Anordnung der Messstellen und jährliche Deformationen

Felsdeformationen verlaufen viel unregelmässiger als die des Eises. Die einzelnen Messungen streuen meist so stark, dass sie nicht unmittelbaren Aussagewert haben. Zusammengefasst zu längerfristigen Mittelwerten lassen sich aber auch Prognosen stellen wie das Diagramm Fig. 6 zeigt. Dargestellt ist die Horizontalkomponente der Bewegung an der Messstelle 4 in Halbjahresintervallen und in Monatsintervallen ab Juli 1973.

Die Messwerte lassen sich gut mit folgender Funktion angleichen:

$$u_i = 1.25 (T_E - T_i)^{-3/4}$$

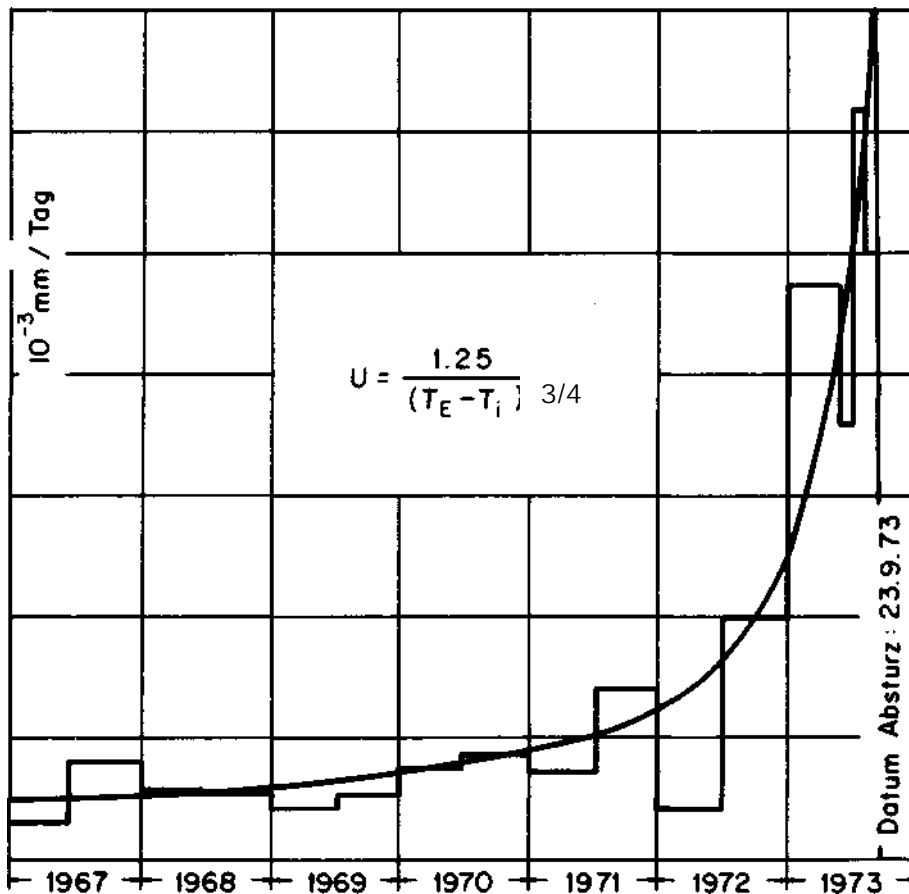


Fig. 6 Bergsturz bei Meiringen

Mittelwerte der Horizontalkomponente der Bewegung der Messstelle 4

S c h l u s s b e m e r k u n g e n

Zusammenfassend können wir aufgrund dieser und anderer, hier nicht erwähnter Beispiele sagen, dass Prognosen über Bruchvorgänge an Eis und Gestein möglich sind, wenn eine genügend lange Reihe von Messwerten vorliegt. Konstante Geschwindigkeiten sind nicht alarmierend, eine periodische Überwachung in längeren Intervallen ist angezeigt. Prognosen lassen sich aufgrund der Messwerte nicht stellen. Treten Beschleunigungen auf, ist eine intensive Überwachung nötig. Aus den progressiven Geschwindigkeitswerten lassen sich die weiteren Vorgänge aus den Messwerten extrapolieren.

Als beste Näherungsfunktion hat sich der Ansatz

$$u_i = a + b(T_E - T_i)^c$$

erwiesen. Bei Bruchvorgängen des Eises wurde der Parameter c als konstant zu -0.5 berechnet.

Die Funktion ist nach einem Ausgleichsverfahren in die Messungen einzurechnen, um ein Wahrscheinlichkeitsmass an der Unbekannten T_E zu erhalten.